



# **Tratado elemental de Física**

**Adolphe Ganot**

TRATADO  
ELEMENTAL  
**DE FÍSICA**

ESPERIMENTAL Y APLICADA

Y DE METEOROLOGÍA

CON UNA NUMEROSA COLECCIÓN DE PROBLEMAS

ILUSTRADO

Con 603 preciosos grabados en madera intercalados en el texto

POR A. GANOT

PROFESOR DE MATEMÁTICAS Y DE FÍSICA

Traducido al castellano

POR D. JOSE MONLAU

CORREGIDO POR D. J. M. PÉREZ, PROFESOR DE FÍSICA

Tercera edición española

REVISADA Y AUMENTADA SEGUN LA ÚLTIMA EDICIÓN FRANCESA

POR D. JOSE CAÑALEJAS Y CASAS.



MADRID

CÁRLOS BAILLY-BAILLIÈRE

LIBRERO DE CÁMARA DE SS. MM. DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL,  
DEL CONGRESO DE LOS SEÑORES DIPUTADOS Y DE LA ACADEMIA DE JURISPRUDENCIA  
Y LEGISLACION.

LIBRERÍA ESTRANJERA Y NACIONAL, CIENTÍFICA Y LITERARIA,

Plaza del Príncipe D. Alfonso (antes de Santa Ana), n.º 16.

París, J. B. BAILLIÈRE É HIJO. || Londres, H. BAILLIÈRE. || Nueva-York, BAILLIÈRE, HERMANOS.

1862.

▽△

## Advertencia del editor

Respecto a la tercera edición española, efectuada conforme a la novena y última que ha publicado el autor

Deseosos de contribuir al progreso científico de España, en esta edición, lo propio que en las anteriores, no hemos omitido medio, ni sacrificio de ningún género, para presentar al público español una traducción concienzuda del *Tratado de Física*, de GANOT, conforme en un todo al original francés, de cuyas ediciones sucesivas hemos conservado nociones científicas de gran valor, omitidas por el Autor en las últimas, al mismo tiempo que hemos añadido en la presente, los nuevos estudios y los grabados con que ha aumentado GANOT su *última* edición, que resumen todos los progresos surgidos últimamente en la física experimental y aplicada.

En esta edición hemos revisado con detenimiento el texto de las anteriores, añadiéndole los datos científicos apropiados a nuestro país; protestando de nuevo, que hemos

procurado llenar debidamente nuestro cometido, ansiosos de contribuir al progreso de las artes y de la industria, y de corresponder a la brillante acogida que han merecido del público las ediciones anteriores.

NOTA.

Los números que se leen al pie de los grabados, próximos a los que indican el orden de las figuras, consignan en centímetros la altura de los aparatos que representan las láminas, o bien su longitud en el sentido horizontal, según vayan precedidos dichos números de las letras *a* o *l*.

▽△

## Libro primero

De la materia, de las fuerzas y del movimiento

▽△

### Capítulo primero

▽△

#### Nociones generales

1. Objeto de la física. -La física tiene por objeto el estudio de los fenómenos que presentan los cuerpos, mientras la composición de éstos no sufre cambio alguno.

La *química*, por el contrario, trata en particular de los fenómenos que modifican más o menos profundamente la naturaleza de los cuerpos.

2. Materia. -Dase el nombre de *materia* o *sustancia* a todo cuanto cae inmediatamente bajo la jurisdicción de nuestros sentidos, impresionando esencialmente el sentido del tacto.

Se conocen hoy día sesenta y dos sustancias elementales o *simples*, es decir, sustancias de las cuales el análisis químico no consigue extraer más que una sola especie de materia. Pero es posible que más adelante aumente o disminuya el número de estas sustancias; porque así como tal vez lleguen a descubrirse otras nuevas, nada extraño fuera que se consiguiese descomponer algunas de las que ahora pasan por simples.

3. Cuerpos, átomos, moléculas. -Toda cantidad de materia limitada es un *cuerpo*. Las propiedades de los cuerpos revelan que no están formados de una materia continua, sino

de elementos, por decirlo así, infinitamente pequeños, que no se pueden dividir de un modo físico, y que se hallan yuxtapuestos simplemente sin tocarse, manteniéndose a cierta distancia en virtud de las atracciones y repulsiones recíprocas, que se designan con el nombre de *fuerzas moleculares*.

Estos elementos de los cuerpos se llaman *átomos*. Un grupo de átomos forma una *molécula*. Los cuerpos no son más que unos agregados o conjuntos de moléculas.

4. Masa. -Se denomina *masa* de un cuerpo en física, la cantidad de materia que contiene. En mecánica esta definición es insuficiente, y debe completarse, según indicaremos en tiempo oportuno (35).

5. Estados de los cuerpos. -Se distinguen tres estados en los cuerpos.

1.º El *estado sólido*, que se observa a las temperaturas ordinarias, en las maderas, en las piedras y en los metales, a excepción del mercurio. Caracteriza a este estado una adherencia tal entre las moléculas, que no es posible separarlas sino mediante un esfuerzo más o menos considerable. En virtud de esta adherencia, conservan los cuerpos sólidos su forma primera.

2.º El *estado líquido* que presentan el agua, el alcohol y los aceites. El carácter distintivo de los líquidos es una adherencia tan débil entre sus moléculas, que pueden resbalar o deslizarse con suma facilidad las unas sobre las otras, de lo cual resulta que estos cuerpos no afectan ninguna forma particular, tomando siempre la de las vasijas que les contienen.

5.º El *estado gaseoso*, propio del aire y de otros muchos cuerpos denominados *gases* o *fluidos aeriformes*. En los gases es aun mayor que en los líquidos la movilidad de las moléculas; pero su carácter distintivo reside sobre todo en la tendencia a adquirir de continuo un volumen más considerable. Tal es la propiedad que los físicos llaman *expansibilidad*, y que más adelante demostraremos por medio de varios experimentos.

Los líquidos y los gases se designan con el nombre genérico de *fluidos*.

La mayor parte de los cuerpos simples, y muchísimos de los compuestos, pueden presentarse sucesivamente en los tres estados, sólido, fluido y gaseoso, según sean las variaciones de temperatura. Como ejemplo bien conocido, puede citarse el del agua.

A medida que se avance en el estudio de la física, se reconocerá que los tres estados de los cuerpos dependen principalmente, de la relación entre las atracciones y las repulsiones moleculares.

6. Fenómenos físicos. -Todo cambio en el estado de un cuerpo, sin alteración en su composición, es un *fenómeno físico*. La caída de un cuerpo, la producción de un sonido, la congelación del agua, son fenómenos.

7. Leyes y teorías físicas. -Llámase *ley física*, la relación constante que hay entre un fenómeno y su causa. Por ejemplo, se demuestra que un volumen dado de gas, se hace dos, o tres veces menor, cuando sufre una presión dos, o tres veces mayor: he ahí una

ley física que se expresa diciendo, que los volúmenes de los gases están en razón inversa de las presiones.

Una *teoría física* es el conjunto de leyes referentes a una misma clase de fenómenos. En tal concepto se dice: la teoría de la luz, la teoría de la electricidad. Sin embargo, esta denominación se aplica también en un sentido más limitado a la explicación de ciertos fenómenos particulares; por ejemplo, cuando se dice: la teoría del rocío, la teoría del espejismo.

8. Agentes físicos. -Como causas de los fenómenos que presentan los cuerpos, se admite la existencia de *agentes físicos* o de *fuerzas naturales* que actúan sobre la materia.

Estos agentes son: la *atracción universal*, el *calórico*, la *luz*, el *magnetismo* y la *electricidad*.

Los agentes físicos no se nos manifiestan más que por sus efectos, pues desconocemos por completo su naturaleza. En el estado actual de la ciencia no se puede decir si son propiedades inherentes a la materia, o bien materias sutiles o impalpables, difundidas por todo el universo, y que dan por resultado los movimientos particulares comunicados a su masa. Esta última hipótesis es la que generalmente se admite; pero en tal caso, ¿son distintas unas de otras esas materias, o hay que referirlas a un solo origen o manantial? Esta última opinión es la que, por lo visto, tiende a prevalecer, a medida que van ensanchando sus límites las ciencias físicas.

En la hipótesis de que los agentes físicos son materias sutiles, se les da el nombre de *fluidos imponderables* o *imponderados*, porque su peso no es apreciable ni siquiera con las balanzas más sensibles. De ahí proviene la distinción de *materia ponderable*, o materia propiamente dicha, y *materia imponderable* o *agentes físicos*.

Los fluidos imponderables se denominan igualmente *fluidos incoercibles* para expresar que no pueden encerrarse, ni comprimirse en vasos cerrados, como se efectúa con el aire y con los demás gases.

▽△

## Capítulo II

▽△

### Propiedades generales de los cuerpos

9. Diversas especies de propiedades. -Entiéndese por *propiedades* de los cuerpos o de la materia, sus diversos modos de presentarse a nuestros sentidos. Se dividen en *generales* y *particulares*. Las primeras son las que convienen a todos los cuerpos, sea cual fuere el estado bajo el cual los consideremos. Las que interesa conocer desde ahora son: la *impenetrabilidad*, la *extensión*, la *divisibilidad*, la *porosidad*, la *compresibilidad*, la *elasticidad*, la *movilidad* y la *inercia*.

Las propiedades particulares son las que sólo se observan en ciertos cuerpos o en determinados estados de los mismos; v. gr., la *solidez*, la *fluidez*, la *tenacidad*, la *ductilidad*, la *maleabilidad*, la *dureza*, la *transparencia*, la *coloración*, etc.

Por ahora no trataremos más que de las propiedades generales arriba enunciadas; si bien debemos observar, que la *impenetrabilidad* y la *extensión* no tanto son propiedades generales de la materia, como atributos esenciales que bastarían para definirla. Notemos también, que la divisibilidad, la porosidad, la compresibilidad y la elasticidad no se aplican a los átomos, sino a los cuerpos considerados como masas o conjuntos de moléculas.

10. Impenetrabilidad. -La *impenetrabilidad* es la propiedad en virtud de la cual dos elementos materiales no pueden ocupar simultáneamente un mismo lugar en el espacio.

Esta propiedad sólo se observa realmente en los átomos. Los cuerpos se penetran al parecer, en muchísimos fenómenos. Por ejemplo, en varias aleaciones el volumen es menor que la suma de los volúmenes de los metales aleados. Cuando se mezcla agua con ácido sulfúrico o con alcohol, se nota una contracción en el volumen total. Todas estas penetraciones no son más que aparentes, pues dependen tan sólo de que, no tocándose las partes materiales de que están formados los cuerpos, hay entre ellas intervalos que pueden ocupar otras materias, conforme se verá en el artículo *Porosidad*.

11. Extensión. -La *extensión* es la propiedad que tiene todo cuerpo de ocupar una porción limitada del espacio.

Muchísimos son los instrumentos que se han construido para medir la extensión; pero nos limitaremos a dar a conocer aquí el vernier y el tornillo micrométrico.

12. Vernier. -El *vernier* o *nonius*, toma el primer nombre del apellido de su inventor, que fue un matemático francés que murió en 1637, y el segundo, del matemático español Núñez, que según nosotros, fue su verdadero inventor, puesto que murió en el año 1577. Este instrumento forma parte de muchos aparatos de física, tales como los barómetros y los catetómetros. Consta de dos reglas, de las cuales la mayor, AB ([fig. 1](#)) está fija y dividida en partes iguales, y la menor *ab*, móvil, que es propiamente el vernier. Para graduarla, se la da una longitud igual a nueve de las divisiones de la regla mayor, dividiéndola luego en diez partes iguales. Resulta de aquí que cada división de la regla *ab* es un décimo más pequeña que cada una de las de la regla AB.

Esto sentado, supóngase que hay que medir la longitud de un objeto MN. Se lo coloca, conforme se ve en la figura, a lo largo de la regla mayor, encontrándose así que dicho objeto tiene, por ejemplo una longitud igual a 4 unidades más una fracción. Para evaluar esta fracción sirve el vernier. Al efecto, se le hace resbalar sobre la regla fija hasta que llega a situarse en la extremidad del objeto MN, y en seguida se busca el punto en el cual tiene lugar la coincidencia entre las divisiones de las dos reglas. En nuestro dibujo se verifica en la octava división del vernier, a contar del punto N. Esto indica que la fracción que quedaba por medir es igual a 8 décimas. En efecto, por ser las divisiones del vernier un décimo más pequeñas que las de la regla, es claro que, a partir del punto de coincidencia, corriendo de derecha a izquierda, van sucesivamente retrasándose con respecto a las de la regla, uno, dos, tres..., décimos. Desde la extremidad N del vernier a la cuarta división de la regla se cuentan 8 décimos; es decir, que MN es igual a 4

divisiones de AB más 8 décimos. Por consiguiente, si las divisiones de la regla mayor son milímetros, se tendrá la longitud de MN con una aproximación de menos de un décimo de milímetro. Si quisiésemos llevar esta aproximación a menos de un vigésimo o de un trigésimo de milímetro, deberíamos dividir AB en milímetros, trasportar 19 o 29 en el vernier, y en seguida dividir este en 20 o 30 artes iguales. Más, para distinguir entonces la coincidencia, deberíamos servirnos de un lente. En la medida de los arcos se hace uso también del vernier, para evaluar en minutos y en segundos, las fracciones de grado.

13. Rosca o Tornillo micrométrico, máquina de dividir. -Por *tornillo micrométrico* se entiende todo tornillo o rosca que sirve para medir con precisión la longitud o el grueso de los cuerpos. Cuando un tornillo está bien construido, su paso, es decir, el intervalo de dos filetes consecutivos, debe ser el mismo en todos sus puntos; de donde resulta que, si el tornillo gira en una tuerca fija, avanza en cada vuelta una longitud igual a la del paso; y por cada fracción de vuelta, de  $\frac{1}{10}$  por ejemplo, no avanza más que  $\frac{1}{10}$  del paso. De consiguiente, si el paso mide un milímetro, y si en la extremidad del tornillo hay un círculo graduado y dividido en  $360^\circ$  que gira con él, haciendo que recorra este círculo no más que una división, avanzará el tornillo  $\frac{1}{360}$  de milímetro. En vez de una tuerca fija y de un tornillo movable, se puede adoptar el principio inverso, es decir, que el tornillo exista fijo, que sea la tuerca móvil, y que avance una cantidad tan pequeña como se quiera. En este principio se funda la máquina para dividir, representada en la [fig. 2](#), y construida en los talleres de M. Duboscq. Se compone de un banco de hierro fundido AQ, sobre el cual está montado un largo tornillo H, cuyo filete debe ser perfectamente regular. Este tornillo gira por sus dos extremidades en dos centros de acero fijos en el banco A, pero que no son visibles en el grabado. El tornillo en cuestión es fijo, es decir, que gira simplemente sobre sí mismo, sin avanzar en el sentido de su longitud. Al girar hace que adelante una tuerca, fija debajo de un carro o mesa B, y éste, arrastrado por la tuerca, resbala con rozamiento suave desde Q hasta H, sobre el banco A. La pieza P, que lleva un buril a cuyo curso regula, se halla fija en el banco de hierro fundido, sin mudar jamás de posición.

El movimiento del tornillo H se produce del modo siguiente: merced a un manubrio M, se hace dar vueltas a dos ruedas de ángulo  $m$  y  $n$ ; el eje de esta última lleva otras tres ruedas  $o$ ,  $p$ ,  $r$ , invariablemente unidas entre sí, pero independientes del tornillo, por lo menos en un sentido. Con este objeto se pone en el interior de la rueda  $p$  una especie de leva o dedo, que engrana en una rueda de dientes oblicuos, fija en el tornillo, haciéndole dar vueltas a éste cuando se gira de izquierda a derecha; pero en el movimiento inverso, es decir, de derecha a izquierda, la leva no engrana ya, y la rueda  $p$  se mueve sin hacer girar el tornillo.

Hay que regular ahora el ángulo según el cual deben girar las ruedas  $o$ ,  $p$ ,  $r$ , y con ellas el tornillo H. Para este fin, en el contorno de la rueda  $p$  existen abiertos tres filetes, que, obrando como un tornillo sin fin, engranan en los dientes de otra rueda  $u$ . Ésta lleva una punta saliente  $x$ , que se fija por medio de un tornillo de presión  $z$ , a la distancia que se quiere de otra segunda punta oculta en el tornillo  $z$ , y enlazada invariablemente con la rueda  $u$ . Por último, las dos ruedas  $o$  y  $r$  están divididas en 360 grados, viéndose en la primera una piececita saliente  $i$ , que va a chocar contra la punta  $x$ , para suspender su movimiento. Debajo, y en la misma rueda  $r$ , hay otra pieza análoga que queda contenida por la segunda punta fija en la rueda  $u$ . El tope o la pieza de la rueda  $r$  le está invariablemente fijo; pero el que designamos por  $i$  en la rueda  $o$ , puede fijarse en el

punto que se quiera de esta rueda. Además, este tope encuentra la punta  $x$  cuando se gira de izquierda a derecha, mientras que el de la rueda  $r$  da con la suya cuando se vuelve de derecha a izquierda.

Ahora bien; si se trata de hacer girar el tornillo un décimo de vuelta por ejemplo, se coloca el tope  $i$  en el sentido de la circunferencia, a una distancia de 36 grados del de la rueda  $r$ . Se gira entonces el manubrio  $M$  de derecha a izquierda, hasta que el tope de la rueda  $r$  hiera a su punta correspondiente; luego, principiando otra vez a girar de izquierda a derecha, la rueda  $p$  arrastra entonces al tornillo  $H$  en su movimiento, y cuando el tope  $i$  da en  $x$ , el tornillo ha girado treinta y seis grados; es decir, un décimo de vuelta. De consiguiente, si el palo del tornillo mide un milímetro, el carro o mesa y la tuerca que está debajo, habrán andado un décimo de milímetro.

Regulado así el movimiento del carro, se fija encima con mástic la placa  $E$  que se trata de dividir. Las señales se hacen por medio del buril  $a$  cargado con un peso. Cuando la mesa anda, se levanta el buril con la mano por medio de un vástago o de una varilla  $b$ ; pero luego que pase, se da un golpe sobre esta varilla y queda hecha la señal.

Como la longitud de las señales debe variar de 5 en 5 y de 10 en 10, la carrera o curso del buril se halla regulado por una rueda interior  $k$ , que pone en marcha la rueda  $k$  y el muelle  $e$ , a cada movimiento del buril. En el contorno de esta rueda se encuentran abiertas varias ranuras pequeñas de desigual profundidad, en las cuales entra un vástago  $N$  que participa del movimiento de adelanto del buril. Cuanto más profunda es una ranura, tanto mayor es el trayecto que recorre el buril, el cual marca también entonces las divisiones más largas.

14. Divisibilidad. -La *divisibilidad* es la propiedad que posee todo cuerpo de poder dividirse en partes distintas.

Pueden citarse muchísimos ejemplos de la suma divisibilidad que alcanza la materia. Por ejemplo, cinco centigramos de almizcle bastan para difundir, durante muchos años, partículas odoríferas en un aposento cuyo aire se renueva con frecuencia.

La sangre se compone de glóbulos rojos que flotan en un líquido llamado *suero*. En el hombre, estos glóbulos, que son esféricos, tienen un diámetro igual a un ciento cincuentavo de milímetro, y la gota de sangre que puede suspenderse de la punta de un alfiler, contiene cerca de un millón de los mismos.

Por último, existen animales harto pequeños para verse a la simple vista, y cuya existencia nos sería desconocida sin el auxilio del microscopio. Como estos animales se mueven y se nutren, es claro que tienen órganos. Por consiguiente, ¡cuál deberá ser la sorprendente tenuidad de las partículas de que se componen éstos!

Llevada la divisibilidad de los cuerpos bastante lejos para que sus partículas salgan de la esfera de acción del tacto y de la vista, a pesar del auxilio que prestan los, microscopios de más aumento, no es posible comprobar por medio de la experiencia, si la divisibilidad de la materia tiene un límite, o si es infinita. Sin embargo, atendida la estabilidad de las propiedades químicas propias de cada cuerpo, y vista la invariabilidad de las relaciones que median entre el peso de los elementos que se combinan, se admite que tiene un límite la divisibilidad. Véase por qué se consideran formados los cuerpos

de elementos materiales que no son susceptibles de ulterior división, y que se llaman por eso mismo átomos, es decir, inseparables (3).

15. Porosidad. -La *porosidad*, es la propiedad en virtud de la cual existen, entre las moléculas de los cuerpos, intersticios denominados poros.

Se distinguen dos especies de poros, a saber: los *poros físicos*, o intersticios bastante pequeños para que las fuerzas moleculares atractivas o repulsivas conserven su acción, y los *poros sensibles*, verdaderos agujeros o lagunas, en las cuales cesa la acción de las fuerzas moleculares. A los poros físicos se deben las contracciones y las dilataciones que provienen de los cambios de temperatura. Los poros sensibles, en los seres organizados, son el asiento de los fenómenos de exhalación y de absorción.

Los poros sensibles son aparentes en las esponjas, en las maderas y en muchas piedras; más los poros físicos no lo son jamás. Sin embargo, todos los cuerpos poseen esta última clase de poros, porque todos disminuyen de volumen por el enfriamiento y por la compresión.

Para demostrar experimentalmente los poros sensibles, se toma un largo tubo de vidrio A ([fig. 3](#)), terminado en su parte superior por un vasito de cobre *m*, y en su parte inferior por un pie del mismo metal que se puede atornillar en la platina P de una máquina que sirve para hacer el vacío. El fondo o del receptáculo *m* es de cuero grueso de búfalo. Viértese mercurio en el vasito hasta que se cubra enteramente el cuero, haciendo luego el vacío en el tubo. Acto continuo, por efecto de la presión atmosférica que se ejerce sobre el mercurio, este líquido pasa al través de los poros del cuero, y cae en el tubo en forma de menuda lluvia. De igual manera se hace pasar agua al través de los poros de la madera, cuando se sustituye al disco citado de cuero, otro de madera, cortada perpendicularmente a las fibras.

Si se echa en agua un pedazo de creta, se nota que sale una serie de burbujitas de aire, el cual ocupaba evidentemente los poros de la creta, siendo expulsado ahora de ellos por el agua que los penetra. En efecto, si se pesa la piedra antes y después de su inmersión, se observa que su peso ha aumentado considerablemente. Se puede también averiguar el volumen total de los poros, en vista del peso del agua absorbida.

Respecto a la porosidad de los metales, quedó demostrada por el siguiente experimento que en 1661 hicieron los académicos de Florencia. Deseaban cerciorarse de si el agua disminuía de volumen por efecto de una fuerte presión y para conseguirlo, se sirvieron de una esferita hueca de oro y de paredes delgadas; la llenaron de agua, y después de haberla cerrado herméticamente y soldado el orificio, la dieron varios martillazos para reducir su volumen. A cada golpe, el agua trasudaba por la pared, apareciendo al exterior como un depósito de rocío, lo cual demostraba la porosidad del metal. Varios físicos repitieron este experimento con otros metales, y siempre obtuvieron iguales resultados.

16. Volumen aparente y volumen real. -Recordando la porosidad, no debe confundirse en cada cuerpo su *volumen aparente*, es decir, la porción de espacio que ocupa, con el *volumen real*, que sería el que ocuparía la materia propia del cuerpo si pudiesen desaparecer los poros; en otros términos, el volumen real es el volumen aparente menos

el de los poros. El volumen real de un cuerpo es invariable; pero el aparente aumenta o disminuye con el de los poros.

17. Aplicaciones. -La porosidad se ha utilizado en los filtros de papel, de fieltro, de piedra y de carbón, que tanto sirven en la economía doméstica. Los poros de estas sustancias son bastante grandes para dar paso a los líquidos, pero demasiado pequeños para consentir que los crucen las sustancias que aquéllos tienen en suspensión. En las canteras, se abren ranuras en los peñascos para introducir en ellas cuñas de madera bien secas; humedeciéndolas en seguida, penetra el agua en sus poros, se hincha la madera, y desprende considerables masas de piedra. Las cuerdas secas aumentan en diámetro y disminuyen en longitud, cuando se las moja, circunstancia que se ha utilizado para levantar enormes fardos.

18. Compresibilidad. -La *compresibilidad* es la propiedad que poseen los cuerpos de reducirse a menor volumen, por efecto de la presión. Esta propiedad es consecuencia de la porosidad, de la cual es al mismo tiempo una prueba.

La compresibilidad es muy variable, según los cuerpos. Los más compresibles son, los gases, que pueden reducirse, bajo presiones adecuadas, a un volumen 10, 20 y hasta 100 veces menor que el que ocupan en las condiciones ordinarias. Con todo, en la mayor parte de los gases se llega a un límite de presión, pasado el cual no persiste el estado gaseoso, siendo reemplazado por el estado líquido.

Tal compresibilidad de los sólidos es bastante menor que la de los gases, y se nos manifiesta en grados muy diversos. Las telas, el papel, el corcho, la madera, son las sustancias más compresibles. También lo son los metales, según lo indican las impresiones que reciben las medallas por efecto del choque de los volantes o prensas. Téngase entendido que la compresibilidad de los sólidos reconoce igualmente un límite, más allá del cual ceden los cuerpos a la presión, se disgregan de repente y se reducen frecuentemente a polvo impalpable.

Por lo que toca a los líquidos, tan débil es su compresibilidad, que por largo tiempo se les tuvo por completamente incompresibles; pero la experiencia ha revelado esta propiedad, conforme se demostrará en la hidrostática.

19. Elasticidad. -La *elasticidad* es la propiedad que poseen los cuerpos de recobrar su forma o volumen primitivos, luego que cesa de obrar la fuerza que alteraba dicha forma o volumen. Puede desarrollarse la elasticidad en los cuerpos, por presión, por tracción, por flexión o por torsión. Por de pronto sólo estudiaremos, como propiedad general, la elasticidad por presión; pues las demás especies de elasticidad entran en el número de las propiedades particulares de los cuerpos sólidos, que son los únicos que las presentan.

Los gases son perfectamente elásticos, es decir, recobran exactamente el mismo volumen, así que la presión vuelve a adquirir su primitivo valor. Lo propio pasa con los líquidos, sea cual fuere la presión a que se les haya sometido, pero no hay ningún cuerpo sólido tan perfectamente elástico como los gases y los líquidos, sobre todo cuando se han prolongado mucho tiempo las presiones. No obstante, la elasticidad es muy marcada en la goma elástica, en el marfil, en el vidrio y en el mármol, aunque apenas es sensible en las grasas, en las arcillas y en el plomo.

En los sólidos hay un límite de elasticidad, pasado el cual, o se rompen, o por lo menos no recobran ya exactamente su forma o su volumen primitivos. En las torceduras del pie, por ejemplo, se superó el límite de elasticidad de los ligamentos. Este límite no se conoce en los gases ni en los líquidos, pues siempre recobran su volumen primitivo.

La elasticidad es el resultado de una aproximación molecular, y por lo mismo, de un cambio de forma que, en los cuerpos sólidos, se pone en evidencia por el siguiente experimento: sobre un plano de mármol pulimentado y cubierto por una ligera capa de aceite, se deja caer una pequeña esfera de marfil, de vidrio o de mármol, la cual vuelve a subir a una altura algo menor que la de la caída, después de haber dejado, en el punto en que chocó, una huella circular tanto mayor, cuanto más considerable sea la altura de que haya caído la esfera. En el momento del choque, ésta debió aplanarse sobre la superficie del mármol, y mediante la reacción de las moléculas así comprimidas, volvió a elevarse.

20. Movilidad, movimiento, reposo. -La movilidad es la propiedad que poseen los cuerpos de poder trasladarse de un lugar a otro.

Llámase movimiento el estado de un cuerpo que muda de lugar; y reposo su permanencia en el mismo sitio. El reposo y el movimiento son absolutos o relativos.

El *reposo absoluto* sería la completa privación de movimiento. No se conoce en todo el universo cuerpo alguno que se halle en este estado.

El *movimiento absoluto* sería su cambio de lugar con respecto a otro cuerpo que se encontrara en el estado de reposo absoluto.

El *reposo relativo*, o aparente, es el estado de un cuerpo que parece fijo con relación a los cuerpos que le rodean; pero que en realidad participa con ellos de un movimiento común. Por ejemplo, un cuerpo que permanece en el mismo sitio en un buque que se mueve, está en reposo con respecto al buque; pero realmente se halla en movimiento, con relación a la costa o a la orilla: he ahí un reposo simplemente relativo.

El *movimiento relativo* de un cuerpo no es más que su movimiento aparente, es decir, el que se mide con relación, a otros cuerpos que se suponen fijos, por más que estos mismos estén mudando de lugar.

Tal es el movimiento de un buque con respecto a las orillas de un río, porque éstas participan con él del doble movimiento de rotación y de traslación de la tierra en el espacio.

En la naturaleza, no se observan más que estados de reposo y de movimiento relativos.

21. Inercia. -La inercia es una propiedad puramente negativa: es la ineptitud de la materia para pasar por sí misma, del estado de reposo al de movimiento, o para modificar el movimiento de que está animada.

Si caen los cuerpos cuando se les abandona a sí mismos, es porque hay una fuerza atractiva que les dirige hacia el centro de la tierra, y no porque lo hagan en virtud de su propia espontaneidad; si disminuye gradualmente la velocidad de una bola en una mesa de billar, es a consecuencia de la resistencia del aire que desaloja y de su roce sobre el

tapete. No hay que deducir, pues, que esta bola tenga más bien tendencia al reposo que al movimiento, según decían ciertos filósofos de la antigüedad, equiparando la materia con una persona perezosa. Donde quiera que falte la resistencia, no sufre alteración alguna el movimiento, conforme nos dan buena prueba de ello los astros en su revolución alrededor del sol.

22. Aplicaciones. -Muchos fenómenos se explican por la inercia de la materia. Por ejemplo, cuando, para salvar un foso, tomamos una carrera, es con objeto de que, en el momento del salto, el movimiento que nos anima añada su efecto al esfuerzo muscular que hacemos para saltar.

Toda persona al bajar de un carruaje que continúa andando, participa del movimiento del mismo, y así es que, si no imprime a su cuerpo un movimiento en sentido contrario, en el instante en que toque al suelo, cae en la dirección que sigue el carruaje.

La inercia es la causa de que sean tan terribles los accidentes en los caminos de hierro. En efecto, si de improviso se para la locomotora, todo el tren continúa su marcha, en virtud de la velocidad adquirida, y los coches se destrozan chocando unos contra otros.

Por fin, los martillos, las manos de mortero y los martinetes no son más que aplicaciones de la inercia. Lo propio sucede con esas enormes ruedas de hierro fundido llamadas volantes, y que sirven para regularizar los movimientos de las máquinas de vapor.

▽△

## Capítulo III

▽△

### Nociones sobre las fuerzas y los movimientos

23. Fuerzas. -Dase el nombre de *fuerza*, a toda causa capaz de producir el movimiento o de modificarle.

La acción de los músculos en los animales, la gravedad, las atracciones y las repulsiones magnéticas o eléctricas, la tensión de los vapores, etc., son fuerzas.

En general, se denominan *potencias* las fuerzas que tienden a producir un cierto efecto, y *resistencias*, las fuerzas que se oponen a este efecto. Las primeras, tendiendo a acelerar a cada instante el movimiento, se llaman *aceleratrices*, y las últimas se denominan *retardatrices*.

Las fuerzas pueden obrar sobre los cuerpos durante un tiempo muy breve, como sucede en los choques, y en la explosión de la pólvora; o bien durante toda la duración del movimiento. Se expresa el primer efecto, diciendo que las fuerzas son *instantáneas*, y el segundo, manifestando que son *continuas*; pero conviene observar que con estas

expresiones se dan a entender, no dos especies de fuerzas, sino simplemente dos modos de acción de las mismas.

24. Equilibrio. -Cuando muchas fuerzas se aplican a un mismo cuerpo, puede suceder que se neutralicen mutuamente sin modificar el estado de reposo o de movimiento del cuerpo. Este estado particular de los cuerpos ha recibido el nombre de *equilibrio*. Preciso es no confundir el estado de equilibrio con el de reposo, pues en el primero se halla sometido un cuerpo a la acción de muchas fuerzas que se destruyen, y en el segundo no se halla solicitado por fuerza alguna.

25. Caracteres, unidad y representación de las fuerzas. -Toda fuerza está caracterizada: 1.º por su *punto de aplicación*, esto es, por el punto en que la fuerza actúa inmediatamente; 2.º por su *dirección*, es decir, por la línea recta que la fuerza tiende a hacer recorrer a su punto de aplicación, y, 3.º por su *intensidad*, a saber, por su valor con relación a otra fuerza tomada como unidad.

La fuerza que se elige como unidad, es completamente arbitraria; pero, sea cual fuere el efecto de tracción o de presión producido por una fuerza, un peso dado puede siempre producir el mismo efecto, y por eso se comparan en general las fuerzas con los pesos, tomando por unidad de fuerza el kilogramo. Una fuerza es igual a 20 kilogramos, por ejemplo, si puede reemplazarse por la acción de un peso de 20 kilogramos.

En vista de los caracteres que determinan una fuerza, se halla ésta completamente conocida, cuando se dan su punto de aplicación, su dirección y su intensidad. Para representar estos diversos elementos de una fuerza, se tira por su punto de aplicación, y en el sentido de su dirección, una línea recta indefinida; y luego, sobre esta línea, a partir del punto de aplicación, y en el sentido de la fuerza, se señala una unidad de longitud arbitraria, el centímetro, por ejemplo, tantas cuantas veces la fuerza dada contiene a su vez la unidad de fuerza. De esta suerte se tiene una línea recta que determina por completo la fuerza. En fin, para distinguir las fuerzas entre sí, se las designa con las letras P, Q, R..., escritas en sus respectivas direcciones.

Para la inteligencia de muchos fenómenos físicos es indispensable recordar ahora los siguientes principios, que se demuestran en los cursos de mecánica.

26. Resultantes y componentes. -Siempre que muchas fuerzas S, P, Q, aplicadas a un mismo punto material A ([fig. 4](#)), se equilibran, una de ellas cualquiera, S, por ejemplo, resiste por sí sola la acción de todas las demás. La fuerza S, si estuviese dirigida en sentido contrario, según la prolongación AR de SA, producirá pues, por sí sola el mismo efecto que el sistema de las fuerzas P y Q.

Toda fuerza que puede producir así el mismo efecto que muchas fuerzas combinadas, se llama su *resultante*, y las demás fuerzas, con relación a la resultante, son sus *componentes*.

Cuando un cuerpo, solicitado por muchas fuerzas, se pone en movimiento, se demuestra que éste se efectúa siempre según la resultante de todas aquéllas. Por ejemplo, si un punto material A ([fig. 5](#)) se encuentra solicitado a la vez por dos fuerzas P y Q, como no puede moverse simultáneamente siguiendo las rectas AP y AQ, acepta una dirección intermedia AR, que es precisamente la de la resultante de las dos fuerzas P y Q.

Todos los problemas sobre la *composición* y la *descomposición* de las fuerzas, se fundan en los siguientes teoremas, para cuya demostración remitimos a los tratados especiales de mecánica.

27. Composición y descomposición de las fuerzas paralelas. -1.º *Cuando dos fuerzas paralelas están aplicadas a un mismo punto tienen una resultante igual a su suma, si siguen la misma dirección, y a su diferencia, si poseen una dirección contraria.* Por ejemplo, si dos hombres tiran de un fardo en direcciones paralelas, con esfuerzos respectivos e iguales a 20 y a 15, el esfuerzo resultante será 35, o 5, según tiren en un mismo sentido, o en sentido opuesto. De igual manera, cuando muchos caballos de tiro están enganchados a un carruaje, éste avanza cual si estuviese solicitado por una fuerza única, equivalente a la suma de las fuerzas de cada caballo.

2.º *Siempre que dos fuerzas paralelas y que siguen una misma dirección se aplican a las extremidades de una recta AB (fig. 6), su resultante R es igual a la suma, les es paralela, y divide la recta AB en dos partes inversamente proporcionales a las fuerzas P y Q.* En otros términos, siendo C el punto de aplicación de la resultante, si la fuerza P es dos, o tres veces mayor que la fuerza Q, la distancia AC es dos, o tres veces menor que CB. De donde resulta que cuando las fuerzas P y Q son iguales, la dirección de su resultante divide la línea AB en dos partes iguales.

Recíprocamente una fuerza única R aplicada en C, puede reemplazarse por el sistema de dos fuerzas P y Q, cuya suma represente, si éstas le son paralelas, y si, estando en línea recta los puntos A, B, C, se hallan estas nuevas fuerzas en razón inversa de las longitudes AC y CB.

Para obtener la resultante de muchas fuerzas paralelas y dirigidas en el mismo sentido, se busca primero, conforme dijimos más arriba, la resultante de dos de estas fuerzas, luego la de la resultante encontrada y de una tercera fuerza, y así sucesivamente hasta la última, obteniendo por resultante final de esta suerte, una fuerza igual a la suma de las fuerzas dadas y de idéntica dirección.

28. Composición y descomposición de las fuerzas concurrentes. -Denomínanse fuerzas *concurrentes* aquéllas cuyas direcciones se encuentran en un mismo punto, al cual podemos suponerlas aplicadas todas. Por ejemplo, cuando muchos hombres para dar movimiento a una campana tiran de las cuerdas fijas a un mismo nudo de la cuerda de dicha campana, las fuerzas de los hombres son concurrentes.

Sean, desde luego, dos fuerzas concurrentes P y Q (fig. 7), y A su punto de aplicación. Si se toman en sus direcciones dos longitudes AB y AC proporcionales a sus intensidades (25), y si, desde los puntos B y C, se tiran rectas respectivamente paralelas a las direcciones de las fuerzas, se obtiene un paralelogramo ABCD llamado *paralelogramo de las fuerzas*, y que da a conocer fácilmente la resultante de las fuerzas P y Q, por medio del teorema siguiente, conocido a su vez con el nombre de teorema del *paralelogramo de las fuerzas*.

29. Paralelogramo de las fuerzas. -*La resultante de dos fuerzas concurrentes es la representada, en magnitud y en dirección, por la diagonal del paralelogramo construido sobre estas fuerzas.* Es decir, que en la fig. 7, la resultante R de las fuerzas P y Q sigue la misma línea que la diagonal AD, y contiene la unidad de fuerza tantas

veces cuantas esta diagonal comprende a su vez la unidad lineal marcada en AB y AC, para representar las fuerzas P y Q.

Recíprocamente, una fuerza única se puede descomponer en otras dos aplicadas al mismo punto que la primera y dirigidas según rectas dadas. Basta construir, para esto, sobre dichas rectas, un paralelogramo cuya diagonal sea la fuerza dada, pues la longitud de los lados representará las componentes que se buscan.

Dado caso que hubiera cierto número de fuerzas aplicadas a un mismo punto en diversas direcciones, la resultante se obtiene aplicando sucesivamente el teorema anterior, primero a dos fuerzas, luego a la resultante obtenida y a la tercera fuerza, y así sucesivamente hasta la última.

Los efectos de la composición o de la descomposición de las fuerzas se presentan constantemente a nuestra observación. Por ejemplo, cuando un barquichuelo movido por la acción de los remos, atraviesa un río, no avanza en la dirección hacia la cual le impulsan los remos, ni sigue tampoco la de la corriente, sino que recorre con exactitud la línea que corresponde a la resultante de las dos impulsiones a que se halla sometido.

29. -P. Para completar estas nociones sobre la composición de fuerzas, daremos una demostración sencilla de la resultante de dos fuerzas concurrentes y de dos paralelas, pues el uso continuo que de ambas se hace, exige que el principiante esté bien convencido de la verdad de los enunciados anteriores, mas como hemos de tener necesidad de trasladar una fuerza a otro punto de aquél en el cual se halla aplicada, sin que por esto se altere la condición de equilibrio o movimiento en que estuviera el cuerpo, principiaremos por dar a conocer que, *el punto de aplicación de una fuerza puede trasladarse a cualquiera otro que esté invariablemente unido con el primero en la prolongación rectilínea de la misma, sin que por esto se alteren las condiciones de equilibrio o movimiento en que estuviese el cuerpo*. En efecto, si consideramos la fuerza  $Q'$  ([fig. 8](#)) aplicada en el punto  $b$ , y queremos trasladarla al punto  $a$ , supondríamos introducidas en este punto dos fuerzas P y Q iguales y contrarias, pero de magnitud igual a la de la fuerza  $Q'$ : estas nuevas fuerzas no alterarán el movimiento que produce la fuerza  $Q'$ , pues ellas mismas se destruyen. Pero si consideramos ahora que también las dos fuerzas P y  $Q'$ , son iguales y contrarias, y por consiguiente que pueden considerarse como destruidas, el movimiento que el cuerpo tiene podrá atribuirse a la fuerza  $Q'$ , como si en su lugar se hubiese puesto la fuerza  $Q'$ .

29\*. -P. Consideremos ahora las dos fuerzas concurrentes P y Q ([fig. 7](#)) y pasemos a demostrar: 1.º que la dirección de la resultante nos está dada por la de la diagonal AD del paralelogramo ABCD, construido sobre las direcciones e intensidades de las dos fuerzas; 2.º que la longitud de esta diagonal nos representa asimismo la intensidad de dicha resultante.

Para resolver la primera parte de esta proposición, supondremos descompuesto el paralelogramo ABCD ([fig. 9](#)) en otros dos  $ABo'o$  y  $o'CDo$  iguales entre sí. Si en los ángulos opuestos A y  $o$  del primer paralelogramo parcial suponemos aplicadas en la prolongación de sus lados las cuatro fuerzas  $a, b, a', b'$  iguales entre sí, este paralelogramo quedará en equilibrio por la simetría e igualdad de las fuerzas. Haciendo igual suposición para el segundo paralelogramo, de modo que las fuerzas  $c, d, c', d'$ , sobre ser iguales entre sí, lo sean también a las primeras, encontraremos también que

este paralelogramo está en equilibrio; y por consiguiente, que lo está el paralelogramo total. Ahora, como las fuerzas  $d$  y  $b'$  son iguales y contrarias, se destruyen, y quedan sólo las fuerzas  $a, b, c, a', c', d'$ , que, según lo dicho en el número anterior y según representa la figura, pueden considerarse aplicadas en los puntos A y C, sin que por esto se altere el equilibrio; pero la fuerza binaria  $d' a''$  con la  $c'$  producen una resultante tal como R aplicada necesariamente en el punto C; y del mismo modo la  $b c''$  con la  $a$  originan la resultante S aplicada necesariamente al punto A. Pero si estas dos resultantes han de producir equilibrio como sus componentes, sólo pueden verificarlo siendo iguales y obrando en la prolongación de la recta AC, que une sus puntos de aplicación; y como la recta AC es la *diagonal del paralelogramo construido sobre las intensidades y direcciones de las fuerzas concurrentes*, queda demostrada la primera parte de la proposición. La generalización de esta demostración proviene de que igual resolución permiten dos fuerzas cualesquiera, que estén entre sí en la misma relación que los números enteros.

Para demostrar que la longitud de la diagonal nos representa asimismo la intensidad de la resultante, supondremos que en la [fig. 10](#) hemos introducido una fuerza AS de la longitud indeterminada, pero de dirección contraria a la diagonal AR que nos representa la dirección de la resultante de las dos fuerzas P y Q. Supongamos conocida la magnitud de la fuerza AS, y que sea tal, que produzca equilibrio con la resultante AR. En este caso también lo producirá cuando, en vez de AR, actúen sus componentes P y Q; pero según lo demostrado (26), AQ' nos representará la resultante de AS y AP, que ya sabemos que ha de ser la diagonal del paralelogramo construido sobre las intensidades de estas fuerzas. Concluyamos, pues, el paralelogramo tirando una paralela PQ' a la AS, desde el punto determinado P, y otra Q'S a la AP desde el punto Q' en que la primera paralela encontró a la diagonal AQ', y en el punto S se nos limitará la intensidad de la fuerza AS. Ahora bien; como las fuerzas P, Q y S hemos supuesto que producen equilibrio, la fuerza S será igual y contraria a la resultante de las fuerzas P y Q, lo cual vemos que nos lo dice la misma figura, pues las rectas AR y a AS son iguales a la recta PQ' por lados opuestos de sus respectivos paralelogramos. Luego *la diagonal AR nos representa la dirección e intensidad de la resultante de las dos fuerzas P y Q*, que es lo que queríamos demostrar.

29\*\*.-P. Después de la demostración del paralelogramo de las fuerzas, podemos entrar en la resolución de la *resultante de dos fuerzas paralelas que actúan en un mismo sentido*; y vamos a demostrar que dicha resultante *es paralela a las componentes, igual en intensidad a la suma de las mismas, y que su punto de aplicación divide a la recta que une los de las componentes, en partes inversamente proporcionales a las intensidades de éstas*.

Supongamos para esto las dos fuerzas P y Q ([fig. 11](#)) paralelas y aplicadas a los puntos A y B. El movimiento que dichas fuerzas determinen no quedará alterado porque introduzcamos dos nuevas fuerzas F y F', iguales y contrarias entre sí; mas por la composición de las cuatro fuerzas obtenemos las dos únicas AS y BS', que siendo concurrentes, y por lo dicho (29-P.), podemos aplicarlas en el punto o, de modo que si la os y os' las descomponemos en fuerzas iguales y paralelas a las primitivas, tendremos por un lado la f y f' que se destruirán, y por otro la op, más pq que nos dan por su suma la intensidad de la resultante R igual a P+Q. Esta resultante, en virtud del párrafo citado, se puede aplicar en el punto C, y por la semejanza de los triángulos SAP y AoC, resulta: SP:AP::AC:oC; o bien, F:P::AC:oC (a). Por la misma razón, los triángulos BoC y S'BQ

nos dan:  $QS':BQ::CB:oC$ ; o bien  $F':Q::CB:oC$ . Pero como esta proposición y la (a) tienen iguales los extremos, resulta que  $P \times AC = Q \times CB$ ; y por consiguiente:  $P:Q::CB:AC$ , que es lo que nos proponíamos demostrar.

Ahora podemos pasar al caso en que las dos fuerzas paralelas obren en sentido contrario.

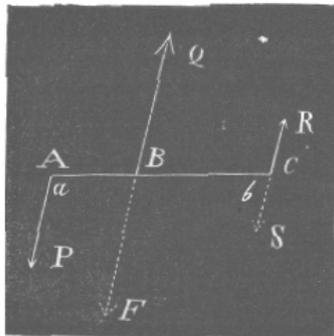


Fig. 19.

29. -P'. Sean las dos fuerzas P y Q las que obran en sentido contrario, encontrándose aplicadas en los puntos A y B. Si suponemos una nueva fuerza S igual a  $Q - P$ , paralela a las primitivas, y en sentido de la menor, de modo que la distancia BC de su punto de aplicación sea a la AB como  $P:S$ , estas dos fuerzas, según el caso anterior, nos darán la resultante F, que será igual y contraria a la fuerza Q; que si sólo obrasen las fuerzas P, Q y S, tendríamos un caso de equilibrio entre estas tres fuerzas, y según (26), la fuerza S será igual y contraria a la resultante R de P y Q. De donde deducimos por consecuencia, que *la resultante de dos fuerzas paralelas actúan en sentido contrario, es igual a la diferencia de las componentes, y que obra en sentido de la mayor*. En cuanto al punto de aplicación, lo podemos deducir del caso anterior que nos dio:  $S:P::AB:BC$ ; o bien  $R:P::BC$ ; y por consiguiente,

$$BC = P \times AB / R = P \times AB / Q - P.$$

Haciendo en la última ecuación  $P=Q$ , resulta  $BC = \infty$  lo cual nos dice, que no existe resultante única. El cuerpo en este caso toma un movimiento de rotación alrededor del punto medio de la recta AB, en tanto que los ángulos  $a$  y BCR queden invariables durante toda la acción de las fuerzas. A este caso particular, se le conoce con el nombre de *par de fuerzas*.

▽△

## Nociones sobre los movimientos

30. Diferentes géneros de movimientos. -Se ha visto ya (20), que el *movimiento* es el estado de un cuerpo que pasa de un lugar a otro. El movimiento es *rectilíneo* o *curvilíneo*, según sea el camino recorrido por el móvil una línea recta o bien una curva, y cada uno de estos movimientos puede ser a su vez *uniforme* o *variado*.

31. Movimiento uniforme. -El *movimiento uniforme*, que es el más sencillo de todos, es aquél en el cual recorre un móvil espacios iguales en tiempos iguales.

Toda fuerza instantánea produce un movimiento rectilíneo y uniforme, cuando no está sometido el móvil a ninguna otra fuerza, ni encuentra tampoco resistencia. En efecto, como la fuerza no actúa más que durante un tiempo muy corto, el móvil, una vez abandonado a sí mismo, conserva, en virtud de su inercia, la dirección y la velocidad que le comunicó la fuerza. No obstante, las fuerzas continuas pueden dar origen también

a movimientos uniformes. Tal es lo que sucede cuando se presentan resistencias que, renovándose sin cesar, destruyen el aumento de velocidad que estas fuerzas tienden a imprimir al móvil, como por ejemplo, un tren que en un ferrocarril, está solicitado por una fuerza continua, y que a pesar de esto adquiere un movimiento uniforme; porque, creciendo con la velocidad las pérdidas de fuerza ocasionadas por la resistencia del aire y por el roce, llega un momento en que se establece el equilibrio entre la fuerza motriz y las resistencias.

32. Velocidad y ley del movimiento uniforme. -En el movimiento uniforme se entiende por *velocidad* el camino recorrido en la unidad de tiempo. Esta unidad, completamente arbitraria, es, por punto general, el *segundo*. Dedúcese de la definición del movimiento uniforme, que la velocidad es constante. En tiempos, dos, tres, cuatro veces mayores, los caminos recorridos son, pues, dobles, triples, cuádruples. Esta ley se expresa diciendo, que *los espacios recorridos son proporcionales a los tiempos; esto es, que crecen como los tiempos*.

Esta ley puede representarse por medio de una fórmula muy sencilla. Para esto, sean  $v$  la velocidad,  $t$  el tiempo y  $e$  el espacio recorrido. Supuesto que  $v$  representa el espacio recorrido en la unidad tiempo, es claro que el que se recorra en 2, 3... unidades de tiempo, será  $2v$ ,  $3v$ ...; y por último, en el tiempo  $t$ , será  $t$  veces  $v$ : se tiene, de consiguiente,  $e = vt$ .

De esta fórmula se deduce  $v=e/t$ ; y por lo tanto, puede decirse que en el movimiento uniforme, *la velocidad es la relación entre el camino recorrido y el tiempo empleado en recorrerle*.

33. Movimiento variado. -*Movimiento variado*, es aquél en el cual un móvil recorre en tiempos iguales espacios desiguales. Este movimiento puede variar al infinito; pero sólo conviene tratar aquí del uniformemente variado.

Dase el nombre de *movimiento uniformemente variado*, a aquél cuyos espacios recorridos, en tiempos iguales, aumentan o disminuyen constantemente en una misma cantidad (52, 2.<sup>a</sup> ley, *consecuencia*). En el primer caso, el movimiento es *uniformemente acelerado*, tal es, por ejemplo, el de un cuerpo que cae, prescindiendo de la resistencia del aire. En el segundo, es *uniformemente retardado*, como lo es el de una piedra arrojada en sentido vertical y de abajo hacia arriba.

El movimiento uniformemente variado reconoce siempre por causa, una fuerza continua constante, que actúa como potencia o como resistencia, según sea aquél, acelerado o retardado.

34. Velocidad y ley del movimiento uniformemente acelerado. -En el movimiento uniformemente acelerado, no siendo iguales los espacios recorridos en tiempos iguales, ya no es la velocidad el camino recorrido en la unidad de tiempo, como en el movimiento uniforme. En el caso presente se llama velocidad, en un instante dado, el espacio que, a partir desde este instante, recorrería uniformemente en cada segundo, si cesara de improviso la fuerza aceleratriz; es decir, si se volviese uniforme el movimiento. Por ejemplo, si se dice de un móvil que tiene una velocidad de 60 metros a los 10 segundos de un movimiento uniformemente acelerado, se da a entender que, si en aquel instante cesara la fuerza que hasta entonces había obrado, el móvil, en virtud de su inercia, continuaría moviéndose, recorriendo uniformemente 60 metros por segundo.

Admitido esto, todo movimiento uniformemente acelerado, sea cual fuere su aumento de velocidad, se halla sometido a las dos leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Las velocidades crecen proporcionalmente a los tiempos.* Es decir, que después de un tiempo doble, triple, cuádruple, la velocidad adquirida es dos, tres, cuatro veces mayor.

En efecto, puede compararse la fuerza continua, que es la causa del movimiento acelerado, a una serie de impulsiones iguales que se suceden a intervalos de tiempos iguales e infinitamente pequeños. Como cada una de estas impulsiones produce en cada intervalo una velocidad constante, que se agrega a la que ya poseía el móvil en el intervalo anterior, resulta que la velocidad va creciendo constantemente cantidades iguales, en tiempos iguales.

2.<sup>a</sup> *Los espacios recorridos son proporcionales a los cuadrados de los tiempos empleados en recorrerlos.* Es decir, que si se representa por 1 el camino recorrido en 1 segundo, los caminos recorridos en 2, 3, 4, 5... segundos, estarán representados por 4, 9, 16, 25..., que son los cuadrados de los primeros números.

Estas dos leyes se demuestran por medio del cálculo cuando se trate de la gravedad, se verá cómo los experimentos las comprueban.

35. Proporción existente entre las fuerzas y la aceleración de sus movimientos; cantidad de movimiento. - En la mecánica racional se demuestra, que cuando varias fuerzas constantes  $F, F', F'' \dots$ , actúan sucesivamente sobre un mismo cuerpo, le imprimen, en tiempos iguales, aceleraciones en su velocidad  $G, G', G'' \dots$ , proporcionales a dichas fuerzas; es decir, que se tiene  $F/F' = G/G' = F''/G'' = G/G'' \dots$

Merced a este principio, podremos medir las fuerzas, por las aceleraciones de velocidad que comuniquen a los móviles apreciando las fuerzas en kilogramos y las velocidades en metros; además, como se deduce de las igualdades que hemos escrito arriba que,  $F/G = F'/G' = F''/G'' \dots$  es evidente que para un mismo cuerpo, la relación entre la fuerza que le solicita y la aceleración de velocidad que le comunica, es constante cualquiera que sea la fuerza.

Esta relación constante es la que han adoptado los mecánicos para representar la masa de los cuerpos (4), y según ellos, dos cuerpos poseen una misma masa, cuando solicitados por fuerzas iguales, adquieren en tiempos iguales, aceleraciones también iguales en sus velocidades.

Representado por  $M$  y por  $m$  las masas de dos cuerpos, por  $F$  y  $f$  las fuerzas que sobre los mismos actúan y por  $V$  y  $v$  las velocidades que les comunican en tiempos iguales, tendremos, pues,  $F/V = M$ ;  $f/v = m$ ; o  $F = MV$ , y  $f = mv$ . Dividiendo entre sí los miembros de estas igualdades, tendremos:

$$F/f = MV/mv$$

El producto  $MV$  de la masa de un cuerpo por la velocidad que le anima, se denomina *cantidad de movimiento* de dicho cuerpo. Por lo tanto podremos enunciar la última igualdad que hemos consignado antes, diciendo, que dos fuerzas cualesquiera son entre sí, como las cantidades de movimiento que imprimen a dos masas diferentes. Por consiguiente, si aceptamos como unidad de fuerza la que imprimiría a la unidad de masa, la unidad de velocidad en la unidad de tiempo, es evidente que las fuerzas pueden medirse por las cantidades de movimientos que les correspondan.

Siendo las fuerzas proporcionales a las cantidades de movimiento, resulta de aquí que para una misma fuerza el producto  $MV$  es constante; es decir, que si la masa se duplica o triplica, la velocidad será dos o tres veces más pequeña. Este resultado se deduce de la última igualdad que hemos escrito arriba, haciendo  $F=f$ , lo que da,  $MV = mv$ , o  $M/m = V/v$ ; es decir, que las velocidades impresas por una misma fuerza a dos masas desiguales, se encuentran en razón inversa de dichas masas.

Si es  $V=v$ , se tiene  $F/f=M/m$ ; es decir, que dos fuerzas son entre sí, como las masas a las cuales imprimen velocidades iguales.

Los efectos producidos por el choque, dependen de la cantidad de movimiento del cuerpo chocante; y como esta cantidad es directamente proporcional a la masa y a la velocidad, resulta que con una pequeña masa, un cuerpo puede poseer, no obstante, una considerable cantidad de movimiento, si está dotado de gran velocidad: tal es el efecto de una bala de fusil. De igual manera, con una débil velocidad posee también un cuerpo enorme cantidad de movimiento, si su masa es suficientemente grande: véase si no el efecto de las manos de mortero, de los martillos, de los martinets y de las mazas que sirven para clavar estacas debajo del agua. Por último, si el cuerpo posee a la vez una gran velocidad y una masa considerable, su cantidad de movimiento alcanzará una espantosa potencia; de aquí los estragos que causan las balas de cañón y los terribles accidentes de los caminos de hierro.

En las cargas de caballería, el máximo de efecto corresponde al escuadrón que posee mayor cantidad de movimiento. En tal caso, el peso de los caballos, de los arneses, de los hombres y de las armas, tiene su efecto útil, con tal, sin embargo, de que haya mayor o menor velocidad; porque si esta última fuese nula, lo propio le sucedería a la cantidad de movimiento. También acerca de este punto ha demostrado siempre la experiencia, que la caballería compuesta de los caballos y de los hombres más macizos y más robustos, no puede sostener a pie firme el choque de la caballería ligera.

▽△

## Libro segundo

Gravedad y atracción molecular

▽△

### Capítulo primero

▽△

#### Efectos generales de la gravedad

36. Atracción universal; sus leyes. -La *atracción universal*, es una fuerza en cuya virtud, todas las partes materiales de los cuerpos tienden sin cesar las unas hacia las otras.

Considérase esta fuerza como una propiedad general inherente a la materia, pues obra sobre todos los cuerpos, ora estén en reposo, ora en movimiento. Es siempre recíproca entre ellos, y se ejerce a todas las distancias y al través de todas las materias.

La atracción universal toma el nombre de *gravitación*, cuando se ejerce entre los astros; el de *gravedad* cuando se considera la atracción de la tierra sobre los cuerpos para hacerlos caer, y el de *atracción molecular*, si se trata de la fuerza que une entre sí las moléculas de los cuerpos.

Los filósofos de la antigüedad, como Demócrito y Epicuro, habían adoptado la hipótesis de una tendencia de la materia hacia centros comunes sobre la tierra y sobre los astros.

Képlero admitió una atracción recíproca entre el sol, la tierra y los demás planetas. Bacon, Galileo y Hook reconocieron igualmente una atracción universal; pero Newton fue el primero que dedujo de las leyes de Képlero sobre el movimiento de los planetas, que la gravitación es una ley general de la naturaleza, que *su intensidad es directamente proporcional a las masas, y que está en razón inversa del cuadrado de las distancias*.

Después de Newton, la atracción de la materia por la materia ha sido demostrada experimentalmente por Cavendish, célebre químico y físico inglés, muerto a principios de este siglo. Este sabio, por medio de un aparato llamado *balanza de Cavendish*, y que no es más que una balanza de torsión, consiguió hacer sensible la atracción que una gruesa esfera de plomo ejerce sobre una esferita de cobre.

37. Gravedad. -La *gravedad* es la fuerza en virtud de la cual los cuerpos abandonados a sí mismos, *caen*, o se dirigen hacia el centro de la tierra. Esta fuerza, que no es más que un caso particular de la atracción universal, depende de la recíproca atracción que se ejerce entre la masa de la tierra y la de los cuerpos.

La gravedad, lo mismo que la gravitación universal, obra en razón inversa del cuadrado de la distancia y directa de la masa. Ella se ejerce sobre todos los cuerpos, sean cuales fueren las condiciones en que estos se encuentren; y si algunos, como las nubes y el humo, se sustraen al parecer a su influencia, elevándose en la atmósfera, ya veremos muy pronto que este hecho se relaciona con la propia gravedad.

38. Dirección de la gravedad: línea vertical y horizontal. -Cuando las moléculas de una esfera material obran por atracción, en razón inversa del cuadrado de la distancia, sobre una molécula situada fuera de esta esfera, se demuestra en mecánica racional, que la resultante de todas estas atracciones es la misma que si todas las moléculas de la esfera estuviesen reunidas en su centro. De este principio resulta, que en cada punto de la superficie del globo, la atracción de la tierra se halla dirigida hacia su centro. Con todo, el aplanamiento de la tierra en los polos, la no homogeneidad de sus partes y las desigualdades de su superficie, son otras tantas causas que pueden desviar la dirección de la gravedad, si bien en una cantidad poco sensible.

Llámase *vertical* la dirección de la gravedad, es decir, la línea recta que siguen los cuerpos al caer. Como en todos los puntos del globo convergen sensiblemente las verticales hacia el centro, su dirección cambia para cada lugar; mas para puntos poco distantes entre sí, tales como las moléculas de un mismo cuerpo o de cuerpos próximos, se consideran como rigurosamente paralelas las verticales; porque, siendo de 6.367.400 metros el radio medio de la tierra, es decir, el que corresponde a la latitud de 45 grados, son insensibles entre sí los ángulos de estas verticales. Con todo, para dos puntos distantes uno de otro, no es despreciable el ángulo, pues llega a 2° 12' entre las verticales de París y de Dunkerque, y a 7° 28' entre las de París y de Barcelona. En cuanto a la determinación del ángulo formado por las verticales de dos lugares diferentes, se consigue observando, en cada uno de estos lugares, una misma estrella, y midiendo el ángulo que el rayo visual forma con la vertical. La diferencia de los ángulos hallados es el ángulo que las dos verticales forman entre sí.

Entiéndese por *línea horizontal*, o por *plano horizontal*, una línea o un plano perpendiculares a la vertical.

39. Plomada. -La vertical en un sitio cualquiera se determina por medio de la *plomada*. Dase este nombre a un hilo del cual pende una bala de plomo ([fig. 13](#)). Estando fijo este hilo por su extremidad superior, y abandonado a sí mismo, toma naturalmente la dirección de la vertical; no tardaremos en ver, en efecto, que un cuerpo que sólo tiene un punto de apoyo, no puede estar en equilibrio, sino en tanto que su centro de gravedad y el punto de apoyo, se hallan situados en una misma vertical (43).

La plomada no puede indicar si la dirección de la gravedad en un punto es constante. En efecto, si se observase que la plomada, que era en un principio paralela a la pared de un edificio, por ejemplo, dejaba de serlo, no podría decirse si era la gravedad la que había mudado de dirección, o bien la pared la que se había inclinado. Pero cuando tratemos de las propiedades de los líquidos, veremos que su superficie no puede permanecer horizontal o *estar a nivel* mientras no sea perpendicular a la dirección de la gravedad; por consiguiente, si ésta variase, otro tanto sucedería al nivel de los mares. La estabilidad de este nivel es, pues, una prueba de que la dirección de la gravedad es constante.

La plomada, sin embargo, se desvía en la aproximación de grandes moles, como por ejemplo, cerca de una montaña. Lacondamine y Bouguer han demostrado, que la montaña llamada el Chimborazo, produce una desviación en la plomada de 7",5.

▽△

## Capítulo II

▽△

### Densidad, peso, centro de gravedad, balanzas

40. Densidad absoluta y densidad relativa. -Se entiende por *densidad* de un cuerpo su masa bajo la unidad de volumen (4). No puedo decirse cuál sea la *densidad absoluta*, es decir la cantidad real de materia que un cuerpo contiene; no se puede determinar más que, su *densidad relativa*, esto es, la cantidad de materia que contiene un cuerpo en igualdad de volumen, con relación a otro cuerpo que se toma por término de comparación. Este cuerpo, para los sólidos y los líquidos, es el agua destilada a 4° sobre 0, y para los gases es el aire. Por consiguiente, cuando se dice que la densidad del zinc es 7, se significa con esto, que bajo el mismo volumen, contiene este metal siete veces más materia que el agua.

Si representamos por V el volumen de un cuerpo, por M su masa absoluta y por D su cantidad de materia bajo la unidad de volumen, es decir, su densidad absoluta, claro está que la cantidad de materia contenida en el volumen V es D veces V; de donde  $M=VD$ . De esta igualdad se deduce  $D= M/V$ ; por lo que puede decirse también, que *la densidad de un cuerpo es la relación de su masa con su volumen*.

41. Peso. -Se distingue en todo cuerpo, el *peso absoluto*, el *peso relativo* y el *peso específico*.

El *peso absoluto* de un cuerpo, es la presión que ejerce sobre el obstáculo que se opone a su caída. Esta presión no es más que la resultante de las acciones de la gravedad sobre cada una de las moléculas del cuerpo; de donde resulta que ella es tanto mayor, cuanto más materia contiene el cuerpo; lo cual se expresa diciendo, que el peso de un cuerpo es proporcional a su masa.

El *peso relativo* de un cuerpo, es el que se determina por medio de la balanza; es la relación del peso absoluto del cuerpo con otro peso determinado, que se ha elegido por unidad. En el sistema métrico, esta unidad es el gramo. Así, cuando se encuentra que un cuerpo pesa 58 gramos, 58 es su peso relativo. Adoptando otra unidad, variaría el peso relativo, pero el absoluto quedaría el mismo.

Por último, el *peso específico* de un cuerpo es la relación de su peso relativo, bajo cierto volumen, con el de un volumen igual de agua destilada y a 4° sobre 0. Por ejemplo, si se dice que el peso específico del zinc es 7, se da a entender que, a volúmenes iguales, el zinc pesa siete veces más que el agua destilada tomada a 4°.

Siendo proporcional el peso de los cuerpos, en igualdad de volumen, a su masa, resulta que si un cuerpo contiene dos, o tres veces más materia que el agua, debe ser dos, o tres veces más pesado; por consiguiente, la relación entre los pesos, o el peso específico, debe ser la misma que la relación entre las masas, o la densidad relativa.

Por eso se consideran generalmente como equivalentes las expresiones, *densidad relativa* y *peso específico*. Sin embargo, dado caso que desapareciera la gravedad, no habría ya peso absoluto, ni peso relativo, mientras que siempre podríamos considerar las densidades. Éstas no se determinarían entonces por medio de la balanza; pero ya se ha visto (35), que la relación de las masas es la misma que la de las fuerzas que imprimirían a estas masas una misma velocidad en tiempos iguales, lo cual aun nos permitiría determinar las densidades.

Hemos visto anteriormente (35) que la masa de un cuerpo es igual a la relación constante de la fuerza que le solicita, con la aceleración de velocidad que le imprime; así pues, si representamos por P el peso de un cuerpo, es decir, la fuerza que tiende a producir su caída, por g la aceleración de velocidad que la gravedad le imprime, la cual puede tomarse como la intensidad de esta fuerza, y finalmente por M la masa del cuerpo, tendremos  $P/g=M$ , de cuya fórmula se deduce  $P=gM$ .

Esta fórmula nos manifiesta que el peso de un cuerpo es proporcional a su masa y a la intensidad de la gravedad. Reemplazando en la misma M por su valor VD (40), se tiene  $P=VDg$ . Con otro cuerpo cuyo peso, densidad y volumen fuesen P', V' y D', tendríamos igualmente  $P'=V'D'g$ . Si es  $D=D'$ , tendremos  $P/P'=V/V'(1)$ ; si es  $P=P'$ , se tendrá  $VD=V'D'$ , de donde  $V/V'=D/D'(2)$ . De la igualdad (1) se deduce, que siendo iguales las densidades, los pesos son proporcionales a los volúmenes, y de la igualdad (2), que los volúmenes están en razón inversa de las densidades.

Muy pronto se verá cuáles son los procedimientos que sirven para determinar los pesos específicos de los sólidos y de los líquidos. Por lo que toca a los gases, sus pesos específicos se aprecian con relación al aire, y exigen para su cálculo nociones acerca del calor, que veremos más adelante.

42. Centro de gravedad, su determinación experimental. -El *centro de gravedad* de un cuerpo, es un punto por el cual pasa constantemente la resultante de las acciones de la gravedad sobre las moléculas de este cuerpo, en todas sus posiciones.

Todo cuerpo tiene un centro único de gravedad. En efecto, sea una masa cualquiera ([fig. 14](#)), y  $m, m', m'', m'''$ ... sus moléculas. Solicitadas todas por la gravedad en direcciones verticales, producen un sistema de fuerzas paralelas, cuya resultante se obtiene, buscando primero las de las fuerzas que solicitan dos moléculas cualesquiera  $m$  y  $m'$  (28), luego la resultante de la fuerza así obtenida y de la que solicita una tercera molécula  $m''$ , y así sucesivamente, hasta que se llegue a una resultante final P, aplicada en G y que represente el peso del cuerpo. Si se da al cuerpo otra posición, conforme lo indica la [figura 15](#), solicitadas aun las moléculas  $m, m', m''$ ..., por las mismas fuerzas que cuando el cuerpo se encontraba en la posición que representa la figura 14, la resultante de las fuerzas que solicitan a  $m$  y  $m'$ , continúa pasando por  $o$ ; la resultante siguiente por  $o'$ , y así sucesivamente, hasta la resultante P, que pasa también por G, en donde corta la dirección GP', que tenía la misma resultante en la primera posición. Como sucede lo propio en todas las posiciones que se den al cuerpo, el punto G, por donde pasa constantemente la dirección del peso, es el centro de gravedad.

La investigación del centro de gravedad de un cuerpo cualquiera, pertenece al dominio de la geometría; pero en muchos casos se puede determinar inmediatamente. Por ejemplo, en una línea recta homogénea, el centro de gravedad se encuentra en medio de la recta; el de un círculo, en su centro, lo mismo que el de una esfera; y en los cilindros, en medio del eje. En estática se patentiza que en un triángulo, el centro de gravedad se halla en la línea que une uno de los vértices con el medio del lado opuesto, y en los dos tercios de esta línea, a partir del vértice. En las pirámides se encuentra sobre la recta que enlaza el vértice con el cuerpo de gravedad de la base, a los tres cuartos de dicha recta a contar del vértice, aconteciendo lo mismo en los conos.

En muchos casos se puede determinar el centro de gravedad por medio de la experiencia. Suspéndese para esto sucesivamente el cuerpo de un cordón, en dos distintas posiciones, conforme lo demuestran las [figuras 16 y 17](#); luego se busca el punto en el cual el cordón CD, en la segunda posición, corta la dirección AB que tenía en la primera, y este punto es el centro de gravedad. En efecto, como en cada posición no puede establecerse el equilibrio sino en tanto que viene a situarse el centro de gravedad debajo del punto de suspensión del cordón y en su misma dirección (43), es claro que el centro de gravedad debe hallarse colocado a la vez en las dos direcciones del cordón, y por lo mismo, en su punto de intersección.

En los cuerpos de forma y de homogeneidad invariables, es constante la posición del centro de gravedad; pero en el caso contrario varía la posición de dicho punto. Esto es lo que acontece con los animales, que dan al centro de gravedad posiciones diversas, según sus actitudes.

43. Equilibrio de los cuerpos pesados. -Reducida la acción de la gravedad a una fuerza única, vertical, dirigida de arriba hacia abajo, y aplicada al centro de gravedad, basta para que haya equilibrio, que quede destruida esta fuerza por la resistencia de un punto fijo por donde aquélla pase.

Preséntanse aquí dos casos, según esté sostenido el cuerpo pesado por un solo punto de apoyo, o por varios de éstos. En el primer caso, el centro de gravedad debe coincidir con el punto de apoyo, o ha de encontrarse en la vertical que pasa por este punto. En el segundo, basta que la vertical tirada por el centro de gravedad pase por el interior de la *base*, es decir, del polígono que se obtiene, uniendo entre sí los puntos de apoyo.

En las torres de Pisa y de Bolonia, sumamente inclinadas respecto al horizonte, y que al parecer amenazan con su caída a los transeúntes, persiste el equilibrio, porque el centro de gravedad se encuentra en una vertical que pasa por el interior de la base.

Un hombre se halla tanto más firme sobre sus pies, cuanto mayor es la base que éstos le ofrecen, porque puede dar entonces más amplitud a sus movimientos, sin que salga de dicha base la vertical tirada por su centro de gravedad. Si no se apoya más que sobre un pie; la base disminuye; y más todavía cuando se levanta sobre la punta del mismo. En tal posición, bastaría un débil balanceo para que el centro de gravedad saliera de la base, cesando el equilibrio.

44. Diversos estados de equilibrio. -Atendiendo a la posición del centro de gravedad relativamente al punto de apoyo, se presentan tres estados de equilibrio, a saber: el *estable*, el *inestable* y el *indiferente*.

El *equilibrio estable* es el estado de un cuerpo que, desviado de su posición de equilibrio, la recobra por sí mismo, tan luego como a ello no se opone obstáculo alguno. Obsérvase este estado, siempre que un cuerpo tiene una posición tal, que su centro de gravedad se halla más bajo que en cualquiera de las demás posiciones que puede tomar. Variando la situación del cuerpo, su centro de gravedad no puede menos de subir, y como de continuo tiende a bajarle la gravedad, ésta lo vuelve, después de una serie de oscilaciones, a su posición primera, restableciéndose el equilibrio. Tal es el caso de un péndulo, o el de un huevo sobre un plano horizontal, cuando su eje mayor es sensiblemente paralelo a este plano.

Como ejemplo de equilibrio estable se construyen unas figuritas de marfil, que se mantienen sobre un pie cargándolas con dos esferas de plomo situadas bastante bajas para que, en todas las posiciones, el centro de gravedad  $g$  de las esferas y de la figurita se encuentre en situación inferior al punto de apoyo ([figura 18](#)).

El *equilibrio inestable* es el estado de un cuerpo que, desviado de su posición de equilibrio, tiende a separarse más y más de ella. Preséntase este estado siempre que un cuerpo tiene una posición tal, que su centro de gravedad está más alto que en cualquiera otra posición, porque bajando mediante una desviación cualquiera el centro de gravedad, ésta sólo tiende a hacerle bajar más y más. Tal es el caso de un huevo que se apoya sobre un plano horizontal, suponiendo que sea vertical su eje mayor; y tal es también el de un bastón que procuramos mantener vertical y en equilibrio, sobre la punta de un dedo.

Por fin, llámase *equilibrio indiferente* el que persiste en todas las posiciones que toma el cuerpo. Esta clase de equilibrio se observa siempre que, en las diversas posiciones del cuerpo, no sube ni baja su centro de gravedad, conforme acontece en una rueda de carruaje sostenida por su eje, o en una esfera que se apoya sobre un plano horizontal.

La [figura 19](#) representa tres conos, A, B, C, colocados respectivamente en las posiciones de equilibrio estable, inestable e indiferente. En las tres, la letra  $g$ , designa la posición del centro de gravedad.

45. Palancas. -Antes de dar a conocer la teoría de las balanzas, recordaremos otra, que corresponde al curso de mecánica, esto es, la de la palanca, sin la cual no podría comprenderse cuanto expondremos respecto a las balanzas.

Dase el nombre de *palanca* a toda barra AB ([fig. 20](#)), recta o curva, que se apoya sobre un punto fijo *c*, a cuyo alrededor tienden a hacerla girar en sentido contrario, dos fuerzas paralelas o concurrentes. Una de estas fuerzas, la que actúa como motor, es la *potencia*, y la otra es la *resistencia*. Atendida la posición del punto de apoyo respecto de los puntos de aplicación de la potencia y de la resistencia, se distinguen tres géneros de palancas, a saber: 1.º la *palanca de primer género*, cuando el punto de apoyo se halla situado entre la potencia y la resistencia; 2.º la *palanca de segundo género*, cuando la resistencia está entre el punto de apoyo y la potencia, y 3.º la *palanca de tercer género*, citando la potencia se encuentra entre el punto de apoyo y la resistencia.

En los tres géneros de palancas, las distancias respectivas de la potencia y de la resistencia al punto de apoyo, se llaman *brazos de palanca*. Si ésta es recta y perpendicular a las direcciones de dichas dos fuerzas, como en la figura 20, las dos partes *Ac* y *Bc* de la palanca son sus brazos; pero si se halla inclinada relativamente a la dirección de las fuerzas ([fig. 21](#)), los brazos de palanca son las perpendiculares *ca* y *cb*, bajadas desde el punto fijo, sobre aquellas direcciones.

Sentado esto, se demuestra en mecánica que una fuerza que tiende a hacer girar una palanca alrededor de su punto de apoyo, produce tanto mayor efecto, cuanto más lejos pasa su dirección de dicho punto de apoyo, o lo que es lo mismo, cuanto mayor es el brazo de palanca sobre que actúa. Dedúcese de aquí, que cuando la potencia y la resistencia tienen igual intensidad, y obran sobre brazos iguales de palanca, producen el mismo efecto, aunque en sentido contrario, equilibrándose desde aquel momento; pero si actúan sobre brazos desiguales de palanca, y si, por ejemplo, el de la potencia es dos, tres veces mayor que el de la resistencia, claro está que los efectos no serán iguales sino en el supuesto de que la potencia sea dos, tres veces menor que la resistencia, lo cual se expresa diciendo que *para que dos fuerzas se equilibren por medio de una palanca, sus intensidades han de estar en razón inversa de los brazos de palanca a que se aplican*.

Expuestas estas nociones, pasemos a la teoría de las balanzas.

46. Balanzas. -Llámanse *balanzas* los aparatos que sirven para medir el peso relativo de los cuerpos. Se construyen de muchas especies.

La balanza ordinaria ([fig. 22](#)) consiste en una palanca de primer género, llamada *cruz de la balanza*, cuyo punto de apoyo se halla en su mitad; a las dos extremidades de la cruz están suspendidos los *platinillos*, sostenidos por cordones o cadenas, y destinados a recibir, uno, los objetos que se quieren pesar, y el otro, las pesas. La cruz se halla atravesada, en su parte media, por un prisma de acero *a*, que se llama *cuchilla*, y que descansa, por un corte agudo, sobre una *chapa* de ágata o acero bruñido, para disminuir el rozamiento. Por último, en la cruz hay fija una aguja o fiel, que oscila delante de un arco graduado *n*; cuando la cruz está bien horizontal, el fiel corresponde al cero de la graduación.

Como se ha visto anteriormente (45), que dos fuerzas iguales no pueden equilibrarse, en la palanca de primer género, sino cuando actúan sobre brazos de palanca iguales, es

menester que la longitud de los brazos de palanca  $a_A$  y  $a_B$  no cambie mientras dure la pesada. Para conseguir este resultado, se tiene cuidado de suspender los platillos de un ganchito cuya parte curva termina en arista fina, y se hace descansar este ganchito sobre una arista semejante que termina también los dos brazos de la cruz. De esta manera los platillos se encuentran sostenidos por un solo punto, y este queda siempre invariable a pesar de las oscilaciones de la balanza. Éste es el género de suspensión que hemos representado en la figura adjunta.

47. Condiciones a que debe satisfacer una balanza. -Una balanza, para dar pesadas exactas, debe satisfacer a las condiciones siguientes:

1.<sup>a</sup> *Los dos brazos de la cruz deben ser rigurosamente iguales*; de lo contrario, según la teoría de la palanca, serían necesarios, en los platillos, pesos desiguales para equilibrarse. Para reconocer si los dos brazos de palanca son iguales, se colocan pesos en los dos platillos, de manera que la cruz acepte una posición horizontal. Trasponiendo entonces los pesos de cada platillo en el otro, aquélla quedará horizontal, si los brazos son iguales, porque, en este caso, los pesos también lo son; de lo contrario, se inclinará hacia el lado del brazo más largo.

2.<sup>a</sup> *La balanza debe permanecer en equilibrio cuando los platillos están vacíos*; porque, de no ser así, sería necesario poner pesos desiguales en los dos platillos para obtener el equilibrio. Sin embargo, no debe admitirse que los brazos son iguales por el solo hecho de que, estando vacíos los platillos, la cruz quede horizontal; pues bastaría dar al brazo más largo un platillo más ligero para que así sucediese.

3.<sup>a</sup> *Estando horizontal la cruz, su centro de gravedad debe hallarse en la vertical que pase por la arista de la cuchilla y algo inferior a dicha arista*; de lo contrario, no podría tomar un estado de equilibrio estable (44). En efecto, si el centro de gravedad correspondiese a la arista de la cuchilla, se encontraría la balanza en el estado de equilibrio indiferente (44); y si estuviera más alto, el equilibrio sería inestable, diciéndose entonces que es *loca* la balanza.

En los cursos de física se ponen en evidencia los tres casos que presenta la posición del centro de gravedad con relación a la cuchilla, por medio de una cruz en la que puede subir o bajar la cuchilla, sirviendo para el intento un tornillo  $a$  que gira en una tuerca abierta en el mismo cuerpo de la cuchilla (fig. 23). Cuando se halla esta en la parte más alta de la muesca  $c$ , en la cual sube y baja, se encuentra debajo de su arista el centro de gravedad, y la cruz permanece en equilibrio estable, y oscila libremente sobre los puntos de apoyo que sostienen a la cuchilla. Pero, luego que, dando vueltas al tornillo, se baja lentamente la cuchilla, llega un momento en que coincide su arista con el centro de gravedad de la cruz, y en tal caso no oscila ya ésta, conservando el equilibrio sea cual fuere la posición que se le dé. Por último, si continúa bajándose la cuchilla, el centro de gravedad pasa por encima de los puntos de apoyo, y desde entonces la balanza es loca.

48. Condiciones de sensibilidad. -Se dice que una balanza es sensible, cuando su cruz oscila fácilmente por una pequeñísima diferencia de pesos en los dos platillos: si no oscila más que por una diferencia algo considerable, la balanza se denomina *perezosa*.

Muchas son las causas que concurren a la sensibilidad de una balanza, pero en general es tanto mayor: 1.º cuanto más débil es el roce de la cuchilla sobre sus puntos de apoyo;

y por eso se procura que descansa sobre dos chapas de ágata o de acero bien templado; 2.º cuanto más ligera es la cruz y menos cargados están los platillos, porque entonces disminuye el rozamiento; 3.º cuanto más largos son los brazos de aquélla, porque la diferencia de peso que determina la oscilación, actúa sobre un brazo mayor de palanca; 4.º cuanto más larga es la aguja que marca las oscilaciones, porque éstas se hacen más visibles, y 5.º cuanto más cerca de su arista se encuentra el centro de gravedad de la cruz, sin dejar de hallarse por esto debajo de la cuchilla.

Para darse cuenta de esta última condición, basta considerar la [figura 24](#), en la cual el centro de gravedad  $g$  se halla muy inferior a la arista  $n$  de la cuchilla. En tal caso, cuando oscila la cruz, conforme lo indica la [fig. 25](#), como la fuerza aplicada en  $g$  pasa lejos del punto de apoyo  $n$ , ejerce, por lo dicho más arriba acerca de la palanca (45), un efecto tanto más poderoso para oponerse a las oscilaciones, cuanto mayor es la distancia  $on$ . Por el contrario, si la distancia  $gn$  es pequeña, le sucede lo propio a la  $on$ , y la fuerza  $p$ , que obra sobre un brazo menor de palanca, no opone más que una débil resistencia a las oscilaciones de la cruz.

Existe todavía una condición que contribuye a la sensibilidad de la balanza, cual es la posición relativamente a la cuchilla central, de las dos cuchillas extremas que sostienen los platillos. La recta que une las aristas de estas dos últimas, debe cortar la del primero, según lo indica la [fig. 28](#). En efecto, representando los pesos de los platillos que cargan sobre las cuchillas  $m$  y  $n$ , dos fuerzas iguales y paralelas, la resultante de éstas se encuentra aplicada en el punto  $o$ , que es la parte media de  $mn$  (28). Ahora bien; si la arista de la cuchilla central se halla encima de la recta  $mn$  ([fig. 26](#)), otro tanto le pasará en general al centro de gravedad de la cruz; porque este punto debe estar siempre muy cerca de la arista de la cuchilla. De consiguiente, componiéndose la fuerza aplicada en  $g$  con la aplicada en  $o$ , la fuerza única resultante tiene su punto de aplicación entre  $o$  y  $g$ , es decir debajo de este último punto, y por lo tanto, más lejos del de apoyo; de donde se deduce que tiende más y más, a oponerse a las oscilaciones de la cruz. Si la línea  $mn$  pasa por encima de la arista de la cuchilla, como en la [fig. 27](#), las dos fuerzas aplicadas en  $o$  y en  $g$  se reducen también a una fuerza única cuyo punto de aplicación se encuentra situado entre  $o$  y  $g$ . Pero, en este caso, pudiendo pasar por encima del punto de apoyo el de aplicación de esta resultante, tiende la balanza a quedar loca. Últimamente, si las tres aristas de las cuchillas están en línea recta ([fig. 28](#)), como la resultante de las fuerzas aplicadas en  $o$  y en  $g$  pasa entre estos dos puntos, el suyo de aplicación está más cerca de la cuchilla que el  $g$ , y por lo mismo oscila la balanza con más facilidad. Esta última disposición es, pues, la mejor.

49. Balanza de precisión. -La balanza representada en la [figura 22](#) es la que se emplea en el comercio, al cual ofrece bastante precisión; pero en física, y sobre todo en química, para las análisis se debe hacer uso de balanzas más exactas.

La [figura 29](#) representa una balanza de precisión construida por M. Deleuil, y sensible hasta tal punto, que se inclina por un exceso de peso de un miligramo, aunque esté cargada de un kilogramo en cada platillo.

Para preservar a esta balanza de los movimientos del aire, se la cubre con una especie de fanal de cristal, que la defiende a la vez del polvo y de la humedad. La cara anterior de dicho fanal puede elevarse para introducir los objetos que quieran pesarse.

A fin de no cansar el corte de la cuchilla mientras no funciona la balanza, se levanta la cruz por medio de una pieza móvil llamada *horquilla*. Con objeto de que se comprenda su mecanismo, principiemos por observar que la pieza AA está fija, lo mismo que los dos vástagos verticales que se notan en sus extremidades. Dos piezas DD, adaptadas a la cruz, reciben el esfuerzo de la horquilla. Ésta consiste en una barra *aa*, que lleva fijos dos travesaños horizontales EE, que suben con la horquilla y van a levantar las dos piezas DD, y con ellas la cruz. Guían a la horquilla en su movimiento los vástagos AA que la atraviesan a rozamiento suave en sus extremidades. Por lo que toca al movimiento de la horquilla, se obtiene por medio de un botón O, que se hace correr con la mano y que trasmite su movimiento a un tornillo situado en el interior de la columna. Este tornillo es el que, al girar, levanta la horquilla, y con ella las dos piezas EE, las cuales a su vez alzan la cruz BB.

Se juzga de la horizontalidad de la cruz por medio de una larga aguja que se halla fija por su parte superior, y cuya extremidad inferior corresponde a un arco de círculo graduado, que se encuentra colocado en el pie de la balanza.

Finalmente, un tornillo terminado en forma de botón C, dispuesto sobre la cruz, sirve para aumentar la sensibilidad de la balanza: ascendiendo este tornillo, se eleva el centro de gravedad de aquélla, lo cual, según se ha visto anteriormente (48), hace más sensible la balanza.

\*50. Balanzas de suspensión inferior. -En las balanzas ya descritas, los puntos de suspensión están sobre los platillos. Pero hace algunos años que se fabrican balanzas cuyos puntos de suspensión se hallan debajo, y el uso las va generalizando cada vez más en el comercio. Estas balanzas, representadas en la [fig. 30](#), son de hermosa forma: no embarazan los mostradores como las balanzas de columna, y sobre todo son cómodas para pesar objetos voluminosos, lo cual no puede hacerse sin dificultad con las balanzas ordinarias, a causa de los cordones o cadenas que sostienen los platillos. Sin embargo, las balanzas de suspensión inferior no son balanzas de precisión; tienen demasiado rozamiento para este objeto; pero pueden dar pesadas con la aproximación de algunas decigramas, lo cual es suficiente para el comercio.

Las primeras balanzas de suspensión inferior aparecieron bajo el nombre de *balanzas inglesas*, y también con la denominación de *balanzas de Roberval*, porque eran, en efecto, una aplicación de un principio de las palancas dado por este geómetra, profesor de matemáticas en París, en el siglo XVII. La balanza que vamos a describir ([fig. 30](#) y [31](#)) es una combinación de la balanza de Roberval y de la de Quintenz, debida a Béranger, fabricante de Lyon. Su construcción está basada: 1.º en que el movimiento de los platillos se verifique exactamente en línea recta; 2.º en que el estado de equilibrio de la balanza sea independiente de la posición de la carga de los platillos, condición que existe teóricamente en la balanza de Roberval, pero que no se consigue rigurosamente en la práctica, a causa de los rozamientos.

El mecanismo adoptado por M. Béranger se compone, para cada platillo, de tres palancas, AB, EF y DC ([fig. 31](#)). La palanca DC, que sostiene al platillo P, se baja o eleva al mismo tiempo, de cantidades iguales en sus dos extremos, cuando la extremidad B baja o sube, como fácilmente se comprende por la sola inspección de la figura. Esta palanca DC se mueve, pues, paralelamente a sí misma, y por consiguiente, la varilla permanece siempre en la posición vertical. En cuanto a la posición de la carga

en los platillos, no tiene la misma influencia que en la balanza de Roberval, por efecto de la combinación de las tres palancas. No obstante, es preferible en toda balanza, colocar la carga hacia el medio de los platillos. Dos varillas curvas  $m$  y  $n$ , fijas a la palanca horizontal DC, suben y bajan con ella, y se colocan frente una de otra, cuando la balanza está en equilibrio.

51. Método de dobles pesadas. -A Borda, físico francés, muerto en París en 1799, somos deudores de un procedimiento para obtener pesadas exactas con una balanza de brazos desiguales. Para esto se pone el cuerpo que se quiere pesar en uno de los platillos, y se le equilibra en el otro con granalla de plomo o con arena; se quita luego del primer platillo el cuerpo que se pesa, y se le reemplaza por gramos y subdivisiones de gramo, hasta que se restablezca el equilibrio. El peso así obtenido es exactamente el del cuerpo; porque en esta doble pesada, el cuerpo y los gramos obran sucesivamente sobre el mismo brazo de la cruz para equilibrar una misma resistencia.

Puede determinarse igualmente el peso de un cuerpo con precisión por un método que consiste, en pesar dos veces el cuerpo, situándolo sucesivamente en cada uno de los platillos, lo que viene a ser una doble pesada, y deduciendo después por medio del cálculo el peso que se busca, de los dos resultados obtenidos.

En efecto, habiendo situado el cuerpo que ha de pesarse en uno de los platillos, y en el otro los gramos hasta que exista el equilibrio, representemos por  $x$  el peso que se busca, por  $p$  el número de gramos que han de equilibrarle y por  $a$  y  $b$  las longitudes de los brazos de palanca, que correspondan respectivamente a los pesos  $x$  y  $p$ . Según el principio del equilibrio de la palanca que hemos consignado antes (45), tenemos  $x/p=b/a$  de donde  $ax=bp$  (1). Si representamos igualmente por  $p'$  el número de gramos que equilibran al cuerpo después de haberlo cambiado de platillo, tendremos  $bx=ap'$  (2). Multiplicando los miembros de cada una de las igualdades (1) y (2) y suprimiendo el factor común  $ab$  tendremos

$$x^2=pp', \text{ de donde } x=\sqrt{pp'}$$

Resultado que nos manifiesta, que el *peso que se buscaba es un medio proporcional entre los dos pesos  $p$  y  $p'$* .

Como nunca son perfectamente iguales los dos brazos de una balanza, en las pesadas de precisión, debe usarse uno u otro de los dos métodos que hemos descrito. Digamos, sin embargo, que esto no es suficiente para obtener rigurosamente el peso de un cuerpo. En efecto, no tardaremos en ver que todos los cuerpos que se pesan en el aire, pierden una parte de su peso, igual al peso del aire que desalojan, resultando de aquí que los pesos que procuran las balanzas, son aparentes y menores que los pesos reales. Veremos más adelante, después de habernos ocupado de las dilataciones de los vapores, como puede deducirse por medio del cálculo, el peso real del peso aparente.

▽△

## Capítulo III

## Leyes de la caída de los cuerpos, intensidad de la gravedad, péndulo

52. Leyes de la caída de los cuerpos. -Despreciando la resistencia del aire, es decir, suponiendo que los cuerpos caen en el vacío, el descenso de éstos, presenta las tres leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> LEY.- *Todos los cuerpos, en el vacío, caen con igual velocidad.* -Esta ley se demuestra experimentalmente por medio de un tubo de vidrio de unos dos metros de longitud, cerrado por una de sus extremidades, y terminado en la otra por una llave de cobre. Introdúcense en él, cuerpos de diferentes densidades; por ejemplo, plomo, corcho, papel, y se hace luego el vacío con la máquina neumática. Volviendo en seguida bruscamente el tubo, se ve que todos los cuerpos que contiene caen con igual velocidad (fig. 32). Pero si, después de haber dejado entrar un poco de aire, se invierte de nuevo el tubo, se nota un débil retraso para los cuerpos más ligeros, retraso que es muy sensible cuando se ha dejado entrar todo el aire que el tubo puede admitir. Dedúcese de esto que, si en las condiciones ordinarias, caen con desigual rapidez los cuerpos, proviene únicamente de la resistencia del aire, y no de que se ejerza la gravedad de un modo más intenso en unas sustancias que en otras. Un cuerpo que posee doble masa que otro, es realmente atraído hacia la tierra por una fuerza dupla; pero como esta fuerza dupla ha de poner en movimiento una cantidad doble de materia, claro está (35) que sólo puede comunicarle el mismo grado de velocidad que recibe el otro cuerpo de una fuerza dos veces menor.

La resistencia que opone el aire a la caída de los cuerpos es sobre todo sensible en los líquidos. En el aire se dividen y caen bajo la forma de gotitas, siendo así que en el vacío bajan sin dividirse, conforme lo haría una masa sólida. Este fenómeno se demuestra con el *martillo de agua*. Tal es el nombre que se da a un tubo de vidrio un poco grueso, de 30 a 40 centímetros de largo, lleno de agua hasta la mitad, y cerrado a la lámpara, después de expulsado el aire por la ebullición. Al dar una vuelta brusca a este tubo, el agua, al caer, hiere la extremidad inferior, produciendo un sonido seco, cual si fuera resultado del choque de dos cuerpos sólidos.

2.<sup>a</sup> LEY. -*Los espacios recorridos por un cuerpo que, partiendo del estado de reposo, cae en el vacío, son proporcionales a los cuadrados de los tiempos que tarda en recorrerlos.* En otros términos, en tiempos representados por 1, 2, 3, 4..., los espacios recorridos lo están respectivamente por 1, 4, 9, 16,...

3.<sup>a</sup> LEY. -*La velocidad adquirida por un cuerpo que cae en el vacío, es proporcional al tiempo que emplea en su descenso.* Es decir, que trascurrido un tiempo, dos, tres, cuatro veces mayor, la velocidad adquirida es a la vez, dos, tres, cuatro veces mayor.

*Consecuencia.* -Supuesto que, en virtud de la segunda ley, siendo 1 el espacio recorrido en el primer segundo, los espacios recorridos en 2, 3, 4, 5..., segundos son 4, 9, 16, 25..., es claro que el espacio que recorre en el segundo segundo es 4 menos 1, o sea 3; en el tercer segundo es 9 menos 4, o sea 5; en el cuarto, 16 menos 9, o sea 7, así sucesivamente; es decir, que los espacios recorridos sucesivamente en primero, segundo, tercero, cuarto... segundos, son entre sí como la serie natural de los números impares 1, 3, 5, 7... Dedúcese de aquí, que los espacios recorridos crecen en tiempos

iguales, cantidades también iguales, lo cual está acorde con la definición que más arriba hemos dado del movimiento uniformemente acelerado (33).

Las leyes de la caída de los cuerpos no son verdaderas más que en el vacío y para alturas de poca consideración; pues en el aire se modifican en atención a las resistencias que aquéllos encuentran; además de que, según veremos muy pronto, la intensidad de la gravedad no es rigurosamente la misma para alturas atmosféricas desiguales (56).

Galileo fue quien, a fines del siglo XVI, descubrió las leyes de la gravedad, dándolas a conocer en la cátedra de matemáticas que desempeñaba en la universidad de Pisa.

55. Plano inclinado. -Muchos son los aparatos que se han ideado para demostrar las leyes de, la caída de los cuerpos, y entre ellos citaremos el *plano inclinado*, la *máquina de Atwood* y el *cilindro giratorio* de M. Morin. En los dos primeros es bastante lento el movimiento, por lo cual puede despreciarse la resistencia del aire.

*Plano inclinado* es todo plano que forma con el horizonte un ángulo menor que un recto. Cuanto más agudo es este ángulo, tanto más débil es la velocidad de un cuerpo que desciende a lo largo del plano inclinado. En efecto, representemos por AB (fig. 33) la sección de un plano inclinado, por AC la de un plano horizontal, y por BC una perpendicular bajada de un punto B del plano inclinado al horizontal. El peso P de un cuerpo cualquiera M que se apoya sobre el plano inclinado, puede descomponerse en dos fuerzas Q y F, perpendicular la una y paralela la otra al mismo plano. La primera se destruye por la resistencia de éste, y la segunda fuerza F será la única que obre sobre la masa M para hacerla descender. Para calcular el valor de F, se marca en GP una longitud GH que represente el peso P, terminando luego el paralelogramo DGEB (29), y en tal caso DG es el valor de la fuerza F. Siendo semejantes los triángulos DGH y ABC, por tener iguales los ángulos, se obtiene

$$DG/GH=BC/AB, \text{ o } F/P=BC/AB.$$

De esta última igualdad resulta, que la fuerza F es tantas veces menor con relación a P, cuanto más corta es la altura BC del plano inclinado, respecto de su longitud AB. Podemos hacer pues, tan pequeña como queramos la fuerza F, y amortiguar el movimiento de la masa M, de manera que sea posible contar sobre el plano inclinado los caminos recorridos en uno, dos, tres..., segundos; y esto sin alterar las leyes del movimiento, porque la fuerza F es continua y constante. Practicando estas operaciones, llegó a descubrir Galileo que los espacios recorridos, crecen como los cuadrados de los tiempos.

54. Máquina de Atwood. -Las leyes del descenso de los cuerpos se demuestran también por medio de la *máquina de Atwood* así llamada por aplicarle el apellido de su inventor, que era catedrático de química en Cambridge, a fines del siglo pasado. Esta máquina se compone de una columna de madera (fig. 34), de unos 2<sup>m</sup>,30, de altura. En su parte superior, debajo de un fanal de vidrio, existe una polea de latón, en la cual se enrolla un hilo de seda suficientemente fino, a fin de que pueda despreciarse su peso, el cual sostiene en sus extremos dos pesos iguales M y M'. El eje de la polea, en vez de descansar sobre dos cojinetes o almohadillas fijas, se apoya sobre las convexidades cruzadas de cuatro ruedas móviles. En virtud de esta disposición, el rozamiento del eje de la polea, que trasmite su movimiento a las cuatro ruedas, es de rotación, que es mucho más suave que el que resulta cuando un cuerpo resbala sobre otro.

En la columna se halla fijo un movimiento de relojería H, regularizado por un péndulo de segundos P, merced a un escape de áncora. Este último, se halla representado en el cuadrante encima de la rueda de encuentro que ocupa el centro. Dicho escape oscila con el péndulo y al inclinarse, ora a derecha, ora a izquierda, da paso a cada oscilación, a un diente de la rueda de encuentro. El eje de ésta, lleva en su extremidad anterior, una

aguja que marca los segundos, y en la posterior, detrás del cuadrante, un excéntrico figurado en E a la izquierda de la columna. Este excéntrico, que gira al mismo tiempo que la aguja, se apoya sobre una palanca D, que al moverla hace vascular, un platillo  $i$ , sostenido por dicha palanca y destinado a su vez, a sostener la masa M.

En fin, paralelamente a la columna existe una escala de madera, Q, dividida en centímetros, con objeto de medir los espacios que recorren los cuerpos al caer. En dicha escala se encuentran dos *topes*, o sean dos piezas móviles que, por medio de un tornillo, se pueden fijar a la altura que se quiera. Representamos estos topes en diferentes posiciones, a la derecha de la máquina, en A, A', B, C, B', y C'. Uno de ellos tiene la forma de un platillo, y sirve para detener la masa M; el otro, que es anular, permite que le atravesase esta masa, pero no un pequeño peso adicional que sobre ella se coloca, y que consiste en una lámina de latón más larga que el diámetro del anillo.

La máquina de Atwood sirve para disminuir la velocidad del descenso de los cuerpos, y para sustituir un movimiento uniforme a otro acelerado, cuando así convenga.

A fin de que pueda preciarse cómo retarda el movimiento esta máquina, supongamos que la plaquita de latón  $m$ , que en nuestro dibujo está figurada en  $m$ , en  $m'$ , y en  $m''$ , cae sola, y representemos por  $g$  su velocidad al cabo de un segundo; su cantidad de movimiento será  $mg$  (35). Si colocamos esta placa  $m$  sobre la masa M, no podrá ya caer sino comunicando parte de su velocidad a las dos masas M y M'. Efectivamente, haciéndose equilibrio estas dos masas, queda en ellas sin efecto la gravedad; por lo tanto, la misma fuerza que hacía caer al peso  $m$ , cuando estaba solo será la que mueva ahora a este peso y a las dos masas M y M'. La cantidad de movimiento será, pues, la misma (35). Ahora bien; si se representa por  $x$  la velocidad al cabo de un segundo, la cantidad de movimiento será  $(m+2M)x$ , igualándola con la que adquiere el peso  $m$  cuando cae solo, se tiene  $(m+2M)x=gm$ , de donde  $x=gm/m+2M$ . Si se supone, por ejemplo, que las masas M y M' valgan cada una 16, siendo 1 la masa  $m$ , se encuentra  $x=g/33$ ; es decir, que la velocidad será 33 veces menor que si cayese el cuerpo libremente en la atmósfera, lo cual es suficiente para que se pueda observar al cuerpo en su caída, y para que sea apenas sensible la resistencia el aire.

Conocidas ya las diversas piezas de la máquina, pasemos al experimento, y propongámonos demostrar primero, que los espacios recorridos crecen como los cuadrados de los tiempos. Para esto, parado el péndulo P, y sin que marque cero la aguja del cuadrante, se coloca el peso adicional  $m$  sobre la masa M, y así cargada ésta, se la coloca sobre el platillo  $i$ , mantenido horizontalmente por la extremidad de la palanca D, que corresponde al cero de la escala. No sirviéndonos por de pronto más que del tope lleno, se le fija por tanteo a una distancia tal del cero de la escala, que las dos masas  $m$  y M tarden un segundo en caer de O a A, descenso que principia en el momento en que, entrando en oscilación el péndulo, llega la aguja al cero del cuadrante; porque en este punto es expulsada la palanca D por el excéntrico y se inclina el platillo  $i$ .

Admitamos que se haya encontrado de esta suerte que la altura de descenso en un segundo es 7. Se principia entonces de nuevo el experimento del mismo modo, pero bajando el tope a una distancia O'A' cuatro veces mayor que OA, es decir, a la vigésimo octava división de la escala, y se observa que este espacio es recorrido exactamente en dos segundos por las masas  $m$  y M. De igual manera se encuentra que una altura nueve veces mayor, o de 63 divisiones, es recorrida en tres segundos, y así sucesivamente. Queda, por lo tanto, comprobada la segunda ley.

Para cerciorarse de la tercera, recuérdese que en el movimiento acelerado se entiende por velocidad, en un momento dado, la del movimiento uniforme que sucede al

acelerado (34). De consiguiente, para comprobar la ley que sigue en su variación la velocidad de un cuerpo al caer, basta medir la velocidad del movimiento uniforme que reemplaza sucesivamente al acelerado, después de uno, dos, tres..., segundos de descenso.

La sustitución del movimiento uniforme al acelerado, se obtiene por medio del tope anular B. Para esto se principia colocando el último a una distancia tal, que las dos masas  $m$  y  $M$  reunidas empleen en llegar a B un segundo, como en el primer experimento: detenida entonces la masa adicional  $m$  por el anillo B, y continuando sola su descenso la masa  $M$ , se coloca el platillo en C, debajo de B, mediando un intervalo conveniente para que la masa  $M$  tarde un segundo en pasar de uno a otro tope. De  $O''$  a B el movimiento es uniformemente acelerado, y de B a C es uniforme; porque, detenido el peso  $m$  por el anillo B, ya no obra la gravedad desde B a C, y el movimiento sólo continúa en virtud de la inercia. El número de las divisiones de la escala recorridas por la masa  $M$ , de uno a otro tope, representa, pues, la velocidad adquirida por las dos masas  $m$  y  $M$  al cabo de un segundo (34).

Principiando entonces de nuevo el experimento, se baja el anillo B a  $B'$ , o sea a una distancia tal, que las dos masas  $M$  y  $m$  tarden dos segundos en caer de  $O''$  a  $B'$ , y luego se fija el segundo tope  $C'$  a una distancia del primero doble de la que los separaba en un principio, es decir, doble de BC. Al caer las dos masas durante dos segundos, con movimiento uniformemente acelerado, del punto  $O'''$  al  $B'$ , se encuentra que la masa  $M$  recorre sola en un segundo el intervalo  $B'C'$  que separa los dos topes. La velocidad adquirida al cabo de dos segundos es, por consiguiente, doble de la que se adquiere después de uno. De igual manera se comprueba que después de tres, cuatro segundos, la velocidad es tres, cuatro veces mayor.

54\*. Aparato de indicaciones continuas. -M. Morin, director del Conservatorio de Artes y Oficios de París, mandó construir hace algunos años, para demostrar las leyes del descenso de los cuerpos, un aparato en el cual el movimiento uniforme de rotación de un cilindro de papel se halla combinado con el de un cuerpo que cae, de manera que éste, por medio de un pincelito mojado en tinta de China, describe sobre el papel una curva que representa la ley del movimiento. Este aparato, cuya idea primera se debe a M. Poncelet, se compone de un cilindro móvil A ([fig. 35](#)), recubierto de papel, y que tiene unos 40 centímetros de diámetro por 2m,90 de altura. Este cilindro se mueve por un peso P, el cual, mediante una cuerda, transmite el movimiento a un tambor B, y este último, merced a dos ruedas de ángulo, lo comunica en seguida a un eje H y a dos ruedas dentadas I y O que hacen dar vuelta al cilindro A.

Como el movimiento del peso P tiende a acelerarse durante su descenso, M. Wagner, constructor del aparato en cuestión, adoptó para regular el movimiento del tambor B un regulador, cuyos pormenores no aparecen en nuestro dibujo. Este sistema, conocido en mecánica con el nombre de *movimiento diferencial*, depende a la vez de péndulo C y de un volante de aspas K animado de un rápido movimiento de rotación. Este volante, envuelto por un tambor T, sube o baja al compás de la velocidad del aparato. Cuando se acelera el movimiento y oscila el péndulo con demasiada rapidez, sube el tambor, y encontrando entonces las alas o aspas del volante más resistencia en el aire, disminuye el movimiento; y al contrario, si decrece la velocidad, el tambor baja, y el volante aspada acelera su velocidad por encontrar menos resistencia. De esta suerte se obtiene muy pronto un movimiento sensiblemente uniforme, bastando para esto que el peso P haya descendido 50 centímetros.

La rueda N, fija en el eje del cilindro, sirve para numerar o marcar una larga regla de madera que se aplica contra el papel y que tiene por objeto trazar en su superficie dos sistemas de líneas equidistantes, unas en planos perpendiculares al eje del cilindro, y otras en los verticales.

En fin, una masa M, de hierro fundido, guiada en su caída por dos alambres F y G, perfectamente tensos, se encuentra fija primero en una pinza D que se abre a voluntad, tirando de otro alambre L. A esta masa

se fija, en R, el pincel que, durante el descenso, describe la curva SR sobre el cilindro giratorio. De la forma de esta curva se deducen las leyes del movimiento.

En efecto, el camino recorrido por el pincel, al cabo de un tiempo cualquiera, en un punto  $m$  de la curva, es igual a la parte  $am$  de la vertical trazada sobre la superficie del cilindro; pero siendo uniforme el movimiento de este, puede tomarse por duración del descenso, cuando el móvil llegó a  $m$ , el arco  $hm$  contado a partir de la vertical que corresponde al origen del movimiento del pincel. De igual manera, en otra posición  $m'$ , del pincel, el camino recorrido está representado por  $a'm'$ , y el tiempo por  $h'm'$ . Comparando las longitudes  $am$  y  $a'm'$  con los arcos  $hm$  y  $h'm'$ , se encuentra que son entre sí como los cuadrados de estos arcos, y de aquí se deduce que cuando un cuerpo cae, su movimiento es uniformemente acelerado (34, 2.º).

La relación que hay entre los arcos  $hm$  y las verticales  $am$ , manifiesta que la curva SR es una parábola con el eje paralelo a las generatrices del cilindro, lo cual se comprueba desplegando sobre un plano, el pliego de papel en que se halla trazada esta curva.

Los señores Lerebours y Secretan han simplificado recientemente la máquina de M. Morin, suprimiendo el regulador de M. Wagner y obteniendo el movimiento uniforme en virtud del mismo principio que en la máquina de Atwood. Para esto, equilibrada la masa P por un contrapeso casi igual, se le carga con otra masa adicional. Cuando el peso P, así cargado, ha caído de cierta altura, un anillo que le deja pasar, detiene a esta masa adicional. Trasformada entonces en uniforme la velocidad termina el experimento conforme se ha dicho más arriba. Se procura que la masa P pese algo más que el contrapeso, a fin de vencer los rozamientos.

55. Fórmulas relativas al descenso de los cuerpos. -La tercera ley del descenso de los graves (52) se puede representar por la fórmula  $v=gt$ , y la segunda por  $e=1/2 gt^2$ . En efecto, sean  $g$  la velocidad adquirida, al cabo de un segundo, por un cuerpo que cae en el vacío, y  $v$  su velocidad después de  $t$  segundos; como las velocidades son proporcionales a los tiempos, resulta  $v/g=t/1$  de donde  $v=gt$  [1].

Para obtener la fórmula  $e=1/2 gt^2$ , obsérvese que un cuerpo que cae durante  $t$  segundos, con movimiento uniformemente acelerado, cuya velocidad inicial es nula, y la final  $v=gt$ , recorre necesariamente el mismo espacio que si estuviese descendiendo durante el mismo tiempo, con movimiento uniforme y animado de una velocidad media entre las velocidades cero y  $gt$ , es decir, con la velocidad  $1/2 gt$ ; pues sabido es que la media entre dos cantidades no es otra cosa que su semi-suma. Siendo uniforme el movimiento en este último caso, el espacio recorrido es igual al producto de la velocidad por el tiempo (32); y representando por  $e$  este espacio, se tiene, pues,

$$e=1/2 gt \times t, \text{ o } e=1/2 gt^2 \text{ [2].}$$

Si en la fórmula [2] se hace  $t=1$ , resulta  $e=1/2 g$ , de donde  $g=2e$ ; es decir, que la velocidad adquirida al cabo de la unidad de tiempo es doble del espacio recorrido en el mismo tiempo.

En la fórmula [1] la velocidad  $v$  está representada en función del tiempo; pero se puede expresar también en función del espacio recorrido, eliminando  $t$  de las fórmulas [1] y [2].

Con este objeto, se deduce de la primera  $t=v/g$ , de donde  $t^2=v^2/g^2$ . Sustituyendo este valor de  $t^2$  en la fórmula [2], se tiene  $e=1/2 g \times v^2/g^2$  o bien  $e=v^2/2g$ , suprimiendo el factor común  $g$ . Multiplicando por  $2g$  los dos miembros de esta igualdad, resulta  $v^2=2ge$ , y extrayendo por último la raíz cuadrada,  $v=\sqrt{2ge}$  [3].

De esta última fórmula se deduce que *cuando un cuerpo cae en el vacío, la velocidad adquirida en un instante dado, es proporcional a la raíz cuadrada de la altura del descenso.*

Obtenidas las fórmulas  $v=gt$  y  $e=1/2 gt^2$ , considerando la gravedad como una fuerza aceleratriz constante, y por consiguiente, en el caso en que el movimiento es uniformemente acelerado, se las puede considerar como las fórmulas generales de este género de movimiento. No hay más sino que siendo  $g$  el aumento de velocidad comunicado en cada segundo por la fuerza aceleratriz, varía el valor de esta cantidad  $g$  con la intensidad de la fuerza.

56. Causas que modifican la intensidad de la gravedad. -Tres son las causas que hacen variar la intensidad de la gravedad, a saber: la elevación sobre el nivel del suelo, el achatamiento de la tierra y la fuerza centrífuga.

1.º Como la atracción terrestre se ejerce cual si toda la masa del globo estuviese reunida en su centro, y como esta atracción actúa en razón inversa del cuadrado de la distancia (37 y 38), claro es que la intensidad de la gravedad ha de crecer o disminuir, según se acerquen o se alejen los cuerpos de la superficie de la tierra. Con todo, esta variación no es sensible en los fenómenos que se observan en la superficie de nuestro globo, porque siendo su radio medio de 6.367.400 metros, permanece sensiblemente igual la intensidad de la gravedad, cuando un cuerpo sube o baja algunos centenares de metros. Mas para alturas de descenso más considerable, a no puede mirarse como constante la gravedad. Conviene, pues, observar que las leyes de la caída de los graves enunciadas en el número 52 no deben admitirse sino para los cuerpos que caen de pequeña altura.

2.º La intensidad de la gravedad se modifica también por el aplanamiento de la tierra en sus dos polos; porque hacia aquellas regiones, los cuerpos se hallan más próximos al centro del esferoide, y por consiguiente, actúa sobre ellos una atracción más intensa.

3.º La tercera causa que modifica la intensidad de la gravedad, es la *fuerza centrífuga*. Tal es el nombre que se da a la fuerza que se desarrolla por el movimiento circular, y en virtud de la cual las masas animadas de este movimiento tienden a alejarse del eje de rotación. Demuéstrase en mecánica que la fuerza centrífuga es proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación, de donde resulta que, bajo un mismo meridiano, crece esta fuerza a medida que nos aproximamos al Ecuador, en cuyo sitio llega a su máximo, porque allí es donde existe también mayor velocidad. En el polo, la fuerza centrífuga es nula.

En el Ecuador, la fuerza centrífuga es directamente opuesta a la gravedad, e igual a  $1/289$  de su intensidad. Como 289 es el cuadrado de 17; se deduce de aquí que si el movimiento de rotación de la tierra fuese 17 veces más rápido, la fuerza centrífuga, que es proporcional al cuadrado de la velocidad, llegaría a ser en el Ecuador 289 veces más intensa de lo que es, es decir, igual a la gravedad, y de consiguiente, los cuerpos no pesarían. Si aún fuera más veloz el movimiento de rotación, aquéllos serían proyectados en el espacio por efecto de la fuerza centrífuga.

Cuando se avanza del Ecuador hacia los polos, la gravedad va decreciendo cada vez menos, por efecto de la fuerza centrífuga: en primer lugar, porque esta última fuerza decrece en el mismo sentido; y además, porque en el Ecuador es directamente opuesta a la gravedad, mientras que, avanzando hacia los polos, su dirección va inclinándose cada vez más, con relación a la de la gravedad. Así lo demuestra la [fig. 36](#), en la que  $PP'$  representa el eje de rotación de la tierra, y  $EE'$  el Ecuador terrestre. En un punto cualquiera  $E'$  de este círculo, la fuerza centrífuga sigue la dirección  $CE'$ , y tiende por completo a disminuir la intensidad de la gravedad, pero en un punto  $a$ , más cercano al polo, estando representada la fuerza centrífuga por una recta  $ab$  perpendicular al eje  $PP'$  mientras que la gravedad actúa siguiendo la línea  $aC$ , se nota que esta última fuerza no es ya directamente opuesta a la centrífuga, sino tan sólo a su componente  $ad$ , tanto menor con relación a  $ab$ , cuanto más cerca del polo se encuentra el punto  $a$ .

56.-P. Vamos ahora a demostrar la relación que media entre la fuerza centrífuga y la masa, la velocidad, el radio y el tiempo que la determinan.

Supongamos (fig. 37) una molécula material  $m$ , sujeta a la extremidad de un cordón inextensible  $Cm$ , el punto  $C$ , alrededor del cual puede girar solicitada la fuerza instantánea  $md$ . Esta molécula no puede obedecer libremente a la fuerza  $md$  a causa de la resistencia del cordón, que podremos representar por  $ma$ , sino que sigue la diagonal  $mb$  del paralelogramo  $abdm$  construido sobre las intensidades de las fuerzas. Pero en virtud de la fórmula del movimiento uniforme (32), tenemos que  $mb=vt$ , y por consiguiente,  $\overline{mb}^2=v^2 t^2$  [1]; ahora, por la construcción de la figura, resulta que:  $am : mb :: mb : pm$ ; o bien  $\overline{mb}^2 = am \cdot pm$ , y por consiguiente,  $\overline{mb}^2 = am \cdot 2R$ ; cuyo valor, sustituido en la fórmula [1], nos da:  $am \cdot 2R = v^2 t^2$ , o bien  $am = v^2 t^2 / 2R$ , [2]. Si la molécula  $m$  tan sólo estuviese solicitada por la fuerza constante  $am$ , recorrería este espacio con movimiento uniformemente acelerado, y tendríamos (55)  $am = \frac{1}{2} a t^2$ , llamando  $f$  a la fuerza constante, igual y contraria a la  $mh$ , que es la fuerza centrífuga que se desarrolla en este movimiento circular, y que tiende a romper el cordón. Sustituyendo ahora el valor de  $am$  en la fórmula [2], resulta:

$\frac{1}{2} a t^2 = v^2 t^2$ , y simplificando,  $f = v^2 / R$  [3], que es el valor de la fuerza centrífuga.

Si el espacio recorrido por la molécula  $m$  fuese la circunferencia  $mpb$ , según las fórmulas citadas del movimiento uniforme tendríamos:

$v = 2pR/t$ , o bien  $v^2 = 4p^2 R^2 / t^2$ ; y sustituyendo este valor de  $v^2$  en la fórmula [3], resulta  $f = 4p^2 R^2 / R t^2$ , o bien  $f = 4p^2 R / t^2$  [4].

Observemos ahora que si, en vez de considerar una sola molécula, tuviésemos que considerar  $n$  moléculas, o sea la masa  $M$ , los dos miembros de la ecuación [4] se harían  $M$  veces mayores, y tendríamos:

$F = 4p^2 R M / t^2$ . Para una masa diferente  $M'$ , tendríamos:  $F' = 4p^2 R M' / t^2$ ; y dividiendo una por otra estas dos últimas ecuaciones, resulta:  $F : F' :: M R / t^2 : M' R' / t'^2$ ; lo cual nos dice la relación que existe entre dos fuerzas centrífugas.

57. Medida de la intensidad de la gravedad. -Supuesto que en mismo sitio y para alturas poco considerables podemos suponer que la gravedad es una fuerza aceleratriz constante, se toma por medida de su intensidad, la velocidad que imprime, en un segundo, a los cuerpos que caen en el vacío (35), sin atender a la masa, porque en el vacío todos los cuerpos caen con igual velocidad (52).

Esta velocidad se representa en general por la letra  $g$ ; crece en el Ecuador al polo, y en París es igual a  $9^m,8088$ , siendo su valor en Madrid igual a  $9^m,7992$  o expresado en pies castellanos, a  $35^{pies},16902$ . Muy pronto se verá cómo se determina, en cada lugar, por medio del péndulo.

Las variaciones de intensidad que experimenta la gravedad con la latitud o la altura, modifican el peso absoluto de los cuerpos (41); pero en nada influyen sobre su peso relativo, o sea respecto al que acusan las balanzas. En efecto, ejerciéndose igualmente la acción de la gravedad sobre todas las sustancias, se deduce de este hecho, que el aumento o la disminución de peso que resulta de las variaciones de la fuerza que

consideramos, es la misma en cada lugar, respecto a los cuerpos que han de pesarse, y con relación a las pesas métricas o las que se empleen, cualquiera que sea el sistema al cual correspondan. Es decir, que el número de gramos que en París o Madrid representa el peso un cuerpo, también lo presentará así en el polo como en el Ecuador: lo que varía es el peso del gramo, que aumenta o disminuye, proporcionalmente a la intensidad de la gravedad.

58. Péndulo. -Distínguense dos especies de péndulos, a saber: el simple y el compuesto. El *péndulo simple*, o *péndulo ideal*, es el que consta de un cuerpo pesado, suspendido por un hilo inextensible, sin masa y sin peso, en un punto fijo, a cuyo alrededor puede oscilar libremente, o adquirir un movimiento de vaivén más o menos rápido. Este péndulo no es realizable, sino puramente teórico, sirviendo tan sólo para determinar, por medio del cálculo, las leyes de las oscilaciones del péndulo.

*Péndulo compuesto* es todo cuerpo que puede oscilar alrededor de un punto o de un eje fijo. Cuando el péndulo oscila alrededor de un punto, toma éste el nombre de *centro de suspensión*; y si se verifica el movimiento alrededor de una recta horizontal, esta recta se denomina *eje de suspensión*. El péndulo compuesto es el único que puede construirse; se le dan las formas que se quiere; pero, en general, consiste en una masa metálica, lenticular o esférica, suspendida de una varilla móvil alrededor de un eje horizontal; tales son las péndolas de los relojes, y el péndulo P representado en la [fig. 34](#).

Los péndulos compuestos se hallan suspendidos, bien por medio de una cuchilla análoga a la de las balanzas ([fig. 22](#)) o bien mediante una lámina de acero, delgada y flexible, que se encorva ligeramente a cada oscilación.

Para darnos cuenta del movimiento oscilatorio del péndulo, consideremos primero un péndulo simple  $cM$ , en el cual sea  $M$  el punto material, y  $c$  el centro de suspensión ([fig. 38](#)). Cuando el punto  $M$  se encuentra debajo del  $c$ , en la vertical que pasa por este punto, queda destruida la acción de la gravedad; mas si el punto  $M$  se traslada a  $m$ , su peso  $P$  se descompone en dos fuerzas, dirigida una según la prolongación  $mB$  del hilo, y la otra en la dirección de la tangente  $mD$  al arco  $mMn$ . La componente  $mB$  se destruye por la resistencia del punto  $c$ , mientras que la otra componente  $mD$  tiende a que el punto material baje de  $m$  a  $M$ . Llegado a este último punto, no se para el péndulo, porque, en virtud de su inercia, es arrastrado según la dirección  $Mn$ .

Si se repite la misma construcción en un punto cualquiera del arco  $Mn$ , se reconoce que la gravedad que, de  $m$  a  $M$ , obró como fuerza aceleratriz, actúa, de  $M$  a  $n$ , como fuerza retardatriz. Ella sustrae, pues, sucesivamente al móvil la velocidad adquirida durante el descenso, haciendo disminuir, esta última en la misma cantidad que aumentó de  $m$  a  $M$ , de suerte que se destruirá por completo, luego que llegue el péndulo a  $n$ , encima de la posición  $M$ , a la misma altura que el punto  $m$ . Volviendo entonces de nuevo el péndulo de  $n$  hacia  $M$ , se reproduce la misma serie de fenómenos, y aquél tiende a oscilar eternamente, describiendo arcos iguales a los dos lados del punto  $M$ . Pero nunca acontece así en la práctica, porque existen dos causas que sin cesar contribuyen a entorpecer el movimiento y aun a destruirlo: la primera es la resistencia del medio o recinto en el cual se mueve el péndulo, y la segunda, el rozamiento que se desarrolla en el eje de suspensión.

59. Leyes de las oscilaciones del péndulo. -Se denomina *oscilación*, el paso del péndulo de una posición extrema *m*, a la otra posición extrema *n*. El arco *mn* es la *amplitud* de la oscilación, siendo la *longitud* del péndulo simple, la distancia del punto de suspensión *c* al punto material *M*.

Demuéstrase, en mecánica racional, que las oscilaciones del péndulo simple se hallan sometidas a las cuatro leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Para un mismo péndulo, las pequeñas oscilaciones son isócronas*, es decir, que se verifican muy sensiblemente, en tiempos iguales, mientras sus amplitudes no pasen de ciertos límites, de 2 o 3 grados cuando más. El cálculo demuestra, que la resistencia del aire aumenta la duración de las oscilaciones, a causa de la pérdida de peso que experimenta el cuerpo en el aire, y que el isocronismo persiste en el aire lo mismo que en el vacío: por disminuir la amplitud de sus oscilaciones, es por lo que el péndulo concluye por pararse.

Galileo fue el primero en descubrir el isocronismo de las pequeñas oscilaciones del péndulo. Cuéntase que hizo este descubrimiento, siendo joven, observando los movimientos de una lámpara suspendida de la bóveda de la catedral de Pisa.

2.<sup>a</sup> *Para péndulos de igual longitud, no varía la duración, sea cual fuere la sustancia de que esté formado el péndulo*. Es decir, que varios péndulos simples, cuyo punto material sea de corcho, de plomo o de oro, ejecutan el mismo número de oscilaciones en el mismo tiempo, siempre que sus longitudes sean iguales.

3.<sup>a</sup> *Para péndulos desiguales, la duración de las oscilaciones es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud*. Es decir, que si la longitud de un péndulo es 4, 9, 16..., veces mayor, la duración de las oscilaciones no lo será mas que 2, 3, 4...

4.<sup>a</sup> *En diferentes lugares de la tierra, la duración de las oscilaciones, para péndulos de igual longitud, está en razón inversa de la raíz cuadrada de la intensidad de la gravedad*.

Estas leyes se deducen de la fórmula  $t = p\sqrt{l/g}$ , que se obtiene aplicando tan sólo el cálculo al movimiento del péndulo simple. En esta fórmula, *t* representa la duración de una oscilación, *l* la longitud del péndulo, *g* la intensidad de la gravedad, es decir, la velocidad adquirida, al cabo de un segundo, por un cuerpo que cae en el vacío (37). En cuanto a *p* es una cantidad constante que representa la relación de la circunferencia al diámetro, cuyo valor es, según demuestra la geometría, 3,141592...

Las dos primeras leyes del péndulo se deducen inmediatamente de la fórmula  $t = p\sqrt{l/g}$  porque no conteniendo esta fórmula ni la amplitud de la oscilación, ni la densidad de la sustancia de que está formado el péndulo, el valor de *t* es independiente de estas dos cantidades.

Por lo que toca a las leyes tercera y cuarta están igualmente comprendidas en la fórmula, porque debajo del radical entra *l* como numerador y *g* como denominador.

60. Longitud del péndulo compuesto. -Las leyes y las fórmulas arriba indicadas se aplican también al péndulo compuesto; pero en tal caso hay que definir lo que se entiende por *longitud* de este péndulo. Para esto observemos, que constando todo péndulo compuesto de una varilla pesada terminada por una masa más o menos considerable, los diversos puntos materiales de este sistema tienden, en virtud de la

tercera ley del péndulo, a describir sus oscilaciones en tiempos tanto más largos, cuanto más distan del punto de suspensión. Como todos estos puntos se hallan invariablemente enlazados entre sí, necesariamente se verifican sus oscilaciones en el mismo tiempo. Resulta de todo esto, que se encuentra retardado el movimiento de los puntos más próximos al eje de suspensión, al paso que se acelera el de los puntos que están más alejados del mismo. Entre estas dos posiciones extremas existen, por consiguiente, puntos que no se aceleran, ni retardan, y que oscilan cual si no estuviesen enlazados con el resto del sistema. Encontrándose estos puntos equidistantes del eje de suspensión, su conjunto constituye un *eje de oscilación* paralelo al primero. La distancia entre estos dos ejes es la *longitud del péndulo compuesto*. Es decir, que la *longitud de un péndulo compuesto, es la del péndulo simple que efectuaría sus oscilaciones en el mismo tiempo*.

El eje de oscilación goza de la propiedad de ser recíproco del de suspensión; es decir que, suspendiendo el péndulo por su eje de oscilación, no varía la duración de las oscilaciones, con lo cual se demuestra que no se modificó la longitud. Esta propiedad, demostrada la primera vez por Huygens, físico holandés da el medio de encontrar experimentalmente la longitud del péndulo compuesto. Con este objeto, se invierte el péndulo y se le suspende, por medio de un eje móvil, que se coloca, después de algunos tanteos, de manera que el número de las oscilaciones en el mismo tiempo, sea el mismo que antes de la inversión. Obtenido este resultado, la longitud que se busca es la distancia del segundo eje de suspensión al primero. Si se sustituye el valor así obtenido, en vez de  $l$  en la fórmula del péndulo simple, se hace ésta aplicable al compuesto, sucediendo lo propio respecto a las leyes de sus oscilaciones, que son idénticas.

La longitud del péndulo que *bate segundos*, es decir, que tarda en cada oscilación  $1''$ , varía con la intensidad de la gravedad; sus valores son:

En el Ecuador	$0^m,990925$
En París	$0^m,993846$
En Madrid (según Ciscar)	$0^m,992881$ o $3\text{pies},56337$
A $10^\circ$ del polo	$0^m,995924$

61. Comprobación de las leyes del péndulo. -No se pueden comprobar las leyes del péndulo simple sino por medio del compuesto, cuidando de construir éste de manera que satisfaga, en cuanto sea posible, las condiciones del primero. Para esto, se suspende, de la extremidad de un hilo fino, una esferita de una sustancia muy densa, de plomo o de platino, por ejemplo. Formado así el péndulo, oscila sensiblemente como si fuese simple y de longitud igual a la distancia que media desde el centro de la esferita, al punto de suspensión.

Para comprobar la ley del isocronismo de las pequeñas oscilaciones, se hace oscilar el péndulo así construido, y se cuenta el número de oscilaciones que ejecuta en tiempos iguales, cuando la amplitud es sucesivamente de 3, de 2 o de 1 grado. De esta suerte se observa que el número de oscilaciones es constante.

Para demostrar la segunda ley, se toman muchos péndulos B, C, D ([fig. 39](#)), contruidos de la misma manera que el anterior, de longitudes iguales, y terminados por esferas del mismo diámetro, pero de diferentes sustancias, por ejemplo, de plomo, de cobre y de marfil. Se observa que, despreciando la resistencia del aire, describen todos estos

péndulos en el mismo tiempo, igual número de oscilaciones; de donde se deduce que la gravedad obra en todas las sustancias con igual intensidad, según ya habíamos visto (52).

Nos cercioramos de la tercera ley, haciendo oscilar péndulos cuyas longitudes sean respectivamente 1, 4, 9..., y se nota que los números de oscilaciones correspondientes son como 1,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ..., lo cual demuestra que su duración es sucesivamente 1, 2, 3...

La cuarta ley no se puede demostrar directamente de un modo experimental.

62. Usos del péndulo. -El péndulo sirve para comprobar, según acaba de verse en el párrafo anterior, que la gravedad solicita a todos los cuerpos con igual intensidad. Sirve también para determinar la intensidad de la gravedad, en los diferentes puntos de nuestro globo, y por consiguiente, la forma de éste, la masa de las montañas y la densidad de la tierra. El isocronismo de sus oscilaciones le recomienda como regulador de los relojes. Recientemente, por último, le ha hecho servir M. Foucault para la demostración experimental del movimiento de rotación diurna de la tierra.

Para medir la intensidad de la gravedad (57) por medio del péndulo, se resuelve la ecuación  $t = p\sqrt{l/g}$  (59), con relación a  $g$ . Elevando los dos miembros al cuadrado, resulta  $t^2 = p^2 l/g$ ; multiplicando por  $g$ , y dividiendo en seguida por  $t^2$  se obtiene  $g = p^2 l/t^2$ . En donde se ve que para conocer  $g$ , hay que principiar midiendo la longitud  $l$  de un péndulo compuesto (60), luego la duración  $t$  de sus oscilaciones; cuyo último valor se saca buscando cuántas oscilaciones da en un número conocido de segundos, y dividiendo éste por el número de oscilaciones.

Operando de esta suerte se ha determinado el valor de  $g$  en diferentes puntos del globo, habiendo hallado Borda y Cassini que es aquél en París 9m,8088. Pero recordando que la pérdida del peso de un cuerpo en el aire es mayor cuando el cuerpo se encuentra en movimiento, que al hallarse en reposo, y efectuando esta corrección ocasionada por la pérdida desigual del peso, en el cálculo del péndulo, Mr. Bessel, astrónomo de Koenisberg, ha encontrado que el verdadero valor de  $g$ , en París, es de 9m,8096.

Conocido para un lugar dado el valor de  $g$ , se deduce por medio del cálculo, la distancia al centro de la tierra, y por consecuencia la figura de ésta.

El físico holandés Huyghens fue el primero que aplicó el péndulo como regulador en los relojes, en 1657, y el muelle espiral a los de bolsillo, en 1675. Cuando sirve de regulador el péndulo, lleva en la parte superior de su varilla una pieza en arco de círculo, terminada por dos paletas, y llamada *escape de áncora* a causa de su forma. Puesto en reposo el péndulo, una de las paletas se apoya en uno de los dientes de una rueda denominada *rueda de encuentro*, y se queda parado todo el movimiento de relojería. Pero luego que se mueve el péndulo, la paleta deja pasar en cada oscilación un diente de la rueda de encuentro. Por ser isócronas las oscilaciones del péndulo, la rueda de encuentro y el mecanismo del reloj, de que forma parte, marchan y se paran a intervalos iguales, y por consiguiente, indican o marcan divisiones iguales de tiempo.

63. Problemas sobre la gravedad. -I. ¿Cuál será en París a los 45 segundos la velocidad de un cuerpo que cae, libremente en el vacío?

Este problema se resuelve por medio de la fórmula  $v = gt$  (55), haciendo en ella  $g = 9m,8088$  (57) y  $t = 45''$ ; lo cual da  $v = 9m,8088 \times 45 = 441m,396$ .

A una latitud diferente de la de París, como ya el valor de  $g$  no es 9m,8088, la velocidad adquirida por el cuerpo que cae será mayor o menor que 441m,396.

II. ¿Cuánto tiempo ha de durar la caída en París de un cuerpo para adquirir en el vacío una velocidad de 600 metros, que es la de una bala de cañón?

De la fórmula  $v=gt$ , sale  $t=v/g$ , y reemplazando  $v$  y  $g$  por sus valores, sale

$$t=600/9,8088=61'',16.$$

III. ¿Cuánto tiempo necesita un cuerpo para caer en el vacío de una altura de 1000 metros?

De la fórmula  $e=\frac{1}{2}gt^2$  (52), se deduce  $t=\sqrt{2e/g}=\sqrt{2000/9,8088}=14'',28$ .

IV. ¿De qué altura deberá caer un cuerpo en el vacío para adquirir una velocidad de 300 metros?

La fórmula  $v^2=2ge$  (55), da  $e=v^2/2g=90,000/2.98088=4587m,7$ .

V. Sobre un plano inclinado, cuya longitud AB (fig. 33) es igual a 1000 metros, y la altura BC a 5; ¿cuál es el esfuerzo necesario para arrastrar un peso de 2500 kilogramos, prescindiendo del rozamiento?

Representando por P el peso y por F la fuerza que se busca, se obtiene (53) la igualdad

$$F/P=BC/AB, \text{ de donde } F=P \times BC/AB=2500 \times 5/1000=12k,500.$$

VI. Lanzado verticalmente un proyectil de abajo hacia arriba, en el vacío, con una velocidad inicial de 245m,22, se pregunta: ¿cuánto tiempo tardará el móvil para principiar a caer, y a qué altura llegará?

Sean  $a$  la velocidad inicial comunicada al móvil, y  $t$  la duración de la subida; la gravedad que obra durante este tiempo como fuerza retardatriz, disminuye la velocidad  $a$  en una cantidad igual a  $g$  en un segundo, y en una cantidad  $gt$  al cabo de  $t$  segundos; se tiene pues, en el momento en que el cuerpo se para,  $gt=a$ , de donde  $t=a/g=245,22/9,8088=25''$ .

Para calcular la altura  $a$  que sube el móvil, nótese que, como durante su ascenso la gravedad le quitaba gradualmente la velocidad que le comunicaría en un tiempo igual, si cayese, es preciso que tarde el cuerpo en subir a su mayor altura  $e$ , precisamente el tiempo, que tardaría en descender de ella. La altura de ascenso puede calcularse, pues, por la fórmula  $e=1/2gt^2$  (55), que da  $e=4,9044 \times 625=3065m,25$ .

▽△

## Capítulo IV

▽△

### Fuerzas moleculares

64. Índole de las fuerzas moleculares. -Los fenómenos que ofrecen los cuerpos manifiestan que sus moléculas están constantemente solicitadas por dos fuerzas contrarias, de las cuales la una tiende a aproximarlas y la otra a separarlas. La primera, que se denomina *atracción molecular*, varía, para un mismo cuerpo, sólo con la distancia; y la segunda, debida al calor, se modifica con la intensidad de este agente y con la distancia. De la mutua relación entre estas fuerzas y de la orientación que imprimen a las moléculas, resulta el estado sólido, líquido o gaseoso (5).

La atracción molecular no se ejerce más que a distancias infinitamente pequeñas. Su efecto es nulo a toda distancia sensible, lo cual la distingue de la gravedad y de la gravitación universal, que actúan a todas las distancias, ignorándose las leyes a las cuales se ajusta.

Según se considere la atracción molecular, así se la designa con los nombres de *cohesión*, de *afinidad* o de *adhesión*.

65. Cohesión. -La *cohesión* es la fuerza que enlaza entre sí las moléculas semejantes, es decir de igual naturaleza, dos moléculas de agua, por ejemplo, o dos moléculas de hierro. Esta fuerza es casi nula en los gases, débil en los líquidos, y muy grande en los sólidos. Su intensidad decrece cuando aumenta la temperatura, mientras que entonces aumenta la fuerza repulsiva originada por el calor. Por esto, cuando se calientan los cuerpos sólidos, acaban por liquidarse, y hasta por pasar al estado de fluidos aeriformes.

La cohesión varía, no sólo con la naturaleza de los cuerpos, sino también con la colocación de sus moléculas, como sucede en el cocido de las arcillas y en el temple del acero. A las modificaciones de la cohesión hay que atribuir muchas propiedades de los cuerpos, tales como la tenacidad, la ductilidad y la dureza.

En los líquidos tornados en grandes masas, la gravedad supera a la cohesión; por eso, como obedecen sin cesar los líquidos a la primera fuerza, no afectan ninguna forma particular, tomando siempre la de los vasos que los contienen. Pero, en pequeñas masas, la cohesión se hace superior, y los líquidos afectan entonces la forma esferoidal. Tal es lo que sucede en las gotas de rocío suspendidas de las hojas de las plantas, observándose también el mismo fenómeno cuando se derrama sobre una superficie plana y horizontal un líquido que no la moja, como el mercurio en la madera. El experimento puede hacerse igualmente con el agua, si de antemano se ha proyectado sobre la superficie finísimo polvo, por ejemplo, de negro de humo:

66. Afinidad. -La *afinidad* es la atracción que se ejerce entre sustancias heterogéneas; en el agua, por ejemplo que está formada por dos átomos de hidrógeno por uno de oxígeno, la afinidad es la que une estos dos cuerpos; pero la cohesión es la que une dos moléculas de agua. Es decir, que en los cuerpos compuestos obran simultáneamente la cohesión y la afinidad, mientras que en los simples no se deja sentir más que la primera.

Con la afinidad deben relacionarse todos los fenómenos de combinaciones y de descomposiciones químicas.

Toda causa que tiende a debilitar la cohesión aumenta la afinidad. En efecto, favorecen a esta última fuerza el estado de división, lo propio que los estados líquido o gaseoso. Desarrollase, sobre todo, en el *estado naciente*, es decir, en el estado en que se halla un cuerpo cuando, al desprenderse de una combinación, queda aislado y libre para obedecer a las más débiles afinidades. Por último, la afinidad presenta efectos muy variables, según la elevación de temperatura. En ciertos casos favorece el calor las combinaciones, separando las moléculas y disminuyendo la cohesión. Entre el azufre y el oxígeno, por ejemplo, queda sin efecto la afinidad a la temperatura ordinaria, mientras que cuando aquélla se eleva, se combinan estos cuerpos, dando origen a otro compuesto muy notable, que es el ácido sulfuroso. En otros casos, al contrario, el calor destruye las combinaciones, comunicando a sus elementos una expansión desigual. Tal

es lo que les sucede a muchos óxidos metálicos, que se descomponen por la acción del fuego.

67. Adhesión. -Dase el nombre de *adhesión* a la atracción molecular que se manifiesta entre los cuerpos en contacto. Dos cristales, por ejemplo, que se hallan superpuestos, se adhieren al fin de tal manera, que no es posible separarlos sin romperlos. Esta fuerza aparece, no sólo entre los sólidos, sino también entre éstos y los líquidos, y entre los mismos y los gases.

La adhesión entre los sólidos no es un efecto de la presión atmosférica, porque se observa en el vacío. Crece con el grado de pulimento de las superficies y con la duración de su contacto; pues, efectivamente, la resistencia que hay que vencer para separarlas, es tanto mayor cuanto más prolongado ha sido el contacto. Por fin, la adhesión entre los cuerpos sólidos es independiente de su espesor, lo cual indica que la atracción molecular no se ejerce más que a pequeñísimas distancias.

Sumergidos los cuerpos sólidos en el agua, en el alcohol y en la mayor parte de los líquidos, salen recubiertos de una capa líquida, sostenida por la adhesión.

Prodúcese entre los sólidos y los gases la misma adhesión que entre los sólidos y los líquidos. En efecto, si se introduce una lámina de vidrio o de metal en el agua, se ve que aparecen en su superficie varias burbujas de aire. Como en este caso el agua no penetra en los poros de la lámina, no pueden provenir estas burbujitas del aire que de ellos pudiera expulsarse; débense únicamente por lo tanto, a una capa de aire que recubría la lámina y que la *mojaba* a la manera de un líquido.

Pronto daremos a conocer, con los nombres de *capilaridad*, de *endósmose*, de *absorción* y de *imbibición*, una serie de fenómenos que reconocen también por causa la atracción molecular.

▽△

## Capítulo V

▽△

### Propiedades particulares de los sólidos

68. Diversas propiedades particulares. -Después de haber dado a conocer las principales propiedades comunes a los sólidos, a los líquidos y a los gases, trataremos ahora de las más notables, y que sólo son peculiares a los sólidos. Estas propiedades son: la *elasticidad de tracción*, la *elasticidad de torsión*, la *elasticidad de flexión*, la *tenacidad*, la *ductilidad*, la *dureza*.

69. Elasticidad de tracción. -Hemos hablado ya de la elasticidad como propiedad general (19); pero solamente de la elasticidad desarrollada por presión. En los sólidos, no obstante, puede manifestarse también por tracción, por torsión y por flexión.

Para estudiar las leyes de la elasticidad de tracción, se servía Savart del aparato representado en la [figura 40](#). Este aparato se compone de un montante de madera, del cual se suspenden las varillas o los hilos que se van a ensayar. Fíjase en su extremidad interior un platillo destinado a recibir los pesos se marcan en su longitud señales A y B, cuya distancia se mide exactamente por medio de un catetómetro, antes de cargar el platillo.

Dase el nombre de *catetómetro* a una regla de cobre K dividida en milímetros, y que puede tomar una posición vertical por medio de un pie provisto con tornillos para nivelar. Un antejo exactamente perpendicular a la regla, puede correr en el sentido de su longitud, llevando un vernier o nonius que da quincuagésimas de milímetro. Fijando sucesivamente este antejo delante de los puntos A y B, como se ve en la figura, es como se obtiene en la escala graduada la distancia de dichos puntos. Colócanse en seguida pesas en el platillo, y, midiendo de nuevo el intervalo entre los puntos A y B, se determina su prolongación.

Mientras no se despase el límite de elasticidad, la tracción de las varillas y de los alambres está sometida a las tres leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Las varillas y los alambres tienen una elasticidad perfecta, es decir, que recobran exactamente su longitud primitiva así que cesa la tracción.*

2.<sup>a</sup> *Para una misma sustancia y un mismo diámetro, la prolongación o aumento de longitud, es proporcional a la fuerza de tracción y a la longitud.*

3.<sup>a</sup> *Para varillas o alambres de igual longitud, de igual materia, pero de grueso desigual, las prolongaciones están en razón inversa de los cuadrados de los diámetros.*

El cálculo y la experiencia demuestran que, cuando los cuerpos se alargan por tracción, aumentan en volumen.

M. Wertheim, que ha efectuado numerosas experiencias sobre la elasticidad de los metales, ha demostrado que la elasticidad decrece de una manera continua a medida que la temperatura se eleva desde 15° hasta 200°: se exceptúan el hierro y el acero, pues su elasticidad aumenta hasta 100°, y en seguida disminuye. El mismo físico ha demostrado que, en general, *todas las causas que aumentan la densidad, aumentan la elasticidad, y recíprocamente.*

70. Elasticidad de torsión. -Las leyes de la torsión de los alambres fueron determinadas por Coulomb, físico francés, que murió en 1806. Sirvió en sus investigaciones un aparato que se llama *balanza de torsión*, compuesta de un alambre fino, sujeto por su parte superior, y tenso por un peso que lleva fija una aguja horizontal. Debajo hay un círculo graduado, cuyo centro corresponde a la prolongación del alambre cuando se halla éste vertical. Si se desvía a la aguja de su posición de equilibrio, según cierto ángulo, que es el *ángulo de torsión*, la fuerza necesaria para obtener este ángulo es a su vez la *fuerza de torsión*. Después de esta desviación, las moléculas que se hallaban dispuestas en línea recta, siguiendo la longitud del alambre, lo están ahora en hélice arrollada alrededor de este alambre. Si no se ha traspasado el límite de elasticidad, tienden las moléculas a recobrar su primitiva posición, y lo consiguen efectivamente desde el instante en que ya no obra la fuerza de torsión; pero no se limitan a esto, sino

que, en virtud de su velocidad adquirida, traspasan esta posición, dando origen a una torsión en sentido contrario. Roto de nuevo el equilibrio, vuelve sobre sí mismo el alambre, no parándose la aguja en el cero del cuadrante hasta después de cierto número de oscilaciones a ambos lados de este punto.

Por medio del aparato que acabamos de describir, comprobó Coulomb que, cuando la amplitud de las oscilaciones no pasa de un corto número de grados, se hallan sometidas estas oscilaciones a las cuatro leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Que son muy sensiblemente isócronas.*

2.<sup>a</sup> *Que para un mismo alambre, el ángulo de torsión es proporcional a la fuerza de torsión.*

3.<sup>a</sup> *Que para una misma fuerza de torsión y para alambres de igual diámetro, el ángulo de torsión es proporcional a la longitud de los alambres.*

4.<sup>a</sup> *Que para una misma fuerza y para una misma longitud del alambre, el ángulo de torsión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de los diámetros.*

71. Elasticidad de flexión. -Todos los sólidos cortados en láminas delgadas y fijos por una de sus extremidades, pueden recobrar, después de haberse encorvado más o menos, su forma primera, luego que se hallan abandonados a sí mismos. Esta propiedad es muy sensible en el acero templado, en la goma elástica, en la madera y en el papel.

La elasticidad de flexión tiene numerosas aplicaciones en los arcos, en las ballestas, en los muelles de los relojes y de los carruajes, en las romanas y en los dinamómetros destinados a medir la fuerza de los motores. La elasticidad de la crin, de la lana y de la pluma, se utiliza en los colchones y en las almohadas, que tanto se emplean en la economía doméstica.

Sea cual fuere la especie de elasticidad que se estudie, hemos observado ya (19) que siempre reconoce un límite, es decir, una separación molecular, pasada la cual se rompen los cuerpos, o por lo menos no recobran ya su forma primera. Muchas son las causas que pueden hacer variar este límite. Compruébase, en efecto, que la elasticidad de muchos metales crece por el *balido*, es decir, por la aproximación de las moléculas, en frío, mediante la hilera, el laminador o el martillo. Algunas sustancias, como el acero, la fundición y el vidrio se vuelven, en virtud del *temple* (76), más elásticas y al propio tiempo más duras.

Disminúyese, al contrario, la elasticidad, por el *recocido*, operación que consiste en dar a los cuerpos una temperatura menos elevada que para el temple, dejándoles luego que se enfríen lentamente. Merced al recocido, se gradúa según se desea la elasticidad de los resortes. Como el vidrio calentado sufre un verdadero temple cuando se enfría con demasiada rapidez, para disminuir la fragilidad de los objetos recientemente fabricados con esta sustancia, se les recuece en un horno, alejándolos paulatinamente del mismo.

72. Tenacidad. -La tenacidad es la resistencia que oponen los cuerpos a la tracción. Para evaluar esta fuerza, se da a los cuerpos la forma de varillas cilíndricas o prismáticas, y

se las sornete, en el sentido de su longitud, a una tracción medida en kilogramos, y suficiente para determinar la rotura.

*La tenacidad es directamente proporcional a la fuerza que determina la rotura, e inversamente a la sección transversal de los hilos, o a la de los prismas. De los numerosos experimentos que se han hecho con los metales, se ha deducido que la fuerza necesaria para la rotura es casi triple de la que corresponde al límite de elasticidad.*

La tenacidad disminuye con la duración de la tracción. Se comprueba, en efecto, que las varillas metálicas y otras, ceden, trascurrido cierto tiempo, a cargas menores que las que serían necesarias para producir inmediatamente la rotura; pero en todos casos la resistencia a la tracción es menor que la resistencia a la presión.

No sólo varía la tenacidad en cada sustancia, sino que, a igualdad de materia, se modifica con la forma de los cuerpos. Para secciones equivalentes, el prisma resiste menos que el cilindro. Para una cantidad dada de materia, el cilindro hueco es más resistente que el macizo, encontrándose entonces el *máximo* de tenacidad cuando el radio exterior es al interior en la relación de 11 es a 5.

Para un mismo cuerpo, la forma influye lo mismo en la resistencia a la presión que a la tracción. En efecto, un cilindro hueco, a igualdad de masa y de altura, es más resistente que otro sólido; de donde resulta que los huesos de los animales, las plumas de las aves, los tallos de las gramíneas y de otras muchas plantas, oponen más resistencia que si fueran macizos, en el supuesto de que no varíe la masa.

Por fin, la tenacidad, lo propio que la elasticidad, varía para un mismo cuerpo, según el sentido bajo el cual se la considere. En la madera, por ejemplo, la tenacidad y la elasticidad son mayores en la dirección de las fibras que en el sentido transversal. Esta diferencia se observa generalmente en todos los cuerpos, cuya contestura no es igual en todas direcciones.

*Pesos, en kilogramos, que determinan la rotura por milímetro cuadrado.*

Plomo fundido.....	2,21	Hierro laminado.....	63,38
-laminado.....	2,36	-recocido.....	50,25
Estaño fundido.....	4,16	Acero fundido laminado.....	83,80
-laminado.....	3,00	Antimonio fundido.....	0,67
Oro laminado.....	28,00	Bismuto fundido.....	0,97
-recocido.....	11,00		
Plata laminada.....	29,00	<i>Maderas según el sentido de las fibras.</i>	
-recocida.....	16,40	Boj.....	14,00
Zinc laminado.....	15,77	Fresno.....	12,00
-recocido.....	14,40	Abeto.....	9,00
Cobre laminado.....	41,00	Haya.....	8,00
-recocido.....	31,60	Roble.....	7,00
Platino laminado.....	35,00	Caoba.....	5,00
-recocido.....	26,75		

En la tabla que acabamos de insertar, se suponen los cuerpos a la temperatura ordinaria, pues si ésta aumenta, decrece rápidamente la tenacidad. M. Seguin mayor, que ha hecho recientemente investigaciones con el hierro y el cobre, ha encontrado las siguientes tenacidades, en kilogramos, por milímetro cuadrado.

Hierro a 10°, 60<sup>k</sup>; a 370°, 54<sup>k</sup>; a 500°, 35<sup>k</sup>.

Cobre, 21<sup>k</sup>; - 7<sup>k</sup>,7; -

73. Dinamómetro de M. Perreaux. -M. Perreaux, mecánico de París, ha construido recientemente un nuevo dinamómetro destinado a medir la tenacidad de los cuerpos. Este aparato consiste en un banco de hierro fundido P (fig. 41), sobre el cual se deslizan dos mesas o piezas móviles, cada una de las cuales lleva un muñón *a* y *b*. La primera mesa o carro se halla invariablemente enlazada con un resorte de dos láminas curvas, encerrado en la caja H. Cuando se tira del muñón *a*, corre la mesa que lo lleva, y al alargarse el resorte, transmite el movimiento a una aguja C, que se mueve sobre un cuadrante, e indica en kilogramos la fuerza de tracción.

En cuanto a la mesa que lleva al segundo muñón *b*, posee en su parte inferior una tuerca, en la cual se introduce un tornillo *o*. Cuando se da vueltas al manubrio M, de izquierda a derecha, dicho tornillo hace avanzar la mesa y al muñón *b* hacia la extremidad A del banco. El vástago *m*, situado en el lado del aparato, sirve para amortiguar la detención el resorte que hay debajo del cuadrante. Si en el momento de la rotura se extendiese demasiado bruscamente este muelle, podría romperse; pero lo que hace, es ejercer una presión sobre el vástago *m*, que actúa sobre la pieza *n*, y ésta transmite su movimiento a un volante y por medio de engranajes: de manera que la fuerza viva absorbida por este volante, es la que amortigua el retroceso del muelle.

Esto sentado, a fin de determinar la fuerza necesaria para romper un alambre o cualquiera otra sustancia, se fija una de sus extremidades en el muñón *a*, y la otra en *b*. Dando vueltas entonces lentamente al tornillo, se estira el hilo, la aguja C marcha, y si se continúa girando hasta producir la rotura, la aguja indica en kilogramos la tracción que la ha determinado.

Experimentando con el dinamómetro que acabamos de describir sobre tiras de tela de 40 centímetros de longitud por 5 de ancho, y sobre otras de paño de igual anchura, pero sólo de 10 centímetros de largo, se han obtenido recientemente en el ministerio de la Guerra de Francia, los siguientes resultados:

	Prolongación en el momento de la rotura.	Tracciones que determinan la rotura.
Telas para velas o lonas.	2 centím.	356 kilog.
Tela para tiendas.	3	190
Tela de sábanas para los soldados.	3	120
Tela de camisas para los mismos.	3	100
Paño azul para colegio.	5	25
Id. para la prefectura de policía.	5	30
Papel para billetes de los caminos de hierro.	5	20
Cuerda de piano.	5	100

Dichos experimentos demostraron que los paños de mejor calidad, son los más elásticos, es decir, los que más se alargan antes de romperse.

74. Ductilidad. -Dase el nombre de *ductilidad* a la propiedad que poseen muchos cuerpos de cambiar de forma por efecto de presiones o de tracciones más o menos considerables.

En ciertos cuerpos, como la arcilla y la cera, bastan débiles esfuerzos para cambiar su forma; en otros, v. gr., el vidrio y las resinas, se requiere además la acción del calor; y en los metales, se necesitan poderosos esfuerzos, como la percusión, la hilera o el laminador.

La ductilidad toma el nombre de *maleabilidad*, cuando se determina por medio del martillo. El metal más maleable es el plomo; el más dúctil al laminador, el oro, y a la hilera, el platino.

La gran ductilidad del platino permitió a Wollaston obtener alambres de este metal que no tenían más que 1/1200 de milímetro de diámetro. Para conseguir este resultado, recubría aquel físico con plata un alambre de latino del diámetro de 1/4 de milímetro, formando así un cilindro de 5 milímetros de espesor, con solo el eje de platino. Estirando este cilindro a la hilera hasta que llegase a ser lo más fino posible, se alargaban por igual los dos metales. Haciendo entonces servir el alambre en ácido nítrico, se disolvía la plata, quedando sólo el alambre, de platino. Tan fino era éste, que mil metros no pesaban más que 5 centigramos.

75. Dureza. -La *dureza* es la resistencia que oponen los cuerpos a dejarse rayar o desgastar por otros cuerpos.

Esta propiedad no es más que relativa, porque un cuerpo, duro con relación a una sustancia, es blando respecto a otra. Se distingue la dureza relativa de dos cuerpos, buscando el que raya al otro sin ser rayado por él. Se ha averiguado de esta suerte que el diamante es el más duro de todos los cuerpos, porque él los raya a todos y no es rayado por ninguno. Siguen después el zafiro, el rubí, el cristal de roca, los pedernales, los gres, etc. Los metales en el estado de pureza son bastante blandos.

Las aleaciones son más duras que sus metales. Al efecto, para aumentar la dureza del oro y de la plata, en la joyería y en la fabricación de la moneda, se aúnan con cobre.

La dureza de un cuerpo no está en relación con su resistencia a la presión. El vidrio y el diamante son mucho más duros que la madera, pero resisten mucho menos al choque del martillo.

Se utiliza la dureza de los cuerpos en los polvos para pulimentar, tales como el esmeril, la pómez y el trípoli. El diamante, por ser el más duro de todos los cuerpos, no puede desgastarse o pulimentarse sino por medio de polvo de otro diamante.

76. Temple. -La *templadura* o el *temple* consiste en el enfriamiento brusco de un cuerpo que ha sufrido una alta temperatura. En esta operación adquieren gran dureza el acero y la fundición, y con este objeto sobre todo se usa el temple. Todos los instrumentos cortantes son de acero templado. Pero hay cuerpos en los cuales produce el temple un efecto completamente opuesto. La aleación de los *tantanes*, que se compone de una parte de estaño y cuatro de cobre, se hace dúctil y maleable sin más que enfriarla bruscamente, y al contrario, se vuelve dura y frágil como el vidrio, cuando se la enfría con lentitud.

## Libro tercero

De los líquidos



## Capítulo primero



## Hidrostatica

77. Objeto de la hidrostática. -La *hidrostática* es la ciencia que reconoce por objeto el estudio de las condiciones de equilibrio de los líquidos, y el de las presiones que transmiten, ya en su masa, ya en las paredes de los vasos que los contienen.

La ciencia que trata del movimiento de los líquidos, se denomina *hidrodinámica*, y la aplicación de los principios de esta última ciencia al arte de conducir y de elevar las aguas, se designa especialmente con el nombre de *hidráulica*.

78. Caracteres generales de los líquidos. -Se ha visto ya (5) que los líquidos son cuerpos cuyas moléculas, a consecuencia de una suma movilidad, ceden al más ligero esfuerzo que tiende a moverlas. Su fluidez no es, sin embargo, perfecta, porque se nota siempre entre sus moléculas una adherencia que determina una viscosidad mayor o menor.

La fluidez de los líquidos se encuentra de nuevo, aunque en más alto grado, en los gases; el carácter que distingue a estas dos especies de cuerpos, estriba en que los primeros se hallan dotados de una compresibilidad apenas sensible, mientras que los fluidos aeriformes son eminentemente compresibles y expansibles.

La fluidez de los líquidos se manifiesta por la facilidad con que toman estos cuerpos toda clase de formas, y su débil compresibilidad, se demuestra por el siguiente experimento.

79. Compresibilidad de los líquidos. -En vista del resultado del experimento de los académicos de Florencia, que anteriormente hemos referido (15), se consideraron por largo tiempo los líquidos como completamente incompresibles. Hiciéronse luego sucesivamente varias investigaciones sobre el mismo asunto, en Inglaterra, por Canton, en 1761, y por Perkins, en 1819; en Copenhague, por OErsted, en 1823; y en fin, en 1827, por los señores Colladon y Sturm. De estos diversos experimentos resultó probado, que los líquidos son realmente compresibles.

Los aparatos destinados a medir la compresibilidad de los líquidos, han recibido el nombre de *piezómetros*. Vamos a describir aquí el de OErsted, con las modificaciones que en él ha efectuado M. Despretz. Este aparato se compone de un cilindro de cristal de paredes muy gruesas. Y de un diámetro de 8 a 9 centímetros ([fig. 42](#)). Este cilindro, que se halla completamente lleno de agua, está cerrado en su base por un pie de madera, en el cual se fija sólidamente con mástic, y en su parte superior se ajusta a una pieza cilíndrica de cobre tapada por un platillo, que se destornilla a voluntad. Este platillo lleva un embudo R, que sirve para introducir el agua en el cilindro, y un pequeño cuerpo de bomba en el cual existe un émbolo que lo cierra herméticamente, y que se pone en movimiento por medio de un tornillo de presión P.

En el interior del aparato se ve un depósito de vidrio A, lleno del líquido que se trata de comprimir. Termina en su parte superior por un tubo capilar, que se encorva y se introduce en un baño de mercurio O. Este tubo se encuentra dividido de antemano en partes de igual capacidad; y también se ha determinado el número de estas partes que contiene el depósito A; todo lo cual se obtiene buscando el peso P del mercurio que pueda contener el receptáculo A, y el peso  $p$  del de un cierto número  $n$  de divisiones del tubo capilar. Representando entonces por N el número de divisiones del tubo, contenidas en el depósito, se tiene la igualdad:

$$N/n=P/p;$$

de donde se saca el valor de N.

Por último, en el interior del cilindro existe un *manómetro de aire comprimido*. Así es como se denomina un tubo de vidrio B, cuya extremidad superior está cerrada, y la inferior, que se halla abierta, introducida en el baño de mercurio que se encuentra en el fondo del aparato. Cuando no se ejerce presión alguna sobre el agua que llena el cilindro, el tubo B está completamente lleno de aire; pero luego que por medio del tornillo P y del émbolo se comprime el agua del cilindro, la compresión se trasmite al mercurio que se eleva en el tubo B, comprimiendo el aire que contiene. Una escala graduada C, que existe a lo largo de este tubo, indica la reducción del volumen del aire, y en vista de esta reducción se aprecia la presión que sufre el líquido del cilindro, conforme se demostrará al tratar del manómetro.

Ahora bien; para hacer experimentos con el piezómetro, se principia llenando el depósito A del líquido que se ha de comprimir, y luego, por el embudo R se introduce el agua en el cilindro. Dando entonces vueltas al tornillo P de manera que haga descender el émbolo, ejerce éste una presión sobre el agua y sobre el mercurio del aparato, y por efecto de esta presión, no sólo sube este último líquido en el tubo B, sino también en el tubito capilar soldado al depósito A, conforme se ve en el dibujo. Este ascenso del mercurio en el tubo capilar, indica que el líquido del depósito ha disminuido de volumen dando la medida de su contracción, porque se sabe que aquél contiene N de las divisiones graduadas en el tubo capilar.

OErsted, en sus experimentos, había supuesto que la capacidad del receptáculo A permanecía invariable, porque sus paredes se hallaban exterior e interiormente comprimidas igualmente por el líquido (80). Pero el análisis matemático prueba que, dicho volumen disminuye por efecto de las presiones externas e internas. Tomando en consideración este cambio de capacidad, hicieron los experimentos Colladon y Sturm, quienes encontraron, para una presión ordinaria de la atmósfera y a la temperatura de cero grados, las contracciones siguientes:

Mercurio	5 millonésimas del volumen primitivo.
Agua destilada con aire	49 - -
Id. sin aire	51 - -
Éter sulfúrico	133 - -

Observaron, además, para el agua y el mercurio, que en ciertos límites el decrecimiento del volumen, es proporcional a la presión.

Cualquiera que sea la compresión a la cual se haya expuesto un líquido, la experiencia ha demostrado, que al momento que cesa la presión, el líquido recobra exactamente su volumen primitivo, de lo cual se deduce, que *los líquidos son perfectamente elásticos*.

80. Principio sobre la igualdad de las presiones. -Suponiendo a los líquidos incompresibles, perfectamente fluidos y exentos de gravedad, se ha sentado el siguiente principio: *Los líquidos transmiten con igualdad, en todos sentidos, las presiones ejercidas en un punto cualquiera de su masa*. Este principio se conoce con el nombre de

*principio de la igualdad de las presiones, o sea principio de Pascal, por haber sido el célebre escritor y geómetra (Blas Pascal) el primero que lo formuló diciendo: Que la presión ejercida en un punto cualquiera de la masa de un líquido, se trasmite en todos sentidos con la misma intensidad, sobre toda superficie igual a la que recibe la presión.*

Para comprender este principio, sea un vaso de forma cualquiera, en cuyas paredes existan varias aberturas cilíndricas cerradas por émbolos móviles. Si sobre el émbolo superior A ([fig. 43](#)), se ejerce de fuera hacia adentro una presión cualquiera, de 20 kilogramos, por ejemplo, se trasmite instantáneamente esta presión a la cara interna de los émbolos B, C..., que se ven impelidos de dentro hacia fuera por una presión 20, si su superficie es igual a la del primero; pero si sus superficies son dos, tres veces mayores, la presión transmitida asciende a 40 o 60 kilogramos, es decir, que crece proporcionalmente a la superficie.

Admítase generalmente el principio de igualdad de presión, como una consecuencia de la constitución de los líquidos. Por medio del siguiente experimento se puede demostrar que con efecto se trasmite la presión en todos sentidos, pero no que lo verifique con igualdad. Un cilindro, en el cual se mueve un émbolo ([fig. 44](#)), está terminado por una esfera que lleva varios tubitos adicionales cilíndricos perpendiculares a su superficie. Llenos de agua la esfera y el cilindro, empuja únicamente el émbolo, y el líquido salta por todos los orificios, y no únicamente por el opuesto al émbolo.

Si no es posible dar una demostración experimental satisfactoria, del principio de igualdad de presión, depende de que en los experimentos no está en nuestra mano hacer abstracción del peso de los líquidos, ni del roce de los émbolos que transmiten la presión.

▽△

## **Presiones desarrolladas en los líquidos por la gravedad**

81. Presión vertical de arriba hacia abajo; sus leyes. -Si suponemos dividido en capas horizontales de igual espesor un líquido cualquiera que se halle en reposo en un vaso, es evidente que cada una sostiene el peso de las capas que existen sobre ella. La acción de la gravedad da origen, pues, en la masa del líquido, a presiones internas variables para cada punto. Estas presiones se hallan sometidas a las siguientes leyes generales:

1.<sup>a</sup> *La presión, sobre cada capa, es proporcional a la profundidad.*

2.<sup>a</sup> *Para una misma profundidad, en diferentes líquidos, es proporcional la presión a la densidad del líquido.*

3.<sup>a</sup> *La presión es igual en todos los puntos de una misma capa horizontal.*

Como evidentes pueden admitirse las dos primeras leyes; y la tercera es una consecuencia de la primera y del principio de Pascal.

82. Presión vertical de abajo hacia arriba. -La presión que las capas superiores de un líquido ejercen sobre las inferiores, origina en éstas, de abajo hacia arriba, una reacción

igual y contraria, que es una consecuencia del principio de la transmisión de presión en todos sentidos (80). Esta presión de abajo hacia arriba se designa con el nombre de *empuje de los líquidos*. Es muy sensible cuando se introduce la mano en un líquido, sobre todo si es tan denso como el mercurio.

Para comprobarla experimentalmente, se emplea un tubo de vidrio A abierto por sus dos extremidades ([fig. 45](#)). Después de haber aplicado a su extremidad inferior un disco de vidrio O, que sirve de obturador, y que se sostiene primero por medio de un hilo C, se introduce todo en el agua, soltando luego el hilo. Queda entonces aplicado el obturador al tubo, lo cual indica ya, que él experimenta, de abajo hacia arriba, una presión superior a su peso. Por último, si se echa lentamente agua en el tubo, el disco sostiene entonces el peso de este líquido, no cayendo hasta el momento en que el nivel del agua viene a ser en el interior, sensiblemente el mismo que en el exterior, lo cual demuestra que la presión de abajo hacia arriba, que se ejercía sobre el disco, es igual al peso de una columna de agua que tiene por base la sección interior del tubo A, y por altura la distancia vertical del disco a la superficie superior del líquido en que está metido el tubo. Dedúcese de aquí que el *empuje de los líquidos, en un punto cualquiera de su masa, se halla sometido a las mismas tres leyes, que la presión vertical de arriba hacia abajo* (81).

83. La presión es independiente de la forma de las vasijas. La presión que un líquido ejerce, en virtud de su peso, en un punto cualquiera de su masa o en las paredes del vaso que le contiene, depende, como se ha visto más arriba (81), de la profundidad y de la densidad del líquido, pero *es independiente de la forma del vaso y de la cantidad del líquido*.

Basta demostrar este principio para la presión transmitida al fondo de los vasos, pues la demostración es la misma para una capa cualquiera del líquido. Sea, pues, un vaso cónico *am* ([fig. 46](#)) lleno de agua hasta *o*; para demostrar que, siendo iguales la profundidad y el fondo, la presión que el líquido ejerce es la misma, tanto si el vaso es cónico o cilíndrico, como de otra forma, supongamos dividido el líquido en capas horizontales *ab*, *be*, *ei*, *ip*, *pr*, de un espesor un tan pequeño como se quiera, y no consideremos en cada una de ellas más que la masa cilíndrica figurada con líneas punteadas. En virtud del principio de Pascal (80), como la presión que la primera masa ejerce se transmite a toda la sección *bc*, es claro que ésta sostiene una presión igual, a la de una columna de agua que tuviese por base *bc*, y por altura la de la primera capa. En virtud del mismo principio, la presión ejercida sobre la sección *ed*, es la misma que la de una columna líquida que tuviese por base esta sección, y una altura igual a la suma de las alturas de las dos primeras capas, y así sucesivamente en las secciones *iq*, *pn*, de donde se deduce que el fondo está a su vez oprimido por el peso de una columna de agua, cuya base fuese este fondo, y la altura *om*, lo cual demuestra el principio. La misma demostración sería aplicable si, siendo aún cónico el vaso, estuviese en una posición inversa de la representada en la [fig. 46](#).

Se puede demostrar también de un modo experimental, que la presión sobre el fondo de las vasijas es independiente de su forma, por medio del siguiente aparato debido a M. de Haldat. Este aparato se compone de un tubo acodillado ABC ([fig. 47](#)), terminado en A por una llave de cobre, en cuyo tubo se pueden atornillar sucesivamente dos vasijas M y P, de igual altura, pero de forma y de capacidad diferentes, pues la primera es cónica y la segunda casi cilíndrica. Para hacer el experimento, se principia por echar mercurio en

el tubo ABC, de manera que su nivel no llegue enteramente a la llave A. Atorníllase entonces en el tubo la vasija M, que se llena de agua, y ésta, por su peso, oprime al mercurio y le eleva en el tubo C, en el cual se marca su nivel, por medio de una virola *a*, que puede correr a lo largo del tubo. Señálase al mismo tiempo el nivel del agua en la vasija M con una varilla móvil o situada encima. Hecho esto, se vacía la vasija M abriendo la espita A; se la desatornilla y reemplaza por la vasija P. Echando por fin, agua en ésta, se ve que el mercurio, que había recobrado su primer nivel en las dos ramas del tubo ABC, sube de nuevo en el C, y luego que en la vasija P llega el agua a la misma altura que tenía en la M, lo cual se reconoce por medio de la varilla *o*, adquiere el mercurio en el tubo C el mismo nivel que en el primer caso, según lo indica la virola *a*. Dedúcese de esto, que en ambos casos es idéntica la presión transmitida al mercurio en la dirección ABC. Esta presión es, pues, independiente de la forma del vaso, y por lo tanto de la cantidad del líquido. En cuanto al fondo del vaso, es evidentemente el mismo en los dos casos, o sea la superficie del mercurio en el interior del tubo A.

Tenemos, pues, que con una cantidad muy pequeña de líquido, se pueden producir presiones considerables. Para esto, basta fijar, en la pared de un vaso cerrado, y lleno de agua, un tubo de pequeño diámetro y de gran altura. Lleno este tubo de agua, la presión transmitida sobre la pared del vaso es igual al peso de una columna de agua que tuviera por base esta pared y una altura igual a la del tubo. En nuestra mano está, por lo tanto, aumentarla todo lo que queramos. Así consiguió Pascal que reventara un tonel sólidamente construido, con un simple hilito de agua de diez metros de altura.

En vista del principio que acaba de demostrarse, es fácil calcular las presiones que actúan sobre el fondo de los mares. En efecto, pronto demostraremos que la presión de la atmósfera equivale a la de una columna de agua de diez metros; y como los navegantes han observado con frecuencia que la sonda no llegaba al fondo de los mares a una profundidad de 4000 metros, es evidente, por lo mismo, que el fondo de ciertos mares, resiste una presión superior a la de 400 atmósferas.

84. Presión sobre las paredes laterales. -Las presiones que origina la gravedad en la masa de los líquidos, se transmiten en todos sentidos, según el principio de Pascal, y de consiguiente, resultan de aquí, en cada punto de las paredes laterales, presiones sometidas a las leyes que antes hemos expuesto (81), y que obran siempre perpendicularmente a dichas paredes, sea cual fuere su forma; porque toda presión oblicua a una pared se descompone en dos fuerzas: una perpendicular a la pared, que produce por sí sola una presión, y otra paralela y sin efecto alguno. La resultante de todas estas presiones representa la presión total sobre la pared; pero como estas presiones crecen proporcionalmente a la profundidad, y proporcionalmente también a la extensión de la pared en el sentido horizontal, no se puede encontrar su resultante sino por medio del cálculo, el cual consigna que la presión total, en una porción determinada de pared, *es igual al peso de una columna líquida cuya base fuera dicha porción de pared, y la altura la distancia vertical de su centro de gravedad a la superficie libre del líquido.*

En cuanto al punto de aplicación de esta presión total, punto que se designa con el nombre de *centro de presión*, se encuentra siempre algo debajo del centro de gravedad de la pared. En efecto, si fuesen iguales entre sí las presiones ejercidas en los diferentes puntos de esta última, claro está que el punto de aplicación de su resultante, es decir, el centro de presión, coincidiría con el de gravedad de dicha pared; pero como estas

presiones crecen con la profundidad, el centro de presión se encuentra necesariamente debajo del de gravedad. La posición de este punto se determina, por medio del cálculo, que ofrece los siguientes resultados: 1.º en una pared rectangular, cuyo borde superior está a flor de agua, se halla situado el centro de presión, de arriba hacia abajo, a los  $\frac{2}{3}$  de la línea que une las partes medias de los lados horizontales; 2.º en una pared triangular, cuya base es horizontal, y está a flor de agua, el centro de presión ocupa la parte media de la línea que une el vértice del triángulo con el punto medio de dicha base; 3.º si, siendo aun triangular la pared, se halla a flor de agua el y horizontal la base, el centro de presión está en la línea que une la parte media de esta base con el vértice, y a los  $\frac{3}{4}$  a partir de este punto.

85. Molinete hidráulico. -Siempre que un líquido esté en equilibrio en un vaso, se originan en las paredes opuestas, según cada capa horizontal, presiones iguales y contrarias dos a dos, las cuales se destruyen, de suerte que nada indica entonces que tales presiones existan; pero que se demuestran por medio del *molinete hidráulico*. Consta este aparato de un vaso de vidrio M (fig. 48) dispuesto de modo que pueda girar libremente alrededor de un eje vertical. Este vaso lleva en su parte inferior, perpendicularmente a su eje, un tubo de cobre C, encurvado horizontalmente, y en sentido contrario, en sus dos extremidades. Lleno de agua el aparato, se obtienen en las paredes del tubo inferior presiones interiores que se destruirían como iguales y agua contrarias que son dos a dos, si estuviese perfectamente cerrado el tubo. Pero abierto éste por sus dos extremidades, fluye el líquido, no ejerciéndose ya desde entonces la presión en los orificios abiertos, sino tan sólo en la porción de la pared opuesta A, conforme puede notarse en el lado derecho de la figura. Como deja de equilibrarse ya la presión que se ejerce en A por la presión opuesta, se imprime al tubo y a todo el aparato un movimiento de rotación en el sentido de la flecha A, movimiento que es tanto más rápido, cuanto mayor es la altura del líquido en el vaso, y más considerable la superficie que ofrece la sección de los orificios de salida.

Las presiones laterales han recibido una importante aplicación en los motores hidráulicos conocidos con el nombre de *ruedas de reacción*.

86. Paradoja hidrostática. -Hemos visto más arriba (83) que la presión sobre el fondo de un vaso lleno de líquido, no depende ni de la forma del vaso, ni de la cantidad de líquido, sino solamente de la altura de éste sobre el fondo. No hay que confundir la presión que así se ejerce sobre éste, con la que el mismo vaso origina sobre el cuerpo que le sostiene. Esta última es siempre igual al peso total del vaso y del líquido que éste contiene, mientras que la primera puede ser mayor, menor o igual que este peso, según la forma de la vasija. Designase de ordinario este hecho con el nombre de *paradoja hidrostática*, porque a primera vista parece un enunciado paradójico.

Para darse cuenta de este hecho, sea un vaso CD (fig. 49) compuesto de dos partes cilíndricas de diámetro desigual y lleno de agua hasta el punto *n*. En virtud del principio de que la presión sobre el fondo de un vaso es independiente de la forma del mismo, el fondo del vaso CD sufre la misma presión que si su diámetro fuese por todas partes igual al de su extremo inferior, de lo cual al parecer debía deducirse que, estando colocado el vaso CD en el platillo de una balanza MN, debería acusar ésta el mismo peso que si se pusiese en él un vaso cilíndrico con igual altura de agua, y con un diámetro idéntico al de la parte D en toda su altura. Pero fácilmente se nota que, ejercida la presión por el líquido sobre el fondo del vaso, no se trasmite entera al platillo MN. En

efecto, ateniéndonos al principio de Pascal, la presión producida por la columna de agua *ab* se trasmite de abajo hacia arriba en el interior del vaso a la pared *no*, originando una presión en sentido contrario a la que se ejerce en *m*, la cual reduce la presión, en el platillo MN, al simple peso del vaso CD y al del agua que contiene.

▽△

## Condiciones del equilibrio de los líquidos

87. Equilibrio de un líquido en una sola vasija. -Para que un líquido esté en equilibrio en una vasija de forma cualquiera, ha de satisfacer a las dos condiciones siguientes:

1.<sup>a</sup> *Su superficie, en cada punto, ha de ser perpendicular a la dirección de la resultante de las fuerzas que soliciten las moléculas del líquido.*

2.<sup>a</sup> *Una molécula cualquiera, tomada en la masa, ha de experimentar en todos sentidos presiones iguales y contrarias.*

La segunda condición es evidente en sí misma; porque a no ser iguales y contrarias en dos direcciones opuestas las presiones que se ejercen sobre cualquiera molécula, se vería arrastrada ésta en el sentido de mayor, perdiéndose, por lo tanto, el equilibrio. Esta segunda condición es, por lo demás, una consecuencia del principio de igualdad de presión, y de la reacción que toda presión hace surgir en la masa de los líquidos (82).

Para demostrar que es necesaria la primera condición, supongamos que, representando *mp* la dirección de la resultante de las fuerzas que solicitan una molécula cualquiera *m* de la superficie (fig. 50), se halle inclinada ésta con relación a la fuerza *mp*. Podrá descomponerse entonces ésta en dos fuerzas *mq* y *mf* (28), perpendicular una a la superficie del líquido, y la otra a la dirección *mp*. La primera se destruirá por la resistencia del líquido, mientras que la segunda arrastrará la molécula en la dirección *mf*, con lo cual queda demostrado que es imposible el equilibrio.

Si es la gravedad la fuerza que solicita al líquido, la dirección *mp* es vertical, y entonces, para que haya equilibrio, ha de ser plana y horizontal la superficie libre del líquido (38), por lo menos si se halla contenido éste en una vasija de corta extensión, puesto que en cada punto la dirección de la gravedad es entonces la misma. Pero ya no sucede lo propio en las superficies líquidas de gran extensión, como las de los mares. En efecto, debiendo ser esta superficie perpendicular en cada punto a la dirección de la gravedad, y variando ésta, según los lugares, dirigiéndose siempre sensiblemente hacia el centro de la tierra, resulta que la superficie de los mares modifica su dirección al mismo tiempo que la gravedad, y toma una forma sensiblemente esférica.

Para probar experimentalmente que la plomada en cada lugar, es perpendicular a la superficie de los líquidos que están en equilibrio, se introduce la esfera en el agua, teniendo con la mano la plomada, como representa la fig. 13, y se observa en el agua una imagen del hilo exactamente en línea recta con él, lo cual no podría verificarse si éste no fuese perpendicular a la líquida.

88. Equilibrio de un mismo líquido en muchos vasos comunicantes. -Cuando muchos vasos de forma cualquiera y que contienen el mismo líquido, comunican entre sí, no se establece el equilibrio hasta que satisface el líquido en cada vaso a las dos condiciones anteriores (87), y además, hasta *que las diversas superficies libres del líquido, en todos los vasos, se hallen situadas en un mismo plano horizontal.*

Supongamos, diversos vasos A, B, C D, que comunican entre sí ([fig. 51](#)): si se concibe en el tubo de comunicación *mn* una capa líquida vertical, ésta no podrá estar en equilibrio sino mientras sean iguales y contrarias las presiones que sufre de *m* hacia *n*, y de *n* hacia *m*. Pero se ha visto (84) que estas presiones son respectivamente equivalentes al peso de una columna de agua que tuviese por base la capa que consideramos, y por altura la distancia vertical de su centro de gravedad a la superficie libre del líquido. Así pues, si suponemos un plano horizontal *mn*, trazado por el centro de gravedad de esta capa, se ve que no puede subsistir el equilibrio mientras no sea la misma, en cada vaso, la altura del líquido sobre este plano. Así queda demostrado el principio en cuestión.

También puede deducirse este principio de una construcción semejante a la que hemos hecho ([fig. 46](#)) para demostrar la presión sobre el fondo de los vasos. Aplicando el mismo razonamiento, es fácil comprender que sumándose entre sí las presiones *mn*, *op*, *qr*, *st*, y *uv* ([fig. 52](#)), no serán iguales las que se ejercen en *b* y en *c*, sobre una misma capa horizontal, y por consiguiente, no será posible el equilibrio, sino cuando sea igual la altura en los dos vasos.

89. Equilibrio de los líquidos superpuestos. -Cuando muchos líquidos heterogéneos se hallan superpuestos en una misma vasija, es preciso, para que haya equilibrio, que satisfaga cada uno las condiciones necesarias para el caso de un solo líquido (87), y además, *para que sea estable el equilibrio, deben encontrarse superpuestos los líquidos por orden de densidades decrecientes de abajo hacia arriba.*

Esta última condición se demuestra experimentalmente por medio de la *redoma de los cuatro elementos*. Tal es el nombre que se da a un frasco largo y estrecho, que contiene mercurio, agua saturada de carbonato de potasa, alcohol colorado de rojo y aceite de nafta. Cuando se agita el frasco se mezclan los cuatro líquidos; pero luego que se mantiene en reposo, el mercurio, que es el más denso, cae al fondo, depositándose luego sucesivamente encima del azogue, el agua, el alcohol y el aceite de nafta. Tal es, en efecto, el orden de las densidades decrecientes de estos cuerpos. Con objeto de que no se mezcle el agua con el alcohol, se la satura con carbonato de potasa, porque esta sal no es soluble en el alcohol.

Preciso es referir la separación de los líquidos, en el experimento anterior, a la misma causa que origina el que los sólidos sumergidos en un líquido más denso que ellos, floten en su superficie (98).

En virtud del principio de hidrostática que acabamos de dar a conocer, sobrenada por largo tiempo encima del agua salada del mar, el agua dulce, en la desembocadura de los ríos. Por igual motivo la crema, que es menos densa que la leche, se separa poco a poco de ésta, para situarse en su superficie.

90. Equilibrio de dos líquidos heterogéneos en dos vasos comunicantes. -Cuando dos líquidos de diferentes densidades y sin acción química el uno sobre el otro, se hallan

contenidos en vasos comunicantes, a las condiciones ya conocidas de equilibrio (87), hay que añadir otra, cual es que *las alturas de las columnas líquidas que se equilibran, estén en razón inversa de las densidades de los dos líquidos.*

Para demostrar experimentalmente este principio, se toma un tubo encorvado *mn*, fijo sobre una placa vertical ([fig. 53](#)); se echa en él mercurio, y luego, en una de las ramas AB, se vierte agua. Como la columna de agua AB ejerce en B una presión sobre el mercurio, baja el nivel de éste en la rama AB, y sube en la otra cierta cantidad CD; de suerte que, una vez establecido el equilibrio, si se concibe en B un plano horizontal BC, la columna de agua AB equilibra a la de mercurio DC. Midiendo entonces las alturas DC y AB, por medio de dos escalas fijas paralelamente a las ramas del tubo, se encuentra que la primera es trece veces y media menor que AB. Pronto se verá que la densidad del mercurio es trece veces y media superior a la del agua, y por consiguiente, es evidente que las alturas están en razón inversa de las densidades. Claro está, efectivamente, que, debiendo ser iguales las presiones sobre una misma capa horizontal BC, no puede realizarse este resultado, mientras no se gane en altura lo que se pierde en densidad.

Puede deducirse de un cálculo muy sencillo el principio anterior. Para esto, sean  $d$  y  $d'$  las densidades del agua y del mercurio,  $a$  y  $a'$ , las alturas de estos líquidos que se hacen equilibrio, y por fin  $g$  la intensidad de la gravedad. Siendo la presión en B proporcional a la densidad del líquido que se encuentra encima, a su altura y a la intensidad de la gravedad, dicha presión tiene por medida el producto  $dga$ . Por igual motivo, la presión que se ejerce en C tiene por medida  $d'ga'$ . Pero cuando hay equilibrio, estas presiones son iguales; se tiene, pues,  $dga = d'ga'$ , o  $da = d'a'$ , suprimiendo el factor común  $g$ . Esta última igualdad no es más que la expresión del principio que se trataba de demostrar, porque, debiendo permanecer siempre iguales entre sí los dos productos  $da$  y  $d'a'$  es claro que cuanto mayor sea  $d'$ , con respecto a  $d$ , tanto menor será  $a'$  con respecto a  $a$ .

Este principio de hidrostática puede servir para determinar la densidad de un líquido. En efecto, supongamos que una de las ramas del tubo anterior contiene agua, y la otra aceite, y que las alturas respectivas de las columnas líquidas que se equilibran sean 38 centímetros para el aceite y 35 para el agua. Tomada como unidad la densidad de ésta, representando por  $x$  la del aceite, se tiene

$$38 \times x = 35 \times 1, \text{ de donde } x = 35/38 = 0,92.$$

▽△

## **Aplicaciones de los principios de hidrostática que quedan expuestos**

91. Prensa hidráulica. -El principio de igualdad de presión (80) ha recibido una importante aplicación en la *prensa hidráulica* cuya teoría debemos a Pascal, pero que fue construida por vez primera en Londres, en 1796, por Bramah.

Este aparato, por medio del cual se pueden producir enormes presiones, se compone de un cuerpo de bomba o cilindro B, de paredes muy resistentes ([fig. 54](#)). En este cuerpo de bomba sube y baja, a frotamiento dulce, un largo cilindro P, de hierro fundido, que hace el oficio de émbolo, pero sin tocar las paredes del cuerpo de bomba más que en su parte superior. El pistón o émbolo P sustenta un plato de hierro fundido, que sube y baja con él, guiándolo en su carrera cuatro columnas del mismo metal, sobre las cuales

encaja en cada uno de sus ángulos. Estas mismas columnas sostienen un segundo plato Q, a las que está fijo: entre este último y el plato móvil, se colocan los cuerpos que se tratan de comprimir.

La subida del pistón P se obtiene del modo siguiente: al cuerpo de bomba B, estando lleno de agua, se le trasmite la presión por medio de una bomba impelente A, que se denomina la *bomba de inyección*, y que está en comunicación con el cuerpo de bomba B por medio de un tubo metálico K. La bomba A funciona por medio de una palanca M. Cuando su émbolo  $p$  sube, se origina debajo un vacío, y el agua contenida en el receptáculo H es aspirada por un tubo  $a$ , terminado por una cavidad hemisférica agujereada como las regaderas, y que tiene por objeto impedir el paso de los cuerpos extraños que pueden encontrarse en el agua. Cuando el émbolo  $p$  vuelve a bajar, repele el agua al cuerpo de bomba B por el tubo K.

La [fig. 55](#) representa, en corte y en mayor escala, el sistema de válvulas necesarias para la manipulación del aparato. La válvula  $c$  se abre cuando el émbolo  $p$  se eleva, y se cierra cuando aquél baja. Pero entonces la válvula  $o$  asciende por el empuje del agua, la cual pasa en seguida por el conducto K. La válvula  $i$  es una válvula de seguridad, mantenida por un peso que actúa sobre ella por medio de una palanca ([fig. 54](#)). Cargándola más o menos, se puede limitar la presión; porque en el momento en que sufra de abajo hacia arriba una presión mayor que su carga, se levanta y deja salir el agua. Un tornillo  $r$ , que se afloja a voluntad, sirve para verificar la depresión, dejando paso al agua para que del cuerpo de bomba vuelva al receptáculo H. En fin, cuando se quieren conservar los objetos en prensa durante algún tiempo, se aprieta un tornillo  $h$  que cierra la válvula  $o$ .

Existe todavía una pieza que merece describirse: ésta es el *anillo de cuero moldeado*. Llámase así un cuero grueso, embebido de grasa, e impermeable al agua, que sirve para cerrar herméticamente el cuerpo de bomba B. Este cuero, que está moldeado en forma de U invertida, se arrolla circularmente en una cavidad  $n$  practicada en lo alto de la pared del cuerpo de bomba. Cuanto más se comprima el agua en éste, con mayor fuerza se adhiere el cuero al pistón y al cuerpo de bomba, oponiéndose así a que se escape el agua.

La presión que puede obtenerse por medio de la prensa hidráulica, depende de la relación entre la sección del pistón P y la del émbolo  $p$ . Si la primera es 50 o 100 veces mayor que la segunda, la presión sufrida de abajo hacia arriba por el gran pistón, será 50 o 100 veces la que se ejerza sobre el pequeño. Todavía se consigue mayor ventaja a consecuencia del uso que se hace de la palanca. Si, por ejemplo, el brazo de palanca de la potencia vale tanto como cinco veces el de la resistencia, el efecto producido es 5 veces mayor (45). Por consiguiente, si un hombre ejerce sobre M un esfuerzo de 30 kilog., el efecto trasmitido por el émbolo  $p$  será de 150 kilog., y el que trasmitirá el pistón P será de 45,000 kilog., suponiendo su acción igual a 100 veces la del pequeño.

Es menester observar que, cuanto mayor sea el diámetro del pistón P con relación al del émbolo  $p$ , tanto más lenta será la marcha del primero con relación a la del segundo, es decir, que *lo que se gana en fuerza, se pierde en velocidad*. Tal es, en efecto, un principio general de mecánica, que se verifica en todas las máquinas.

Sirve la prensa hidráulica en todos los trabajos que exigen grandes presiones, como en el batanado de los paños, en la extracción del jugo de las remolachas y del aceite de las semillas oleaginosas. Utilízase también para probar los cañones, las calderas de vapor y las cadenas destinadas para la marina.

92. Nivel de agua. -El *nivel de agua* es una aplicación de las condiciones de equilibrio en vasos comunicantes (88). Compónese de un tubo de hoja de lata o de latón, encorvado en ángulo recto en sus dos extremidades, en las cuales se adaptan dos tubos de vidrio D y E ([figura 56](#)). Se le coloca horizontalmente sobre un trípode, y se vierte agua en él hasta que ascienda en los dos tubos de vidrio. Una vez establecido el equilibrio, el nivel del agua es el mismo en ambos tubos, es decir, que las superficies del líquido en D y E se encuentran en un mismo plano horizontal.

Sirve este instrumento en las nivelaciones, es decir, para determinar la diferencia de altura de dos puntos. Por ejemplo, si se desea saber cuánto más alto está un punto B del suelo que otro A, se coloca en este punto una *mira*. Tal es el nombre que se da a una regla de madera terminada por una placa metálica M, llamada *vivo*, con un punto en su centro que sirva para dirigir la visual. Dispuesta verticalmente esta mira en A, un observador dirige por las superficies D y E una visual a la mira, mandando al auxiliar que la suba o baje asta que la visual DE vaya a dar al centro de la placa. Midiendo entonces la altura AM, y restando la del nivel sobre el suelo, se conoce cuánto más alto se halla el punto B respecto del A.

Este nivel así determinado es el *aparente*, es decir, el que corresponde a puntos comprendidos en un plano tangente a la superficie del globo, supuesto perfectamente esférico. El *nivel verdadero* es el que corresponde a puntos igualmente distantes del centro de la tierra. Sólo para cortas distancias se puede tomar como verdadero el nivel aparente.

93. Nivel de aire. -El *nivel de aire* es más sencillo y más exacto que el de agua. Consiste simplemente en un tubo de vidrio AB ([fig. 57](#)), muy ligeramente encorvado, que se llena de agua, no dejando en él más que una burbujita de aire que tiende siempre a ocupar la parte más alta (89). Cerrado a la lámpara este tubo por sus dos extremidades, se le coloca en un estuche o caja de cobre CD ([fig. 58](#)) fijo sobre un montante del mismo metal, de manera que, cuando se apoye sobre un plano horizontal P, la burbuja de aire M se pare exactamente entre dos señalitas marcadas en la caja.

Para nivelar con este aparato, se fija en un anteojo cuyas posiciones horizontales indica.

94. Corrientes de agua, pozos artesianos. -Los lagos, los mares, las fuentes y los ríos, son otros tantos vasos comunicantes, en los cuales tienden las aguas sin cesar a tomar un nivel verdadero (92).

Otro tanto diremos de los *pozos artesianos*, así llamados porque se practicaron por vez primera en la antigua provincia de Artois. Algunos se encuentran allí que deben datar de fines del siglo XII, si bien en una época mucho más remota, se abrieron ya pozos de este género, en la China y en el Egipto.

Estos pozos, son perforaciones muy estrechas que se hacen con la sonda, siendo variable su profundidad. Sus aguas tienden generalmente a saltar. Para comprender su

teoría, téngase presente que los terrenos que componen la corteza del globo, unos son permeables a las aguas, como las arenas y las gravas, y otros impermeables, como las arcillas. Ahora bien: supongamos una región geográfica más o menos extensa, debajo de la cual se encuentren dos capas impermeables AA, BB ([fig. 59](#)), que comprendan entre sí una capa permeable MM; y supongamos también, finalmente, que se halle esta última en comunicación con terrenos más altos, al través de los cuales se infiltre el agua de las lluvias. Ésta, siguiendo la pendiente natural del terreno, al través de la capa permeable, se va a la parte inferior de la región geográfica que hemos supuesto, pero sin poder comunicar con ella, porque se lo impide la capa impermeable AA. Mas si a partir del suelo se practica un agujero que atravesase esta capa, las aguas, que tienden siempre a ponerse a nivel, suben por este agujero a una altura tanto mayor, cuanto más alto es el terreno con el cual comunican.

Las aguas que alimentan a los pozos artesianos vienen a menudo de 20 o 30 leguas. En cuanto a su profundidad, varía con las localidades. El pozo perforado en Grenelle tiene 548 metros de profundidad, da 3000 litros por minuto, y es uno de los más abundantes y profundos que se conocen. El agua que arroja tiene  $27^{\circ}$  en todas las estaciones. En virtud de la ley del aumento de la temperatura de las capas terrestres a medida que nos separamos del nivel del suelo, bastaría que fuese la profundidad de dicho pozo 150 metros mayor, para que tuvieran sus aguas todo el año  $32^{\circ}$ , es decir, la temperatura ordinaria de los baños.

▽△

## Cuerpos sumergidos en los líquidos

95. Presiones que experimenta un cuerpo sumergido en un líquido. -Cuando un cuerpo sólido se halla enteramente sumergido en un líquido, experimenta en cada punto de su superficie, presiones que le son respectivamente perpendiculares y que crecen con la profundidad. Supónganse descompuestas todas estas presiones en unas horizontales y otras verticales: las primeras serán en cada capa horizontal iguales y contrarias dos a dos, equilibrándose por lo mismo. Y por lo que toca a las presiones verticales, se nota fácilmente que son desiguales y que tienden a mover de abajo hacia arriba al cuerpo sumergido.

Sea, en efecto, un cubo sumergido en una masa de agua ([fig. 60](#)), supónganse verticales, para mayor sencillez, sus paredes laterales. Éstas sufren idénticas presiones, porque presentan la misma superficie y se hallan a igual profundidad (84). Es evidente, por otra parte, que las presiones de dos caras opuestas son contrarias, y que se equilibran. Si consideramos ahora las presiones que se desarrollan en las caras horizontales A y B, veremos que la primera está impelida de arriba hacia abajo por el peso de una columna de agua que tuviese por base la misma cara, y por altura AD (81); así como la cara inferior se halla oprimida de abajo hacia arriba por el peso de una columna de agua cuya base fuera dicha cara y la altura BD (82). Tiende, pues, el cubo a elevarse por la diferencia de estas dos presiones, la cual será evidentemente igual al peso de una columna de agua que tuviese la base y la altura iguales a las del cubo: por consiguiente, *esta presión equivale al mismo peso del volumen de agua desalojada por el cuerpo sumergido.*

Todavía se puede deducir, por el siguiente raciocinio, que todo cuerpo sumergido en un líquido sufre, de abajo hacia arriba, una presión igual al peso del líquido que desaloja. En efecto, en una masa líquida que esté en equilibrio, consideremos una porción de líquido de una forma cualquiera esférica, ovoide o irregular, y su supongámosla solidificada sin aumento ni disminución de volumen. Es evidente que la parte así solidificada sufrirá, de la parte de la masa líquida, las mismas presiones que antes, y que, por consiguiente, estará todavía en equilibrio; lo cual sólo puede cumplirse porque sufre, de abajo hacia arriba, una presión igual a su peso. Pero si en el lugar de la parte solidificada se imagina un cuerpo diferente, pero del mismo volumen e igual forma, este cuerpo sufrirá necesariamente las mismas presiones que el líquido solidificado, y desde entonces, él mismo estará sometido a una presión igual al peso del líquido desalojado.

96. Principio de Arquímedes. -En virtud de lo que precede, todo cuerpo sumergido en un líquido está sometido a la acción de dos fuerzas opuestas; la gravedad que tiende a hacerle descender, y el empuje del líquido que trata de elevarle con un esfuerzo igual al peso mismo del líquido que el cuerpo desaloja. El peso de éste queda destruido, por lo tanto, en parte o por completo, por este empuje, de donde se deduce que *un cuerpo sumergido en un líquido pierde una parte de su peso igual al peso del líquido desalojado*.

Este principio, que sirve de base a la teoría de los cuerpos sumergidos y de los cuerpos flotantes, se conoce con el nombre de *principio de Arquímedes*, por haberle descubierto aquel célebre geómetra que murió en Siracusa, 212 años antes de la era cristiana.

El principio de Arquímedes se demuestra experimentalmente por medio de la *balanza hidrostática*, que es una balanza común, con un gancho en cada platillo, y con la cruz que puede subir mediante una barra dentada, con la cual engrana el piñón C (fig. 61). Un muelle D retiene la barra dentada cuando se la eleva. Una vez elevada la cruz, se suspende debajo de uno de los platillos un cilindro hueco A, de cobre, y debajo de éste un cilindro macizo B, cuyo volumen sea exactamente igual a la capacidad del primero; y luego, en el otro platillo se colocan pesas hasta establecer el equilibrio. Si se llena de agua entonces el cilindro A, el equilibrio se destruye; pero si se baja al mismo tiempo la cruz, de manera que el cilindro B entre por completo en el agua de una vasija situada debajo, se restablece el equilibrio. El cilindro B pierde pues, por su inmersión, una parte de su peso igual al del agua vertida en el A. Así queda demostrado el principio de Arquímedes, porque la capacidad de este último cilindro es precisamente igual a volumen del cilindro B.

97. Determinación del volumen de un cuerpo. -El principio de Arquímedes da el medio de obtener, con precisión el volumen de un cuerpo, por irregular que sea su forma, cuando no es soluble en el agua. Al efecto se le suspende, por medio de un hilo delgado, de un ganchito de la balanza hidrostática, pesándole primero en el aire, y luego en el agua destilada y a 4°. La pérdida de peso que se nota es el peso del agua desalojada; de él se deduce su volumen, y por lo mismo el del cuerpo sumergido, que es evidentemente idéntico. Sean, por ejemplo, 155 gramos la pérdida de peso. Esto indica que el agua desalojada pesa 155 gramos, pero se sabe que el gramo es el peso de un centímetro cúbico de agua destilada y a 4°; luego el volumen del agua desalojada, y por lo tanto, el del cuerpo sumergido, es de 155 centímetros cúbicos.

98. Equilibrio de los cuerpos sumergidos y de los flotantes. -En vista de las consideraciones teóricas que nos han conducido al principio de Arquímedes (95 y 96), si un cuerpo sumergido en un líquido tiene la misma densidad que éste, el empuje que tiende a elevar a dicho cuerpo, es igual a su propio peso. El cuerpo queda, pues, en suspensión en el seno del líquido.

Pero si el cuerpo es más denso que el líquido, cae, porque su peso excede al empuje de abajo hacia arriba.

Por último, si el cuerpo sumergido es menos denso que el líquido, predomina el empuje: adquiere el cuerpo un movimiento ascensional y sale fuera del líquido hasta no desalojar más que un volumen de un peso igual al suyo. Dícese entonces que el cuerpo *flota*. La cera, la madera y todos los cuerpos que sean más ligeros que el agua, flotan en su superficie.

Para que los cuerpos, sumergidos o flotantes, se hallen en equilibrio estable, es preciso: 1.º *que desalojen un peso de líquido igual al suyo*; 2.º *que su centro de gravedad esté debajo del de presión* (84) *y en la misma vertical*. En efecto, sean *c* el centro de presión y *g*, el de gravedad de un cuerpo flotante (fig. 62): si están satisfechas las dos condiciones apuntadas, las fuerzas aplicadas en *e* y en *g* que son iguales y contrarias, se destruyen y hay equilibrio. Además, este equilibrio es estable, porque si se inclina el cuerpo (fig. 63), las fuerzas aplicadas en *c* y en *g* tienden evidentemente a devolverle la posición vertical. Pero si el centro de presión está debajo del de gravedad, sólo puede haber equilibrio inestable cuando los puntos *g* y *e* se encuentren en la misma vertical, pues luego que se incline el cuerpo (fig. 64), las acciones de ambas fuerzas concurren a darle su posición primera (fig. 62). Con todo, se demuestra en mecánica, que puede haber equilibrio estable cuando el centro de presión se encuentra más bajo que el de gravedad. Mas es indispensable que se halle, entonces debajo de cierto punto que se llama *metacentro*, y que se determina por el cálculo. Es de alta importancia el conocimiento de estos puntos en el arreglo de la carga de los buques, porque de su posición relativa depende la estabilidad.

Los cuerpos flotan con tanta mayor facilidad en la superficie de los líquidos, según el principio de Arquímedes, cuanto mayor sea la densidad relativa de los mismos. Póngase, por ejemplo, un huevo en agua ordinaria, y se va al fondo, porque pesa más a igualdad de volumen; pero métasele en agua saturada de sal, y sobrenadará. Un pedazo de roble flota en el agua, y se sumerge en el aceite. Una masa de hierro sobrenada en una masa de mercurio, y se va inmediatamente al fondo en el agua. En cuanto al volumen de la parte sumergida en los cuerpos flotantes, está en razón inversa de la densidad del líquido, y directa de la del cuerpo flotante.

99. Ludión. Los diversos efectos de suspensión, de inmersión y de flotación en un líquido, se reproducen en el aparatito llamado *ludión* (fig. 65)<sup>(1)</sup>. Consta de una probeta de vidrio llena en parte de agua, cerrada herméticamente por un cuerpo de bomba con su émbolo. En el líquido hay una figurita de esmalte sostenida por una esfera de vidrio hueca *a*, que contiene aire y agua, y que flota en la superficie. Esta esfera lleva en su parte inferior una pequeña abertura que da paso al agua, según esté más o menos comprimido el aire. La cantidad de agua, previamente introducida en la esfera, es tal, que basta un corto exceso de peso para que se vaya al fondo todo el aparato. Si se aprieta un poco con la mano (fig. 65), se comprime al aire interior, y trasmite su presión

al agua y al aire de la esfera, por lo que penetra en esta cierta cantidad de líquido, que hace más pesado al cuerpo flotante, y le sumerge. Cuando cesa la presión, el aire de la esfera recobra su primitivo volumen y expulsa parte del agua, volviendo el cuerpo a flotar.

100. Vejiga natatoria de los peces. -Muchas especies de peces llevan en el abdomen, debajo del espinazo, una vejiga llena de aire que se denomina *vejiga natatoria*. El pez la comprime o la dilata por un esfuerzo muscular para variar su volumen y producir efectos análogos a los del ludión; es decir, que sube y baja a voluntad en el seno de las aguas.

101. Natación. -El cuerpo humano, en igualdad de volumen, es generalmente más ligero que el agua dulce, y así es que puede flotar naturalmente en este líquido, y mejor aún en el agua salada del mar, que es más densa. La dificultad de la natación consiste, pues, menos en mantenerse en la superficie del agua, que en conservar fuera del líquido la cabeza, a fin de que sea libre la respiración. El hombre debe aprender la natación; porque la cabeza tiende siempre a sumergirse por tener más peso relativamente que los miembros inferiores. En los cuadrúpedos, al contrario, la cabeza puede permanecer sin esfuerzo alguno fuera del agua, por pesar menos que la parte posterior del cuerpo. Y he aquí por qué nadan naturalmente estos animales.

▽△

## **Pesos específicos, areómetros de volumen constante**

102. Determinación de pesos específicos. -Se ha visto ya (41) que el peso específico de un cuerpo, sólido o líquido, es un número que expresa cuánto pesa, en igualdad de volumen, un cuerpo con relación al agua destilada y a 4°. En virtud de esta definición, para calcular el peso específico de un cuerpo, basta determinar su peso y el de un volumen igual de agua, dividir luego el primer peso por el segundo, y el cociente es el peso específico pedido, sirviendo de unidad el del agua.

Tres son los métodos en uso para determinar los pesos específicos de los sólidos y de los líquidos, a saber: el método de la balanza hidrostática, el de los areómetros, y el del frasco. Todos se reducen a buscar el peso del cuerpo, y luego el de un volumen igual de agua. Vamos a aplicarlos sucesivamente, primero a la investigación del peso específico de los sólidos y luego a la de los líquidos.

103. Pesos específicos de los sólidos. -1.º-*Método de la balanza hidrostática*. -Para obtener el peso específico de un sólido por medio de la balanza hidrostática ([fig. 61](#)), se pesa primero dicho cuerpo en el aire, y suspendiéndole del gancho del platillo, se le pesa en el agua. La pérdida de peso es, según el principio de Arquímedes, el de un volumen de agua igual al del cuerpo: por lo tanto dividiendo el peso del cuerpo en el aire, por la pérdida de peso que experimenta en el agua, el cociente será el peso específico pedido (102).

Si P representa el peso del cuerpo en el aire, P' su peso en el agua, y D su peso específico, el peso del agua desalojada, siendo  $P - P'$ , se tiene  $D = P / P - P'$ .

2.º *Método del areómetro de Nicholson.* -El *areómetro de Nicholson* es un aparato flotador que sirve para determinar los pesos específicos de los sólidos. Consta de un cilindro hueco B de hojalata (fig. 66) terminado por un cono C lleno de plomo. Tiene éste por objeto lastrar el aparato de manera que su centro de gravedad se encuentre debajo del de presión, que es requisito necesario para la estabilidad del equilibrio (98). En la parte superior termina el aparato por un vástago y un platillo A, que recibe las pesas y el cuerpo cuyo peso específico se busca. Finalmente, en el vástago se nota un *punto de enrase*, en *o*, que sirve para indicar cuándo el aparato está sumergido según la misma cantidad.

Para proceder al experimento, se busca primero el peso que necesita el platillo A para el enrase del areómetro, pues, cuando está vacío, sale en gran parte fuera del agua. Si este peso es, por ejemplo, de 125 gramos, y si se busca el peso específico del azufre, se toma un fragmento de éste que no llegue a 125 gramos, se le coloca en el platillo A, y se añaden pesas hasta que enrase de nuevo el areómetro. Si ha habido que añadir, v. gr., 55 gramos, claro está que el peso del azufre es la diferencia entre 125 y 55, es decir, 70 gramos. Determinado así, el peso del azufre al aire libre, falta buscar el de un volumen igual de agua. Al efecto, se traslada el pedazo de azufre del platillo A al inferior C, en el punto *m*, y a pesar de que no varió el del instrumento, se nota que no enrassa, porque el azufre pierde dentro del agua una parte de su peso igual al del agua desalojada. Si para restablecer el enrase hay que añadir 34<sup>gr</sup>,4, este número será el que represente el peso de un volumen de agua igual al del azufre. Divídase, pues, el peso 70 gramos del azufre al aire libre por 34<sup>gr</sup>,4, y resultará 2,03, peso específico del azufre.

Si la sustancia cuyo peso específico se busca es más ligera que el agua, tiende a sobrenadar, y no se queda en el platillo inferior C; pero entonces se le añade a éste una rejilla de alambre, que se opone al ascenso del cuerpo, y la experiencia se efectúa como antes.

3.º *Método del frasco.* -Recúrrase especialmente a este método para los cuerpos en estado pulverulento. Se emplea un frasco pequeño, de ancha boca y de tapón bien esmerilado para que cierre con exactitud. Averiguado el peso del polvo del cuerpo del cual se trate, se le coloca en el platillo de una balanza junto con el frasquito, exactamente lleno de agua, cerrado y bien enjuto. Se les equilibra en el otro platillo con granalla de plomo, y en seguida se echa el polvo en el frasco, se vuelve a tapar bien, a fin de que no quede aire en el frasco y se pesa nuevamente en el plato en el cual se había colocado en un principio. Falta entonces el equilibrio, porque el polvo ha expulsado cierta cantidad de agua, y los gramos que se añaden para restablecerle, indican el peso de un volumen de agua igual al del polvo. El cálculo que debe hacerse en seguida es el mismo que en los dos métodos anteriores.

En este experimento conviene expulsar una corta cantidad de aire que se adhiere a las moléculas del polvo y que les hace desalojar un volumen demasiado considerable de agua. Con este objeto, después de echado el polvo en el frasco, se le coloca debajo del recipiente de la máquina neumática y se hace el vacío, para expeler el aire en virtud de su fuerza elástica. Igual resultado se obtendría haciendo hervir el agua en la cual se haya arrojado el polvo.

104. Cuerpos solubles en el agua. -Dado caso que el cuerpo cuyo peso específico se desea conocer, sea soluble en el agua, sustituiremos ésta por otro líquido en que no lo

sea, el alcohol, por ejemplo, y buscando en seguida el peso específico de éste con relación al del agua, se obtiene el de la sustancia en cuestión, multiplicando su peso específico respecto del alcohol por el de este líquido relativamente al agua.

En efecto, sean, según volúmenes iguales, P el peso de la sustancia soluble, P' el del alcohol, y P'' el del agua; P/P' será el peso específico de la sustancia con relación al alcohol, y P'/P'' el de éste relativamente al agua. El producto de estas dos fracciones, suprimido el factor común P', es P/P'', que representa efectivamente el peso específico de la sustancia soluble con relación al agua.

*Pesos específicos de los sólidos a cero grados, sirviendo de unidad el agua destilada y a 4°.*

Platino laminado.	23,069	Mármol estatuario.	2,837
-forjado.	19,500	Cristal de roca puro.	2,653
Oro forjado.	19,362	Vidrio de S. Gobain.	2,488
-fundido.	19,258	Porcelana de China.	2,385
Plomo fundido.	11,352	-de Sèvres.	2,146
Plata fundida.	10,474	Azufre nativo.	2,033
Bismuto fundido.	9,822	Marfil.	1,917
Cobre pasado por la hilera.	8,878	Antracita.	1,800
-fundido.	8,788	Hulla compacta.	1,329
Latón.	8,383	Succino.	1,078
Acero no templado.	7,816	Hielo fundente.	0,930
Hierro laminado.	7,788	Haya.	0,852
-forjado.	7,207	Fresno.	0,845
-fundido.	7,053	Tejo.	0,807
Estaño fundido.	7,291	Olmo.	0,800
Zinc fundido.	6,861	Manzano.	0,733
Antimonio fundido.	6,712	Abeto amarillo.	0,657
Diamantes (los más pesados).	3,531	Álamo blanco de España.	0,529
Diamantes (los más ligeros).	3,501	-común.	0,389
Flint-glass.	3,329	Corcho.	0,240

105. Pesos específicos de los líquidos. -1.º *Método de la balanza hidrostática.* -En el gancho de uno de los platillos de la balanza se suspende un cuerpo sobre el cual no ejerza ninguna acción química el líquido cuyo peso específico se va a averiguar, como por ejemplo, una esfera de platino. Pesando sucesivamente esta esfera en el aire, en el agua destilada a 4°, y luego en el líquido dado, se nota la pérdida de peso de dicha masa en éste y en aquélla, obteniendo así dos números que representan, en igualdad de volúmenes, el peso del agua y el del líquido en cuestión, y por lo tanto, no hay más que dividir el segundo peso por el primero.

Sean P el peso de la esfera de platino aire libre, P', su peso en el agua, P'' en el líquido dado, y D peso específico de éste: el peso del agua desalojada por la esfera de platino es P-P', y el del segundo líquido P-P'', de donde  $D = \frac{P - P''}{P - P'}$ .

2.º *Método del areómetro de Fahrenheit.* -El areómetro de Fahrenheit ([fig. 67](#)) es un flotador destinado a determinar los pesos específicos de los líquidos. Su forma es análoga a la del areómetro de Nicholson; pero en vez del platillo inferior sustenta una esfera de vidrio llena de mercurio, y en su vástago se nota igualmente el punto de enrase.

Determinase primero con precisión el peso del areómetro, y luego se le hace flotar en una probeta llena de agua, colocando en el platillo superior las pesas necesarias para el enrase. En virtud de la primera condición del equilibrio de los cuerpos flotantes (98), el peso del areómetro, más el que hay en la cápsula, equivalen al de un volumen de agua igual al de la parte sumergida del aparato. Determinando del mismo modo el peso de un volumen igual del líquido dado, sólo falta luego dividir el segundo peso por el primero.

Ni el areómetro de Fahrenheit, ni el de Nicholson ofrecen la misma precisión que la balanza hidrostática, para la determinación de los pesos específicos.

3.º *Método del frasco.* -Consiste este método en tomar un frasquito de vidrio con tapón esmerilado, y pesarle sucesivamente vacío, lleno de agua, y por fin, lleno del líquido sometido al experimento. Restando de todos los resultados el peso del frasco, se tiene, según un mismo volumen, el peso del agua y el del líquido, con cuyos datos se deduce el peso específico que se buscaba.

106. Temperatura que hay que observar en la investigación de los pesos específicos. -Como el volumen de los cuerpos aumenta con la temperatura, y como varía este aumento según los cuerpos, claro está que el peso específico de una sustancia no es rigurosamente el mismo a diversas temperaturas. Por ser así, debe elegirse una temperatura constante para la determinación de los pesos específicos, habiéndose convenido en la del agua a 4º, porque corresponde a su máximo de densidad. En cuanto a los demás cuerpos, sólidos o líquidos, se les supone a cero. En general no se satisfacen estas condiciones cuando se determina un peso específico, por lo cual es preciso hacer correcciones, que daremos a conocer en el tratado del calórico.

*Peso específico de los líquidos a cero, siendo la unidad el del agua destilada y a 4.º*

Mercurio.	13,598	Agua destilada y a 4º.	1,000
Ácido sulfúrico.	1,841	- - a 0º.	0,999
-clorhídrico.	1,24	Aceite de olivas.	0,915
-nítrico.	1,217	Esencia de trementina.	0,870
Leche.	1,03	Aceite de nafta.	0,847
Agua de mar.	1,026	Alcohol absoluto a 15º.	0,792
Vino de Burdeos.	0,994	Éter sulfúrico.	0,715

107. Usos de las tablas de los pesos específicos. -Numerosas son las aplicaciones que ofrecen las tablas de los pesos específicos. En mineralogía dan un carácter distintivo para reconocer las especies minerales por su densidad, y sirven además para averiguar el peso de un cuerpo cuyo volumen es conocido, o recíprocamente para calcular el volumen, dado el peso.

En efecto, siendo respectivamente el gramo y el kilogramo el peso de un centímetro y de un decímetro cúbicos de agua, es claro que un volumen de este líquido, medido en centímetros cúbicos, pesa tantos gramos como centímetros contiene, y que si se mide el volumen en decímetros cúbicos, pesa el agua el mismo número de kilogramos que decímetros mide. Se tiene, pues, para el agua, la fórmula  $P=V$ , siempre que de peso sirvan gramos o kilogramos, y se cuente por centímetros o decímetros en cúbicos el volumen. Ahora bien; como el peso específico de un cuerpo no es más que un número que establece cuánto pesa dicho cuerpo con relación al agua, es consiguiente que un cuerpo que tiene un peso específico dos, tres veces mayor que el agua, pese también dos, tres veces más. Por lo tanto, si representamos el peso específico por  $D$ , la fórmula  $P=V$  se transforma, para los demás cuerpos, en  $P=VD$ . Es decir, que *el peso relativo de un cuerpo es igual al producto de su volumen por su peso específico.*

De la fórmula  $P=VD$ , se deduce  $V=P/D$ , fórmula que expresa el volumen en centímetros o en decímetros cúbicos, según se dé en gramos o en kilogramos el peso.

Como aplicación de la fórmula  $P=VD$ , propongámonos calcular el diámetro interior de un tubo de vidrio. Al efecto, se introduce en este tubo una columna de mercurio, cuya longitud y peso a cero se determinan

con exactitud. Como se puede considerar muy sensiblemente cilíndrica dicha columna de mercurio, se tiene, según la fórmula geométrica que da la capacidad de los cilindros,  $V = p r^2 a$ , siendo  $r$  el radio del cilindro,  $a$  su altura y  $p$  la relación de la circunferencia al diámetro. Reemplazando  $V$  por su valor, en la igualdad  $P = VD$ , sale  $P = p r^2 a D$ , de donde  $r = \sqrt[3]{P/p a D}$ .

De un modo análogo se calcularía el diámetro de un alambre metálico muy fino.

La fórmula  $P = VD$  sirve para investigar el peso relativo de un cuerpo, mientras que las  $P = VDg$  y  $P = Mg$ , dadas anteriormente (41), representan el peso absoluto.

▽△

## Areómetros de volumen variable

108. Diferentes especies de areómetros. -Los areómetros de Nicholson y de Fahrenheit, que ya conocemos, se denominan *de volumen constante* y *de peso variable*, porque siempre se sumergen igual cantidad en el líquido, requiriéndose para esto pesos diversos, según sean los sólidos y los líquidos. Pero también los hay *de volumen variable* y *de peso constante*, es decir, que no tienen punto fijo hasta donde sumergirse, conservando siempre el mismo peso. Estos instrumentos, denominados *pesa-sales*, *pesa-ácidos*, *pesa-licores*, no sirven para conocer los pesos específicos de los líquidos, sino para averiguar si las disoluciones salinas, los ácidos, los alcoholes están más o menos concentrados.

109. *Areómetro de Baumé*. -Baumé, farmacéutico de París, muerto en 1804, construyó un areómetro de peso constante, que se ha generalizado mucho. Es un flotador de vidrio ([figura 68](#)), compuesto de un vástago AB con una esfera algo gruesa, llena de aire, y debajo de esta otra pequeña lastrada con mercurio.

De dos maneras se gradúa este instrumento, según haya de servir para líquidos más o menos densos que el agua. En el primer caso, se regula su peso de manera que en el agua destilada y a 4°, se introduzca próximamente hasta la extremidad superior del vástago en el punto A, donde se marca 0. Para el resto de la escala, se hace una disolución de 85 partes de agua, en peso, por 15 de sal común, y como esta disolución es más densa que el agua, el aparato sólo se introduce en ella hasta B, donde se marca 15. Divídese luego el intervalo de A a B en 15 partes iguales, continuando las divisiones hasta la parte inferior del vástago, con lo cual queda graduado el instrumento. Las divisiones se señalan en una tira de papel pegada en el interior del vástago.

Así construido el areómetro, sólo puede servir para los líquidos más densos que el agua, como los ácidos y las disoluciones salinas, de suerte que es a un tiempo *pesa-sales* y *pesa-ácidos*. Como para las disoluciones menos densas que el agua, debe encontrarse el cero en la parte inferior, hay que variar la graduación. Puso Baumé el cero en el punto de enrase en una disolución de 90 partes de agua, en peso, con 10 de sal común, y el número 10 en el de enrase en el agua destilada. Dividiendo en seguida el intervalo entre ambos puntos en 10 partes iguales, y continuando las divisiones hasta la extremidad del vástago, queda terminado el aparato que ha de servir para *pesa-licores*.

Los dos areómetros que acabamos de describir, construidos ambos por Baumé, se gradúan arbitrariamente, de modo que no indican ni las densidades de los líquidos, ni las cantidades de sal disueltas. Sin embargo, son de gran utilidad para conocer la concentración determinada de una disolución salina o ácida. En una palabra, ofrecen puntos fijos, por medio de los cuales se reproducen con rapidez mezclas o disoluciones en proporciones dadas, si no con exactitud, siquiera con la suficiente aproximación para los más de los casos. Por ejemplo, en la fabricación de los jarabes ordinarios se ha comprobado experimentalmente que el *pesa-sales* de Baumé debe marcar 35°, en frío, en un jarabe bien confeccionado. Tiene, pues, en él el fabricante un instrumento de fácil consulta para el grado de concentración de su jarabe. De igual manera, en el agua de mar, a la temperatura de 22°, señala 3 el *pesa-sales* de Baumé, cuya circunstancia es de gran precio para los baños salados que se prescriben en ciertas afecciones. En general, la proporción que ordenan los médicos es mucho más débil que la que marca el areómetro, es decir, que los baños salados artificiales no ofrecen la salobrez del agua del mar, por lo que tampoco son tan eficaces.

110. Alcohómetro centesimal de Gay-Lussac. -El alcohómetro de Gay-Lussac es un instrumento que mide la fuerza de los líquidos espirituosos a 15°, es decir, *el número de centésimas de alcohol puro, en volumen, que contienen dichos líquidos a la citada temperatura.*

La forma del alcohómetro es enteramente la del areómetro de Baumé (fig. 68); pero difiere por su graduación, verificada a 15 grados. La escala dispuesta en el vástago comprende 100 partes o grados, que representan cada uno una centésima de alcohol en volumen, correspondiendo la división 0 al agua pura, y la 100 al alcohol puro. Introducido el alcohómetro en un líquido espirituoso a 15°, nos indica inmediatamente la fuerza de éste. Por ejemplo, si en un aguardiente a 150 se sumerge el aparato hasta la división 48, nos dice con esto que 48 centésimas de su volumen son de alcohol puro y el resto de agua; pues sabido es que los llamados *aguardientes* y *espíritus* son simples mezclas de agua y de alcohol.

Se gradúa el alcohómetro introduciéndolo sucesivamente en mezclas determinadas de agua y de alcohol; y a fin de proceder con la mayor exactitud, se aprecia la contracción de volumen que se nota al mezclar ambos líquidos.

Sean, al efecto,  $v$  el volumen del agua,  $v'$  el del alcohol, y  $V$  el de la mezcla, que es menor que  $v+v'$ ; sean, además,  $d'$  la densidad del alcohol, y  $d$  la de la mezcla, determinada por la balanza hidrostática por el areómetro de Fahrenheit; siendo 1 la densidad del agua, se tiene, en peso,  $vv'd'=Vd$ , de donde  $V=vv'd'/d$ .

Una vez conocido el volumen  $V$ , se determina en la escala el número de divisiones  $n$  correspondientes al punto de enrase en la mezcla  $vv'$ , por la proporción  $100/n=V/v'$ , de donde  $n=100v'/V$ .

Obsérvese que, graduado el aparato a 15°, sólo a esta temperatura son exactas sus indicaciones; pues a temperaturas más altas o más bajas los líquidos se dilatan o se contraen, y se introduce más o menos el alcohómetro, es decir, que el calor altera a la vez el volumen del líquido y las indicaciones del instrumento. Véanse, por lo tanto, dos causas de error en igual sentido, y que, reunidas, pueden llegar a más de 12 por 100 del valor del líquido de cero a 30 grados. Para corregir estos dos errores construyó Gay-Lussac unas tablas que contienen, en una columna vertical, la temperatura de 0 a 30 grados, y en otra horizontal los grados del areómetro de 0 a 100. Luego, lo mismo que en la tabla de multiplicar, en el punto de encuentro de la vertical bajada de la casilla que contiene los grados alcohométricos con la horizontal que parte de la casilla de los grados del termómetro, se encuentra el número que indica la riqueza real del líquido espirituoso. Por ejemplo, si en un líquido de esta naturaleza a la temperatura de 22° marca el alcohómetro 36, se encuentra que la riqueza real es 33 reducido a la temperatura de 15°, es decir, que contiene los 33 centésimos de su volumen de alcohol, y por lo tanto, 67 de agua.

111. Pesa-sales graduados sobre el mismo principio del alcohómetro centesimal. -También se construyen pesa-sales fundados en el mismo principio que el alcohómetro centesimal, es decir, que dan a conocer la cantidad en peso de tal o cual sal contenida en una disolución. El cero de todos estos instrumentos corresponde al agua pura, y su graduación se obtiene disolviendo 5, 10, 15, 20... gramos de la sal dada, en 95, 90, 85, 80... de agua, hasta la saturación de la disolución. Introduciendo en seguida sucesivamente el aparato en estas disoluciones, se marca 5, 10, 15, 20... en los diversos puntos de enrase, dividiendo cada intervalo en 5 partes iguales.

Son enojosos tales instrumentos, porque cada sal requiere uno distinto; así es que el graduado para nitrato de potasa por ejemplo, dará indicaciones completamente falsas en una disolución de carbonato potásico o de cualquiera otra sal.

Siguiendo el mismo principio, se han construido *pesa-leches* y *pesa-vinos*, destinados a medir la cantidad de agua que puede haber introducido el fraude en estos líquidos. Pero estos instrumentos no son muy seguros, porque siendo muy variables las densidades de la leche y del vino, aun en el mismo estado natural de estos líquidos, podría atribuirse al fraude lo que tan sólo depende de la mala calidad congénita de la leche o del vino. Muchos médicos se sirven igualmente de *pesa-orinas*, fundados sobre el mismo principio.

112. Densímetros. -Los densímetros son areómetros graduados de modo que den a conocer la densidad relativa de un líquido en vista de las divisiones sumergidas. Describiremos el de Gay-Lussac y el que ha inventado recientemente M. Rousseau.

1.º *Densímetro de Gay-Lussac.* -El densímetro de Gay-Lussac es en un todo semejante al areómetro de Baumé ([fig. 68](#)) sin más diferencia que la graduación, que varía según haya de servir el aparato para líquidos más o menos densos que el agua. En el primer caso, se le lastra de manera que, en el agua pura se introduzca hasta un punto A ([figura 68](#)), situado en la extremidad superior del vástago; eligiendo en seguida otro líquido de densidad conocida mayor que la del agua en la razón de 4 a 3, por ejemplo, se introduce en él el aparato, que sólo bajará hasta cierto punto B. Si se representan por V y por  $v$  los volúmenes sumergidos respectivamente en el agua y en el segundo líquido, como están en razón inversa de las densidades de estos líquidos (98), se tiene

$$V/v=4/3; \text{ de donde } v=3/4V.$$

Suponiendo, pues, que vale 100 el volumen V, el  $v$  valdrá 75, números que se escriben respectivamente en los puntos A y B. Siendo el volumen AB, según el valor de  $v$ , el cuarto de V, se divide el espacio AB en 25 partes iguales, cada una de las cuales es de 1/25 de AB, o 1/100 de V, es decir, del volumen sumergido en el agua pura. Por fin, se continúan las divisiones hasta la parte inferior del vástago, que ha de tener exactamente el mismo diámetro en toda su longitud.

Para conocer la densidad de un líquido, del ácido sulfúrico, por ejemplo, hasta introducir en él el densímetro, y si enrasa en la división 54.ª, indica que el volumen del líquido desalojado está representado por 54, siendo 100 el del agua V. Como todo cuerpo flotante desaloja un peso de líquido igual al suyo (98), resulta que el volumen de agua V, o 100, y el del ácido sulfúrico 54, pesan lo mismo que el instrumento; pero en igualdad de peso, los volúmenes de dos cuerpos están evidentemente en razón inversa de sus densidades. Por consiguiente, si llamamos  $x$  a la densidad del ácido sulfúrico, y 1 la del agua, resulta  $x/1=100/54$ , de donde  $x=100/54=1,85$ .

Si ha de servir el densímetro para líquidos menos densos que el agua, hay que lastrarle de manera que el punto 100, que corresponde al agua destilada, se encuentre en la base del vástago. Se fija en seguida en su extremidad superior un peso igual a la cuarta parte del instrumento, el cual, si antes pesaba 100, pesará ahora 125. Se escribe, pues, este último número en frente del nuevo punto de enrase, dividiendo el intervalo de 100 a 125, en 25 partes iguales, que se continúan luego hacia arriba.

2.º *Densímetro de M. Rousseau.* -El densímetro de Gay Lussac requiere una cantidad de líquido suficiente para llenar probetas de grandes capacidades, lo cual es, en ciertos casos, un grave inconveniente, como cuando en fisiología se examinan líquidos animales, de los cuales sólo se han recogido algunos gramos. En tales casos se investiga la densidad por medio del densímetro de M. Rousseau, instrumento que se parece por su forma al areómetro de Baumé, pero que lleva en el vértice del vástago una capsulita A ([fig. 69](#)), que recibe el líquido cuya densidad se busca. En la pared de dicha cápsula se ve una señal que marca una capacidad AC de un centímetro cúbico.

Para graduar el instrumento, se lo lastra de manera que en el agua destilada y a 4 grados, su punto de enrase esté en B en el origen del vástago: este punto es el cero del instrumento. Llénase, en seguida, de agua destilada y a 4 grados la capacidad que hemos dicho que medía un centímetro cúbico, o lo que es lo mismo, se le añade un peso de un gramo; y luego, en el nuevo punto de enrase, se marca 20, dividiendo el intervalo de 0 a 20 en 20 partes iguales, continuando luego las divisiones hasta el vértice del vástago. Si tiene éste en toda su longitud igual diámetro, corresponde cada división a 1/20 de gramo, o gr. 0,05.

Si se desea obtener la densidad de un líquido, la de la bilis, por ejemplo, se le introduce en la capacidad AC de modo que la ocupe toda, y si el instrumento enrasa a 20 divisiones y media, se deduce que el peso de la bilis de la cápsula vale gr.  $0,05 \times 20,5$ , o gr. 1,025, es decir, que, siendo iguales los volúmenes, y 1 el peso del agua, el de la bilis es 1,025. Este último número representa, pues, la densidad de la bilis con relación al agua; porque, bajo el mismo volumen, se hallan los pesos, en la misma relación que las densidades.

## Capítulo II

### Hidrodinámica

113. Objeto de la hidrodinámica. -Se ha visto ya (77) que la hidrodinámica es la parte de la mecánica racional que trata de los movimientos de los líquidos, y que el ramo de esta ciencia, que considera especialmente la conducción y ascenso de las aguas, se designa con el nombre de *hidráulica*, es decir, que la hidráulica es la parte práctica de la hidrodinámica.

Se supone, en hidrodinámica, lo mismo que en hidrostática, que los líquidos son completamente incompresibles, perfectamente fluidos, y por lo tanto, sin viscosidad alguna. Pero los líquidos sólo gozan de un modo imperfecto de estas propiedades, y así es que las consecuencias teóricas a que conducen se hallan simplemente con más o menos aproximación acordes con los resultados de la experiencia.

Muchos son los casos que se presentan en el movimiento de los líquidos. La salida se verifica: 1.º en un depósito de pared delgada, es decir, cuyo espesor no llega a la mitad de la menor dimensión del orificio; 2.º en un depósito con tubo adicional; 3.º por tubos de gran diámetro; 4.º por tubos capilares; 5.º en un canal abierto, como los ríos. Sólo consideraremos los cuatro primeros casos.

114. Salida por orificios practicados en pared delgada; vena líquida. -Sea, en primer lugar, un vaso de paredes delgadas y lleno de agua. Si en un punto cualquiera de su pared hacemos un agujerito, sale el líquido mediante la influencia de dos fuerzas, que son: la gravedad que lo solicita en el sentido de la vertical, y la presión del líquido que obra perpendicularmente a la pared, y proporcionalmente a la profundidad.

El chorro líquido que sale entonces se llama *vena*. Si el orificio está practicado en el fondo del depósito, la vena es vertical y rectilínea, porque actúan en el mismo sentido las dos fuerzas arriba citadas; pero si se le practica en una pared vertical o inclinada, una de las dos fuerzas es vertical, y la otra horizontal u oblicua. En tal caso, como el líquido sigue la resultante, toma la vena una forma curvilínea, que, a no mediar la resistencia del aire, sería exactamente la de la curva que describen los proyectiles en el vacío, curva que se conoce con el nombre de *parábola*.

115. Constitución de la vena. -La vena ofrece los siguientes fenómenos, que Savart estudió. Se compone de dos partes distintas: la primera, que toca al orificio, es completamente tranquila, transparente, y parece un cilindro del más limpio cristal; y la segunda, por el contrario, es turbia, agitada, y presenta de trecho en trecho rehenchimientos prolongados dispuestos con regularidad (fig. 70), y llamados *vientres*.

Esta segunda parte de la vena no es continua, porque cuando se hace salir un líquido opaco, como el mercurio, se ve a su través. Savart notó que constan los vientres de glóbulos discontinuos, prolongados en el sentido trasversal de la vena, y que las contracciones o los *nodos* están constituidos, al contrario, por glóbulos prolongados en el sentido longitudinal (fig. 71). El mismo físico comprobó además, observando la vena con una luz muy viva, que la parte clara ofrece rehenchimientos anulares que toman origen cerca del orificio, y se propagan por intervalos iguales hasta la parte turbia, donde se separan. Estos rehenchimientos provienen de pulsaciones periódicas que se verifican en el orificio. Su número está en razón directa de la velocidad de salida, e inversa del diámetro del orificio.

Dichas pulsaciones pueden ser bastante rápidas para dar origen a un sonido que se refuerza recibiendo la vena sobre una membrana tensa. Savart, al producir con un instrumento de música un sonido al unísono con el de la vena, modificó ésta de manera que adquirieron mayor regularidad los vientres y los nodos, desapareciendo casi por completo la parte transparente.

Por último, el mismo observador encontró, que la resistencia del aire queda sin efecto sobre la forma y las dimensiones de la vena, lo mismo que sobre el número de las pulsaciones. Observó también que la constitución de las venas horizontales u oblicuas, no difiere esencialmente de la de las verticales.

116. Contracción de la vena. -En la salida por orificios circulares en pared delgada, conserva la vena líquida una sección circular, pero de diámetro variable, pues principia por ser igual al del orificio, decrece luego rápidamente, y a una distancia casi igual a su longitud primera, ya no tiene la sección de la vena más que unos dos tercios de la sección del orificio. Si la vena se dirige de arriba hacia abajo ([fig. 70](#)), continúa con lentitud el decrecimiento hasta la parte turbia; si es horizontal, sigue el decrecimiento de un modo apenas sensible; y si se dirige de abajo hacia arriba, según un ángulo de 25 a 45 grados, conserva sensiblemente la vena el mismo diámetro; pero pasados los 45 grados, la sección crece desde la parte contraída hasta la turbia.

El punto en donde llega a su minimum el diámetro de la vena, se llama *sección contraída*. La contracción de la vena depende de las dos direcciones convergentes que toman las moléculas líquidas en el interior del vaso, al dirigirse hacia el orificio. Se hace visible este fenómeno dejando en suspensión materias tenues en el agua que se deja salir por un orificio abierto en las paredes delgadas de un vaso trasparente. Si el diámetro de la abertura es de un centímetro, se nota que a 2 o 3 centímetros de distancia se dirigen de todos los puntos las materias en suspensión hacia dicho orificio, describiendo líneas curvas, y precipitándose por él como hacia un centro de atracción ([fig. 72](#)). Continuando en el exterior la convergencia interna, se adelgaza gradualmente la vena líquida, en términos de que las moléculas, por efecto de su acción recíproca, toman una dirección paralela, o direcciones divergentes. Forma así la vena una especie de cono truncado, cuya base mayor es el orificio, y la menor la sección contraída.

Hasta ahora habíamos supuesto circular el orificio. Dado caso que sea poligonal o de forma no circular, no conserva, la sección de la vena la misma forma que la abertura, sino que cambia sucesivamente, a medida que se aleja, dando siempre lugar a nodos y a vientres.

117. Teorema de Torricelli sobre la velocidad de la salida. -Siempre que sale un líquido por un orificio practicado en pared delgada, sea cual fuere su forma, se determina la velocidad por medio del siguiente teorema:

*Las moléculas líquidas, cuando salen por el orificio, tienen la misma velocidad que si cayeran libremente en el vacío de una altura igual a la distancia vertical del centro del orificio, a la superficie del líquido en el depósito.*

Se conoce este teorema con el nombre de teorema de Torricelli, que es el apellido del célebre físico que le estableció en 1643, como una consecuencia de las leyes de la caída de los cuerpos, que acababa de descubrir Galileo.

Puédesele manifestar experimentalmente apoyándose en el siguiente principio que se demuestra en mecánica, que *cuando un cuerpo es lanzado de abajo hacia arriba con cierta velocidad, tiende a subir a la altura misma de que debería caer para adquirir dicha velocidad*. En efecto, siempre que se verifica la salida de abajo hacia arriba ([fig. 73](#)), se observa que la vena líquida llega casi a la altura del líquido en el vaso, y si no la adquiere por completo, depende de que se oponen al ascenso del líquido, la resistencia del aire y el choque de las moléculas líquidas entre sí, al caer. Preciso es, pues, que al salir del orificio  $n$ , se halle animado el líquido de la misma velocidad que adquiriría durante el descenso de la altura  $mn$ , a la cual tiende a llegar.

Puede comprobarse también el teorema de Torricelli atendiendo a la contracción de la vena. Al efecto, se miden los litros de agua que salen de un orificio dado en la unidad de tiempo y con una velocidad constante: en seguida, midiendo la sección contraída de la vena en decímetros cuadrados, y multiplicándola por la velocidad expresada en decímetros, en virtud del teorema de Torricelli, se obtiene en decímetros cúbicos o en litros un volumen igual al que dio la medición, con lo cual se demuestra que la velocidad calculada es exactamente la velocidad real.

118. Consecuencias del teorema de Torricelli. -Dedúcese dos importantes consecuencias del teorema de Torricelli.

1.<sup>a</sup> Cayendo con igual velocidad todos los cuerpos en el vacío, *la velocidad de salida es independiente de la densidad del líquido*. El agua y el mercurio, por ejemplo, salen con igual velocidad, siempre que sea igual para ambos líquidos la altura del nivel sobre el orificio. Compruébase, efectivamente, de un modo experimental, que para alturas iguales y orificios del mismo diámetro salen volúmenes iguales de los dos líquidos en el mismo tiempo.

2.<sup>a</sup> *La velocidad de salida, al borde del orificio, es proporcional a la raíz cuadrada de la altura del nivel que existe en el depósito, sobre el centro del orificio.*

He aquí también otra consecuencia de las leyes de la gravedad, pues se ha visto (55), que representando por  $v$  la velocidad adquirida por un móvil que cae en el vacío, y por  $a$  la altura de descenso, medida en metros, se tiene  $v = \sqrt{2ga}$ . La velocidad que se calcula mediante esta fórmula, es la *velocidad teórica*.

119. Gasto efectivo y gasto teórico. -Llámase *gasto efectivo* de un orificio el volumen de líquido que sale por él en cada segundo; y *gasto teórico* el volumen de líquido igual al de un cilindro o de un prisma que tuviese por base el orificio, y por altura la velocidad teórica que nos da el teorema de Torricelli. Es decir, que el gasto teórico es el producto del área del orificio por la velocidad teórica.

El gasto efectivo es siempre menor que el gasto teórico. En efecto, aquel es evidentemente igual al producto de la sección contraída por la velocidad media de las moléculas en el momento de atravesarla. Si fuese esta sección la misma que la del orificio, y si dicha velocidad fuese igual a la velocidad teórica, el gasto efectivo sería idéntico al teórico; pero sucede, o que la sección de la vena es notablemente menor que la del orificio, como en la salida por pared delgada, o que la velocidad, en la sección, es menor que la teórica, conforme se ve, a causa del roce, en los orificios de las paredes gruesas. De suerte que, en ambos casos, el gasto efectivo es menor que el teórico, siendo preciso, para reducir éste al primero, que se multiplique por una fracción llamada *coeficiente de contracción*.

El resultado de un gran número de experimentos es, que el gasto efectivo sólo llega por término medio a los dos tercios del teórico.

120. Salida constante. -En muchísimos experimentos de hidráulica es preciso que sea constante la velocidad de salida, lo cual exige la invariabilidad de la altura del líquido encima del orificio. De muchos modos se obtiene este resultado: 1.<sup>o</sup> por el *trop-plein* o *derrame*, haciendo llegar al depósito una cantidad de agua algo mayor que la que sale por el orificio, vertiéndose el exceso a la par, o por los bordes o por un agujero especial; 2.<sup>o</sup> por medio del *sifón* o del *vaso de Mariotte*, que luego describiremos, y 3.<sup>o</sup> mediante el *flotador de Prony*.

Este aparato ([fig. 74](#)) consta de una caja PQ llena de agua y provista de los flotadores FF, enlazados entre sí por una varilla de hierro, y con un depósito B móvil y situado debajo de la caja. Una placa A, que forma parte de la pared de esta última, posee varios orificios de diferentes formas y tamaños; y un embudo, colocado debajo de estos orificios, conduce al depósito B el líquido que fluye. Si abrimos uno de estos orificios, y suponemos que sale un kilogramo de agua, gana un kilogramo el peso de los flotadores, y por lo tanto, vistas las condiciones de equilibrio de los cuerpos flotantes (98), se introducen dichos flotadores una cantidad igual al volumen del agua vertida, de donde resulta que en la vasija PQ permanece constante el nivel, y por lo mismo la velocidad de salida.

121. Salida por tubos adicionales. -*Tubos adicionales* ([fig. 75](#)) son los tubos que se aplican a los orificios de los depósitos para aumentar su gasto. Su forma varía, aunque siempre suele ser cilíndrica o cónica.

En la adición de tubos pueden ocurrir dos casos, a saber: o la vena líquida pasa por el tubo sin adherírsele, o la vena se le adhiere por un efecto de la atracción molecular entre las paredes y el líquido, y en este caso, la parte contraída de la vena se ensancha, aumentando el gasto.

En los tubos cilíndricos, para que haya aumento de gasto, es menester que su longitud sea dos o tres veces mayor que su diámetro. Entonces sale el líquido a *boca llena*, es decir, a tubo lleno, y haciendo aumentar cerca de un tercio el gasto.

Los tubos cónicos convergentes hacia el exterior del depósito aumentan el gasto mucho más que los anteriores. Dan chorros muy regulares y los lanzan a mayor distancia o a mayor altura. Sus efectos, en cuanto al gasto y a la velocidad de proyección, varían con el ángulo de convergencia, es decir, con el ángulo que forman, mediante su proyección, dos lados opuestos del tronco de cono que constituye el tubo adicional.

De todos los tubos adicionales, los que más gasto producen son los cónicos divergentes hacia el exterior. Venturi dedujo de sus experimentos que estos tubos podían dar un gasto efectivo 2, o 4 veces mayor que el de un orificio en pared delgada, de igual diámetro que la base menor, y 1,46 veces mayor que el gasto teórico.

Ya los antiguos romanos conocieron la propiedad de estos tubos adicionales, pues los ciudadanos que disfrutaban de la concesión de tomar cierta cantidad de agua de los depósitos públicos, encontraban con el uso de tales tubos, el medio de acrecentar los productos de su prerrogativa, llegando a tal punto el fraude, que al fin prohibieron las leyes su uso.

122. Salida por tubos largos y de gran diámetro. -Cuando fluye un líquido por un tubo de gran longitud, se verifica la salida, o por efecto de la inclinación del tubo, como sobre un plano inclinado, o en virtud de una presión que sufre el líquido en el origen del tubo. Siendo continua en ambos casos la fuerza, debería acelerarse el movimiento; pero a cortísima distancia del origen se nota que es uniforme el movimiento, lo cual revela que hay una fuerza que destruye constantemente el aumento de velocidad que tiende a adquirir el líquido. Esta fuerza es la resistencia que proviene de la adhesión de las moléculas líquidas entre sí y con las paredes; pero además hay que tener en cuenta los recodos, las obstrucciones de los tubos, etc., si bien es verdad que la primera es la principal. En virtud de estas diversas resistencias, la velocidad de salida, y por consiguiente, el gasto, puede llegar a ser, en los tubos, mucho menor que en el caso de salida por orificios en paredes delgadas.

123. Salida por tubos capilares. -La salida por tubos capilares, es decir, de diámetro muy pequeño, merece llamar la atención por las aplicaciones de que es susceptible en la fisiología. El doctor Poiseuille hizo numerosos experimentos sobre el particular, variando en los tubos su longitud, su diámetro y la presión que determina la salida.

Operando con tubos de vidrio, estableció las tres leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Para un mismo tubo, el gasto es proporcional a la presión.*

2.<sup>a</sup> *A igualdad de presión y de longitud, el gasto es proporcional a la cuarta potencia de los diámetros.*

3.<sup>a</sup> *A igualdad de presión y de diámetro, el gasto está en razón inversa de la longitud.*

Observó, además, M. Poiseuille, que la naturaleza del líquido modifica la velocidad de salida. El nitrato de potasa disuelto en el agua facilita la salida; al contrario del alcohol, que la retarda. El suero fluye con una velocidad dos veces menor que la del agua; el alcohol mezclado con el suero retarda también la salida; pero si a la mezcla se añade nitrato de potasa, recobra el suero su velocidad primitiva.

Hicieron estos diversos experimentos con tubos de vidrio, pues se trataba de averiguar si los resultados serían los mismos que en los vasos capilares de los cuerpos orgánicos. Operando con animales muertos, que se les dejaba enfriar hasta la temperatura del ambiente, e inyectando suero en la arteria principal de un órgano, se comprobó que el nitrato de potasa facilitaba la salida en los capilares de los cuerpos orgánicos sin vida, lo mismo que en los tubos de vidrio; y que el alcohol, por el contrario, la retardaba.

Los experimentos de M. Poiseuille tienden, pues, a probar que la circulación de la sangre en las arterias y en las venas, está sometida a las mismas leyes que la salida de los líquidos en los tubos capilares.

124. Surtidores. -Los *surtidores* son filetes de agua que salen con fuerza de un orificio por efecto de la presión que ejerce una columna de líquido más o menos elevada sobre el nivel de este orificio. Si ocupa este una pared horizontal, el surtidor es vertical; y si es oblicua la pared, está inclinado este último, y describe una curva que, sin la resistencia del aire, sería una parábola.

En virtud del principio arriba indicado (117), un surtidor tiende a subir a una altura igual a la del nivel del agua en el depósito; pero esto jamás sucede por las tres causas siguientes: 1.<sup>a</sup> por el rozamiento del agua en los tubos de conducción; 2.<sup>a</sup> por la resistencia del aire, y 3.<sup>a</sup> por el choque de las moléculas que suben con las que bajan.

A fin de obtener el máximo de altura del surtidor, es preciso que crezca con la longitud, el diámetro de los tubos de conducción: éstos no han de ofrecer reenchimientos ni recodos demasiado bruscos; y por último, el orificio de salida ha de practicarse en una pared delgada, estando algo inclinada la dirección del surtidor, con objeto de evitar la tercera resistencia que antes hemos indicado.

Los orificios en pared delgada son los que dan surtidores de mayor altura, más regulares y más transparentes. Los tubos adicionales cónicos dan también surtidores unidos y transparentes; pero la altura sólo llega a los 0,8 o 0,9 de la de los orificios en pared delgada. Por último, los tubos cilíndricos dan origen a surtidores turbios, cuya altura sólo es 0,66 de la correspondiente a los orificios en pared delgada.

Para que tome horizontalmente un surtidor la mayor amplitud, se encuentra, por medio del cálculo, que, aparte la resistencia del aire, debe formar con el horizonte un ángulo de 45°.

▽△

## Capítulo III

▽△

### Capilaridad, endósmose, absorción e imbibición

125. Fenómenos capilares. -Prodúcese, en el contacto de los sólidos y de los líquidos, una serie de fenómenos llamados capilares, porque se observan particularmente en los tubos de diámetro bastante pequeño para que pueda comparársele con el de un cabello. La parte de la física que tiene por objeto el estudio de los fenómenos capilares, se designa con el nombre de *capilaridad*; sin embargo, también se aplica esta expresión a la fuerza misma que determina tales fenómenos.

Muy variados son los efectos de la capilaridad; pero siempre dependen de la mutua atracción de las moléculas entre sí, y de la que se ejerce entre estas moléculas y los cuerpos sólidos: tales son los siguientes fenómenos:

Cuando se introduce un cuerpo en un líquido que le moja, este último, cual si no estuviese sometido ya a las leyes de la hidrostática, se eleva alrededor del cuerpo sólido, y dejando de ser horizontal su superficie, toma una forma cóncava ([fig. 76](#)).

Si, por el contrario, no moja el líquido al sólido, conforme le sucede al vidrio en contacto con el mercurio, no sube, sino que baja la superficie afectando una forma convexa ([fig. 77](#)). La superficie del líquido adquiere la misma concavidad o convexidad en los bordes de la vasija que lo contiene, según moje o no sus paredes.

Más palpables son estos fenómenos cuando en vez de una masa sólida se introducen tubos de vidrio, huecos, de pequeño diámetro. Según los moje o deje de mojar el líquido, así se nota un ascenso o una depresión tanto mayor, cuanto menor es el diámetro ([fig. 78](#) y [79](#)).

Si el líquido moja los tubos, la superficie de aquél toma la forma de un segmento hemisférico cóncavo, llamado *menisco cóncavo* ([fig. 78](#)), y si no los moja, forma un *menisco convexo* ([fig. 79](#)).

126. Leyes de la elevación y depresión en los tubos capilares. -Gay-Lussac demostró experimentalmente que el ascenso y la depresión de los líquidos, en los tubos capilares, se hallan sometidos a las tres leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> Hay elevación cuando el líquido moja los tubos, y depresión en el caso contrario.

2.<sup>a</sup> Esta elevación y depresión están en razón inversa de los diámetros de los tubos, mientras estos diámetros no pasen de dos a tres milímetros.

3.<sup>a</sup> El ascenso y la depresión varían con la naturaleza del líquido y con la temperatura; pero son independientes de la sustancia de los tubos y del espesor de sus paredes, si éstas se han mojado previamente.

Todas estas leyes se verifican lo mismo en el vacío que en el aire pero Wolf ha demostrado, que cuando aumenta la temperatura, el ascenso del agua en los tubos disminuye, pudiendo llegar a ser nula y hasta transformarse en depresión.

Para el uso de muchos aparatos, hay que conocer el valor de la depresión del mercurio en los tubos de vidrio. La siguiente tabla da tales depresiones en tubos de 2 a 10 milímetros de diámetro:

Diámetros de los tubos en milímetros.	Depresiones en milímetros.	Diámetro de los tubos en milímetros.	Depresiones en milímetros.
2	4,454	6,5	1,030
2,5	3,568	7	0,909
3	2,918	7,5	0,803
3,5	2,422	8	0,712
4	2,068	8,5	0,632
4,5	1,774	9	0,562
5	1,534	9,5	0,500
5,5	1,337	10	0,445
6	1,171		

127. Leyes de la elevación y depresión entre dos láminas paralelas o inclinadas. -Nótese fenómenos análogos a los de los tubos capilares entre dos cuerpos de forma cualquiera introducidos en un líquido, cuando se encuentran bastante aproximados. Por ejemplo, si se introducen en el agua dos láminas de vidrio paralelas, suficientemente aproximadas para que se junten las dos curvaturas formadas en su contacto por el líquido, se observa: 1.º que *el agua sube con regularidad entre las dos láminas, en razón inversa del intervalo que las separa*; 2.º que *la altura del ascenso, para un intervalo dado, es la mitad de la que se notaría en un tubo cuyo diámetro fuese igual a este intervalo*.

Si las láminas paralelas entran en el mercurio, se obtiene una depresión, pero siguiendo las mismas leyes.

En dos láminas o placas de vidrio, AB y AC, inclinadas entre sí ([figura 80](#)), o introducidas en un líquido que las moje, de manera que sea vertical su línea de contacto, asciende el líquido hacia el vértice del ángulo de las dos láminas, y su superficie, desde el punto más alto al más bajo, afecta la forma de una *hipérbola equilátera*.

Si es horizontal la línea de contacto de ambas láminas, conforme sucedería prolongándolas en las láminas representadas en las [fig. 81](#) y [82](#), y si es muy pequeño el ángulo que al mismo tiempo forman, cualquier gota de agua situada entre ellas se redondea en sus dos extremidades en menisco cóncavo ([fig. 81](#)), y se precipita hacia el vértice del ángulo de las dos láminas. Si, por el contrario, no moja el líquido las placas, según le sucede al mercurio, se redondea la gota terminando en menisco convexo ([fig.82](#)), y alejándose del vértice del ángulo.

128. Atracciones y repulsiones que resultan de la capilaridad. -La capilaridad origina las atracciones y repulsiones que se observan entre los cuerpos que flotan en la superficie de los líquidos, las cuales se hallan sujetas a las siguientes leyes.

Cuando el líquido moja dos cuerpos flotantes, como por ejemplo dos esferas de corcho introducidas en el agua, se desarrolla una gran atracción apenas se encuentran bastante cerca para que ya no exista superficie plana entre ellas.

Si ninguno de los dos cuerpos es mojado, como acontece con dos bolitas de cera en el agua, se nota también una viva atracción luego que se hallan en iguales condiciones que las anteriores.

Y por último, si un cuerpo se moja y el otro no, v. gr., una bolita de corcho y otra de cera, se rechazan cuando están suficientemente inmediatas para que se verifique el contacto de las dos curvaturas contrarias del líquido.

Dependiendo todos los fenómenos capilares que acabamos de describir de la curvatura cóncava o convexa que afecta la superficie del líquido que se halla en contacto con los cuerpos, réstanos dar a conocer la causa que determina la forma de esta curvatura.

129. Causa de la curvatura que afectan las superficies líquidas en su contacto con los sólidos. -La forma de la superficie de un líquido en contacto con un cuerpo sólido, proviene de la relación que existe entre la atracción del sólido con el líquido y la de éste consigo mismo.

Efectivamente, sea  $m$  (fig. 83) una molécula líquida en contacto con un cuerpo sólido. Dicha molécula se halla sometida a tres fuerzas, que son: la gravedad que la solicita en la dirección vertical  $mP$ ; la atracción del líquido que actúa según la línea  $mF$ , y la atracción de la placa que se ejerce en la dirección  $mn$ . Según sean las respectivas intensidades de estas fuerzas, su resultante puede afectar las tres posiciones siguientes:

1.<sup>a</sup> Si la resultante afecta la dirección vertical  $mR$  (fig. 83), entonces la superficie en  $m$  es plana y horizontal, porque en virtud de las condiciones de equilibrio de los líquidos (87), ha de ser perpendicular su superficie a la dirección de la fuerza que solicite sus moléculas.

2.<sup>a</sup> Si aumenta la fuerza  $n$  o disminuye  $F$ , la resultante  $R$  se dirige al ángulo  $nmP$  (fig. 84), en cuyo caso la superficie toma una dirección inclinada perpendicular a  $mR$ , siendo cóncava.

3.<sup>a</sup> Aumentando la fuerza  $F$ , o disminuyendo  $n$ , toma la resultante  $R$  la dirección  $mR$ . (fig. 85) en el ángulo  $PmV$ , y la superficie es convexa, por disponerse perpendicularmente a dicha dirección.

El cálculo demuestra que, en el primer caso, la atracción del líquido sobre sí mismo es doble de la del sólido sobre el líquido; en el segundo, que la atracción de éste es menor que el doble de la de aquél, y en el tercero que es mayor.

130. Influencia de la curvatura del líquido en los fenómenos capilares. -De la forma cóncava o convexa del menisco depende el ascenso o la depresión de un líquido en un tubo capilar. En efecto, si se considera un menisco cóncavo  $abcd$  (fig. 86), como están mantenidas en equilibrio sus moléculas líquidas por las fuerzas que las solicitan (117), no ejercen presión alguna sobre las capas inferiores, y además actúan, en virtud de la atracción molecular, sobre las secciones inferiores más inmediatas, de donde resulta que sobre una capa cualquiera  $mn$ , considerada en el interior del tubo, es menor la presión que si no hubiese menisco. De consiguiente, según las condiciones de equilibrio de los líquidos (81 y 87), debe subir el líquido en el tubo hasta que la presión interior sobre la capa  $mn$  sea igual a la presión  $op$  que se ejerce exteriormente sobre un punto cualquiera  $p$  de la misma capa.

En el caso de ser convexo el menisco (fig. 87), hay también equilibrio en virtud de las fuerzas moleculares que solicitan al líquido; pero suprimidas las moléculas que habían de ocupar el espacio  $ghik$ , a no haber acción capilar, ya no obran por atracción sobre las moléculas inferiores. Resulta así que la presión, en una capa dada  $mn$ , es mayor dentro del tubo que si estuviese lleno el espacio  $ghik$ , porque las fuerzas moleculares en cuestión son mucho más intensas que la gravedad. El líquido debe bajar, pues, en el tubo, hasta que la presión interna, en la capa  $mn$ , sea la misma que en un punto cualquiera de dicha capa.

La teoría de la capilaridad, una de las más difíciles de la física, no puede tratarse de un modo completo sino por medio del análisis matemático, y por eso la han estudiado en particular los matemáticos, y en Francia especialmente los señores Clairaut, Laplace y Poisson. Tal cual acabamos de darla a conocer, explica esta teoría el ascenso y la depresión de los líquidos, no sólo en los tubos, sino también entre las láminas paralelas o inclinadas como igualmente las atracciones y las repulsiones que se observan entre los cuerpos flotantes (128).

131. Diversos hechos que dependen de la capilaridad. -Entre los muchos fenómenos que reconocen por causa la capilaridad, citaremos los siguientes:

Cuando un tubo capilar se halla introducido en un líquido que lo moja, si se le saca con precaución, se advierte que la columna líquida que queda suspendida en el tubo, es mayor que el ascenso que se notaba durante la inmersión. Depende esto de que el tubo arrastra consigo una gota líquida que adhiere a su parte inferior, formando en ella un menisco convexo, cuya acción concurre con la del cóncavo superior a sostener una columna más considerable (130).

Por igual razón un tubo capilar introducido en un líquido no determina ninguna salida, aunque sea más corto que la columna líquida que tiende a subir por el tubo. Proviene esto de que en el movimiento en que llega el líquido a la parte superior del tubo, la superficie que a ella corresponde, de cóncava que era, se vuelve convexa, y por lo tanto siendo mayor la presión que si fuera plana su superficie, se contiene el movimiento ascensional.

Vense a menudo insectos que se pasean por la superficie del agua sin hundirse, porque, no mojando el líquido sus patas, se forma alrededor de ellas una depresión que sostiene a los insectos a pesar de su peso, así como el agua se sostiene en los tubos. Mediante una depresión análoga, una aguja fina, colocada suavemente sobre el agua, permanece en la superficie, si se le ha dado una capa de materia grasa, porque entonces no es mojada; pero lavándola con alcohol o con potasa, se va al fondo.

También por un efecto capilar sube el aceite por las mechas de las lámparas y se penetran de jugos las maderas, las esponjas, y en general todos los cuerpos que poseen poros sensibles (15). Por último, con los nombres de endósmose, de absorción y de imbibición, vamos a dar a conocer nuevos fenómenos que guardan estrecha analogía con la capilaridad, confundiendo frecuentemente con ella.

▽△

### **Endósmose, absorción e imbibición**

132. Endósmose y exósmose. -Se han dado los nombres de *endósmose* y de *exósmose* a las corrientes de dirección contraria que se establecen entre los líquidos de diferente naturaleza, cuando se hallan separados por un tabique delgado y muy poroso, orgánico o inorgánico. Estas expresiones, que significan, *corriente entrante* y *corriente saliente*, han sido adoptadas por Dutrochet, que fue quien en 1826, dio a conocer de un modo completo dichos fenómenos, muy poco estudiados hasta entonces. Compruébanse tales corrientes por medio del *endosmómetro*. Así se denomina una bolsa membranosa terminada superiormente por un tubo largo, a cuyo alrededor se fija herméticamente por medio de una ligadura ([fig. 88](#)). Llena esta bolsa de una disolución muy gomosa o de otro líquido más denso que el agua, como la leche, la albúmina, una disolución de azúcar, etc., se la introduce en una vasija llena de agua. Nótase muy pronto que el nivel sube poco a poco en el tubo a una altura de muchos decímetros, y que desciende en la vasija que contiene al endosmómetro, deduciéndose de aquí que parte del agua pura pasó al través de la membrana para ir a mezclarse con el líquido del interior. Compruébase además que al cabo de cierto tiempo contiene goma el agua de la vasija; claro está, pues, que ha habido una corriente en ambos sentidos. Dícese entonces que hay endósmose para el líquido cuyo volumen aumenta, y exósmose para el que disminuye de volumen. Si se pone agua pura en la bolsa membranosa, introduciéndola en agua gomosa, se produce también endósmose del agua pura a la gomosa, es decir, que el nivel sube en el exterior.

La altura de ascensión varía en el endosmómetro con los diferentes líquidos. De todas las sustancias vegetales, el azúcar disuelto es el que, en igualdad de densidades, presenta mayor poder endosmométrico, y de las animales la albúmina. La gelatina, por el contrario, le posee muy débil; y en general, la corriente

de endósmose se dirige hacia el líquido más denso. Con todo, el alcohol y el éter constituyen una excepción, pues se comportan con el agua como líquidos más densos. Con los ácidos, según estén más o menos diluidos, hay endósmose del agua hacia ellos, o vice-versa.

M. Dutrochet observó que, para que se produzcan los fenómenos de endósmose, es preciso: 1.º que los líquidos sean heterogéneos y susceptibles de mezclarse, por ejemplo, el agua y el alcohol, pues entre el aceite y el agua no se verifica; 2.º que los dos líquidos tengan diversa densidad; 3.º que el tabique intermedio sea permeable por lo menos respecto a uno de ellos.

Todas las sustancias vegetales y animales son permeables, y en cuanto a las inorgánicas, como las pizarras, los gres, la porcelana sin barnizar, la tierra de pipa poco cocida, etc., son tanto menos permeables, cuanto más sílice contienen. La tierra de pipa, que es más aluminosa que la porcelana, es también más permeable; razón por la que se apega a la lengua.

Débil es la corriente al través de las placas delgadas inorgánicas, pero puede continuarse indefinidamente. Lo contrario les sucede a las membranas orgánicas, que se desorganizan muy pronto, cesando la endósmose.

Muchas son las teorías que se han propuesto para explicar la endósmose. Unos la han atribuido a una corriente eléctrica que tiene igual dirección que la endósmose; otros han admitido que la causa del fenómeno era una acción capilar unida con la afinidad de ambos líquidos; algunos han creído que la originaba una desigual viscosidad de éstos; y varios la atribuyen a la mayor o menor permeabilidad de las membranas para tal o cual líquido. Ninguna de estas hipótesis explica de un modo satisfactorio la endósmose; pero como quiera que sea, el fenómeno se enlaza al parecer íntimamente con las mismas causas que determinan la capilaridad. Sin embargo, se nota que la elevación de temperatura que activa la endósmose, entorpece, por el contrario, las acciones capilares.

133. Endósmose de los gases. -Los gases ofrecen verdaderos fenómenos de endósmose. Si dos gases de diferente naturaleza se hallan separados por una membrana seca, hay una simple mezcla de corrientes iguales por ambos lados; pero si está húmeda, media ya la endósmose, o sean corrientes desiguales. Para practicar el experimento, se encierra una vejiga llena de ácido carbónico dentro de otra mayor que contenga oxígeno. Esta última se llena de ácido carbónico, lo cual prueba que hay endósmose de éste a aquél. De igual manera, si se forma una burbuja de jabón y se la coloca debajo de una campana llena de ácido carbónico, se nota que se va dilatando o agrandando.

134. Absorción o imbibición. -Casi sinónimas son en física las palabras *absorción* e *imbibición*, pues ambas indican una penetración de una sustancia extraña en un cuerpo poroso. Con todo, la absorción se aplica indistintamente a los líquidos y a los gases, mientras que la imbibición no se extiende más que a los primeros.

En fisiología se distingue la absorción de la imbibición, pues mediante el primer fenómeno penetra una sustancia extraña en los tejidos de un ser viviente, mientras que con el segundo sólo se expresa la penetración en cuerpos porosos sin vida, sean o no orgánicos. En una palabra, en la absorción entran en juego las fuerzas vitales, y en la imbibición no.

135. Absorción de los gases. -La propiedad de absorber los gases, en el sentido físico, pertenece a todos los cuerpos dotados de poros sensibles (15), pero en grados muy variables. Esta propiedad, sobresale especialmente en el carbón de encina. Apagado debajo de una campana llena de un gas, absorbe, a la presión ordinaria, 90 veces su volumen de amoníaco, 35 de ácido carbónico y 9 de oxígeno. Mojado, absorbe el carbón dos veces menos, demostrándose así que debe su propiedad absorbente a la porosidad, y por lo mismo, a una acción capilar. El poder absorbente del carbón de abeto es dos veces menor que el de encina, y el de corcho, que es sumamente poroso, no absorbe la más mínima cantidad, sucediéndole otro tanto al carbón natural muy compacto, llamado grafito. Dedúcese de todo esto que, siendo la porosidad una condición esencial de la absorción de los gases, han de encontrarse, sin embargo, comprendidos los poros, entre ciertos límites.

136. Fenómenos de absorción en las plantas. -En el reino vegetal se verifica la absorción por todas las partes de las plantas, pero sobre todo por las esponjuelas en que terminan las raíces, y por las hojas.

Merced a estos órganos se absorben, en el estado de agua, de ácido carbónico y de amoníaco, el oxígeno, el hidrógeno, el carbono y el nitrógeno, elementos necesarios para la nutrición de aquéllos.

Los líquidos y las sales que tienen en disolución son absorbidos primero por las raicillas, mediante un doble fenómeno de endósmose y de capilaridad, y luego, la savia, elaborada por el vegetal, aumenta en densidad en las partes superiores, debiéndose también a la endósmose su dirección ascendente. Por último, el ascenso de la savia se halla favorecido además por el vacío que tiende a producirse en las partes altas de la planta, por efecto de la exhalación que se opera por las hojas. En cuanto a la acción capilar, no puede hacer ascender los líquidos más que en las celdillas inferiores, sin producir corriente.

El doctor Boucherie, de Burdeos, hizo una feliz aplicación de la propiedad absorbente de los vegetales para la introducción, en el tejido de las maderas, de sales que le comuniquen colores más o menos vivos, que aumentan su flexibilidad y su tenacidad, o las hacen menos combustibles.

137. Fenómenos de absorción en los animales. -En los animales inferiores, cuyos tejidos no constan más que de celdillas, se efectúa todo como en los vegetales, por imbibición y por endósmose. La imbibición en algunos es una verdadera endósmose.

En los animales superiores hay absorción. Por ejemplo, la rubia, tomada interiormente por estos animales, penetra hasta los huesos, colorándolos de rojo, y si un líquido se halla en contacto con una superficie cutánea sin epidermis, o con una membrana mucosa, como son muy vasculares estas superficies, pasa el líquido a los vasos por un efecto de endósmose, constituyendo así la absorción.

Cuanta más líquida es una sustancia, con mayor facilidad es absorbida; si bien es necesario para la absorción, que mojen los líquidos a las membranas. Por eso no son absorbidas las grasas; porque no las mojan; no obstante de que M. Bernard encontró que lo son fácilmente estando emulsionadas con el jugo pancreático. Recientemente ha observado el doctor Loze que, emulsionando de igual manera el aceite de hígado de bacalao, medicamento que tanta bota ha adquirido en estos últimos años, goza de más energía por ser absorbido con mayor prontitud.

Favorecen a la absorción y a la endósmose, el calor, la depleción, una traspiración abundante o una sangría.

▽△

## Libro cuarto

De los gases

▽△

### Capítulo primero

▽△

#### Propiedades de los gases, atmósfera, barómetros

158. Caracteres físicos de los gases. -Los *gases* o *fluidos aeriformes* son cuerpos de moléculas perfectamente movibles que se encuentran en un estado continuo de repulsión que se designa con el nombre de *expansibilidad*, de *tensión* o de *fuerza elástica*, a causa de cuyas denominaciones toman frecuentemente el nombre de *fluidos elásticos*.

Divídense los fluidos elásticos en dos clases, que son: los *gases permanentes*, o gases propiamente dichos, y los *gases no permanentes* o *vapores*. Los primeros son los que hasta hoy persisten en el estado aeriforme, sea cual fuere la presión y el descenso de temperatura a que se les someta, como el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno, el bióxido de nitrógeno y el óxido de carbono. Los gases no permanentes, por el contrario, pasan con más o menos facilidad al estado líquido, por medio de un exceso de presión o del enfriamiento. Con todo, no es rigurosa esta distinción, porque muchos gases, tenidos por permanentes, han dejado de serlo en manos de Faraday y de otros físicos, debiéndose admitir que los que no se han liquidado hasta ahora ha sido por falta de intensidad en la presión o de suficiente descenso en la temperatura. Por esto se llaman, en general, *gases* los cuerpos que sólo se presentan aeriformes a la temperatura y presión ordinarias, mientras que se designa por *vapor* el estado aeriforme que toman, por efecto del calórico, varios cuerpos que, como el agua, el alcohol y el éter, son líquidos a las presiones y temperaturas ordinarias.

Treinta y cuatro gases se conocen en química: 4 de ellos simples, que son: el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno y el cloro: tan sólo 7 se presentan libres en la naturaleza, a saber: el oxígeno, el nitrógeno, el ácido carbónico, el proto y el bicarburo de hidrógeno, el amoníaco y el ácido sulfuroso. Todos los demás no se obtienen sino por medio de las reacciones químicas.

139. Fuerza expansiva de los gases. -La fuerza expansiva de los gases, es decir, su tendencia a tomar siempre un volumen mayor, se demuestra del modo siguiente: se coloca debajo del recipiente de la máquina neumática una vejiga con llave, que contenga una corta cantidad de aire, mojándola antes para que sea más flexible. Equilíbranse al principio la fuerza elástica del aire del recipiente y la del aire de la vejiga; pero luego que se principia a hacer el vacío, se debilita la presión que ésta sufría, hinchándose cada vez cual si la rellenaran ([fig. 89](#)); quedando así demostrada la fuerza elástica del gas que contiene. Si se deja penetrar luego el aire exterior, comprimida de nuevo la vejiga, vuelve a adquirir su volumen primitivo. De igual manera se comprueba la fuerza expansiva de todos los gases.

Parecía natural que los gases se salieran instantáneamente de las vasijas abiertas que los contienen, vista su fuerza expansiva; y, en verdad, tal es lo que sucedería en el vacío, pero no en el aire libre, cuya presión es un gran obstáculo. Con todo, apresurémonos a decir que esto sólo es exacto para el aire mismo, pues la experiencia demuestra que no es posible equilibrar la fuerza expansiva de un gas, sino mediante la presión de una masa gaseosa de la misma índole que él. Por ejemplo, la presión del aire no puede equilibrar la fuerza expansiva del hidrógeno o del ácido carbónico; porque si bien es verdad que no escapan estos fluidos cual lo harían en el vacío, sin embargo, se mezclan rápidamente los dos fluidos interior y exterior.

Más adelante demostraremos que la fuerza elástica de los gases es siempre igual y contraria a la presión que sufren, y que aumenta con la temperatura.

140. Trasvasación de los gases. -Los gases pueden pasarse de una vasija a otra lo mismo que los líquidos. Este experimento alcanza un éxito completo con el ácido carbónico, que es mucho más denso que el aire. Se principia por llenar una campana de aquel gas, recogiéndole en una cuba de agua, y luego, tomando otra campana de igual capacidad llena de aire, se coloca invertida la primera encima ([fig. 90](#)), teniéndolas así inmóviles durante un rato. El ácido carbónico, en virtud de su mayor densidad, pasa lentamente de la campana *m* a la *n*, de la cual expulsa al aire, de manera que muy pronto se halla la *n* con ácido carbónico, y la *m* con aire; se comprueba esta trasvasación, valiéndonos de la propiedad que posee el ácido carbónico de apagar los cuerpos en combustión. En efecto, antes del experimento, arde una vela encendida en la campana *n*, apagándose en la otra, mientras que después del experimento sucede lo contrario.

141. Peso de los gases. -Los gases eluden, al parecer, por su gran fluidez, y sobre todo por su expansibilidad, las leyes de la gravedad; mas, por sutiles que sean tales fluidos, obedecen a dicha fuerza, lo mismo que los sólidos y los líquidos. Para comprobarlo, se suspende, debajo del platillo de una balanza muy sensible, un globo de cristal de 3 a 4 litros, cuyo cuello tiene una llave que cierra herméticamente. Pésase primero el globo lleno de aire, y después de hecho el vacío, se le pesa de nuevo, notándose en la segunda pesada que es muchos gramos más ligero, circunstancia que nos patentiza el peso del aire extraído del globo.

Conociendo de antemano el volumen del globo, en litros, se averigua de esta suerte que un litro de aire puro, a la temperatura de 0°, y bajo la presión atmosférica de 0<sup>m</sup>,76 (149), pesa gr. 1,3. Un litro de

hidrógeno, que es el gas más ligero, pesa gr. 0,09, es decir, unas  $14\frac{1}{2}$  veces menos que el aire; y uno de ácido iodhídrico, que es el gas más denso, pesa gr. 5,776.

142. Presiones ejercidas por los gases. -Los gases ejercen sobre las moléculas de su masa y sobre las paredes de las vasijas que los contienen, presiones que podemos considerar bajo dos puntos de vista: 1.º prescindiendo de la gravedad; 2.º tomando en consideración esta fuerza. Si en una masa gaseosa que está en equilibrio en una vasija, prescindimos de su peso, para no fijarnos más que en su expansibilidad, se transmiten las presiones debidas a ésta con la misma intensidad sobre todos los puntos de las paredes y de la masa fluida, porque la fuerza repulsiva que se ejerce entre las moléculas es la misma en todos los puntos y actúa con igualdad en todas las direcciones, lo cual es una consecuencia de la elasticidad y de la perfecta fluidez de los gases. Pero si se toma en cuenta la acción de la gravedad, origina esta fuerza presiones sometidas enteramente a las mismas leyes que rigen para los líquidos (81), es decir, que crecen proporcionalmente a la densidad de los gases y a la profundidad; que son constantes para una misma capa horizontal, e independientes de la forma de la masa gaseosa. En cuanto a la fuerza expansiva del gas, es en tal caso igual y contraria en cada punto a la presión que sufre, creciendo, de consiguiente, con la profundidad. En pequeñas masas gaseosas es despreciable su débil presión; mas, en grandes masas, como la atmósfera, pueden ser considerables las presiones originadas por la gravedad.

143. Composición de la atmósfera. -Se da el nombre de atmósfera a la capa de aire que envuelve a nuestro globo, y al cual sigue en su movimiento por el espacio.

El aire era para los antiguos uno de los cuatro elementos que admitían; pero la química moderna ha descubierto que es una mezcla de nitrógeno y de oxígeno en la relación, en volumen, de 79,20 del primero por 20,80 del segundo. Respecto al peso, su composición es de 23,01 de oxígeno y 76,99 de nitrógeno.

Existe también en la atmósfera vapor de agua en cantidad variable, según la temperatura, las estaciones, los climas y la dirección de los vientos. Por último, contiene el aire, de 3 a 6 diez milésimas de ácido carbónico en volumen.

El ácido carbónico del aire proviene de la respiración de los animales, de las combustiones y de la descomposición de las sustancias orgánicas. Según M. Boussingault, se forma aproximadamente en París en 24 horas la siguiente cantidad de ácido carbónico:

Por la población y los animales.	336,777 metros cúbicos.
Por diversas combustiones.	2.607,864 - -
Total.	2.944,641 metros cúbicos.

A pesar de esta producción permanente de ácido carbónico en la superficie del globo, no se modifica, al parecer, la composición de la atmósfera lo cual proviene de que, en el acto de la vegetación, las partes verdes de los vegetales descomponen el ácido carbónico por la influencia de la luz solar, se asimilan su carbono y restituyen así a la atmósfera el oxígeno que de continuo le están quitando la respiración de los animales y las combustiones.

144. Presión atmosférica. -Si suponemos dividida la atmósfera en capas horizontales, el aire comprime, mediante su peso, las capas inferiores, de donde resulta que, decreciendo evidentemente esta presión con el número de capas, se presenta tanto más enrarecido el aire, cuanto más se asciende en la atmósfera.

Parecía natural, en vista de la fuerza expansiva del aire, que las moléculas de la atmósfera debieran difundirse indefinidamente por los espacios planetarios. Pero es el caso que, por efecto de la misma dilatación, disminuye cada vez más la fuerza expansiva del aire; y si a esta circunstancia añadimos la baja temperatura de las altas regiones de la atmósfera, resulta que llega un momento en que se establece el equilibrio entre la fuerza expansiva de las moléculas del aire y la acción de la gravedad que las solicita hacia el centro de la tierra, de suerte que no puede menos de ser limitada la atmósfera.

Atendidos el peso de la atmósfera, su decrecimiento en densidad y la observación de los fenómenos crepusculares, se evalúa su altura en 50 a 60 kilómetros. Pasado este límite existe un aire sumamente enrarecido, y a unos 100 kilómetros se admite un vacío absoluto. Según observaciones muy recientes

efectuadas en la zona intertropical, y particularmente en Río-Janeiro, respecto a los arcos crepusculares y con relación al límite de la polarización atmosférica, ha encontrado M. Liais, que la altura de la atmósfera sería de 520 a 540 kilómetros, altura que difiere considerablemente de la que hasta hoy se ha admitido.

Supuesto que un litro de aire pesa 1<sup>er</sup>,3 (141), claro está que la atmósfera toda ha de ejercer una presión considerable en la superficie del globo. Se demuestra esta presión por medio de los siguientes experimentos.

145. Rompe-vejigas. -El *rompe-vejigas* es un cilindro de vidrio, que por un extremo se aplica a la máquina neumática, y en el otro lleva bien ajustada una membrana orgánica (fig. 91). Apenas principia a hacerse el vacío, se deprime la membrana por efecto de la presión atmosférica, rompiéndose al fin con fuerte detonación, causada por la súbita entrada del aire.

146. Hemisferios de Magdeburgo. -El *rompe-vejigas* no demuestra la presión atmosférica más que de arriba hacia abajo; pero los hemisferios de Magdeburgo, así llamados a causa del nombre de la ciudad en la cual fueron inventados por Otto de Guéricke, revelan que se trasmite en todos sentidos. Consta este aparato de dos hemisferios huecos (fig. 92), con una rodela anular de cuero impregnada de sebo, a fin de conservar el vacío cuando se hallan en contacto los bordes. Uno de los hemisferios posee una llave para atornillarla a una máquina neumática, y el otro un anillo que sirve de asa para coger o tirar de ella. Si se ponen en contacto los dos hemisferios, podremos separarlos sin dificultad cuantas veces queramos, antes de hacer el vacío, porque existe equilibrio entre la fuerza expansiva del aire interior y la presión exterior de la atmósfera; pero hecho el vacío, ya no es posible separarlos sin un gran esfuerzo, sea cual fuere la posición del aparato (fig. 93); con lo cual queda demostrado, que la presión atmosférica se ejerce en todos sentidos.

▽△

## Medida de la presión atmosférica: barómetros

147. Experimento de Torricelli. -Los dos experimentos anteriores demuestran la existencia de la presión atmosférica, pero no determinan su valor.

El que vamos a describir, efectuado la primera vez por Torricelli, discípulo de Galileo, en 1643, da la medida exacta del peso de la atmósfera.

Se toma un tubo de vidrio de 80 centímetros de longitud por lo menos, de 5 o 6 milímetros de diámetro interior y, cerrado por una de sus extremidades. Teniendo este tubo en la posición vertical CD (figura 94), se le llena de mercurio, y luego, cerrando la abertura C con el dedo pulgar, se vuelve el tubo y se introduce la extremidad abierta en una cubeta llena del mismo mercurio. Quitando entonces el dedo, baja algunos centímetros la columna de mercurio, conservando al nivel de los mares una altura AB que, por término medio, es igual a 76 centímetros.

Como en este experimento se forma un vacío sobre el nivel A del mercurio, no sufre ninguna presión en el tubo este líquido, mientras que en la cubeta se halla sometido a la de la atmósfera. Ésta es, pues, la presión que, gravitando sobre el mercurio de la cubeta, sostiene la columna AB en el interior del tubo; de donde se deduce que la presión atmosférica equivale, por término medio, al peso de una columna de mercurio que tenga 0<sup>m</sup>,76 de altura; pero si aumenta o disminuye el peso de la atmósfera, es excusado advertir que otro tanto le sucederá a la columna AB de mercurio.

148. Experimentos de Pascal. -Tratando de cerciorarse Pascal de que la fuerza que sostenía al mercurio en el tubo de Torricelli era realmente la presión atmosférica, recurrió a los dos experimentos siguientes: 1.º previendo que debía bajar en el tubo la columna de mercurio a medida que se sube en la atmósfera, porque entonces disminuye la presión, rogó a un pariente suyo de la Auvernia que repitiera el experimento de Torricelli en Puy-de-Dome. La columna bajó unos 8 centímetros, lo cual demuestra que realmente la sostiene el peso de la atmósfera, porque si éste disminuye, lo propio le pasa a aquélla; 2.º repitió Pascal el experimento de Torricelli en Rouen, en 1646, reemplazando el mercurio con el agua.

Tomó un tubo de 15 metros de longitud, cerrado por su parte superior, le llenó de agua y lo colocó invertido en un depósito del mismo líquido, y entonces pudo observar que se quedaba el líquido a una altura de  $10^m,33$ , es decir, 13,6 veces mayor que la del mercurio; y como, el agua es 13,6 menos densa que este líquido, claro está que el peso de la columna de agua es igual al de la de mercurio en el experimento de Torricelli. No cupo, pues, la menor duda acerca de que la presión de la atmósfera era la que sucesivamente sostenía a ambos líquidos.

149. Valor de la presión atmosférica en kilogramos. -Vista la altura a que se equilibra el mercurio en el tubo de Torricelli, puede evaluarse fácilmente en kilogramos la presión de la atmósfera sobre una superficie dada. Admitamos que vale un centímetro cuadrado la sección interior del tubo; en tal caso, la columna de mercurio es un cilindro de un centímetro cuadrado de base y de 76 de altura, por lo que su volumen será igual a 76 centímetros cúbicos, pues la medida del volumen de un cilindro es el producto de su base por su altura. Como un centímetro cúbico de agua pesa un gramo, uno de mercurio debe pesar 13,6, supuesto que este líquido es 13,6 veces más denso que el agua; de donde se deduce que el peso de la columna de mercurio equivale a  $13^{gr},6 \times 76 = 1033 \text{ gr.} = 1 \text{ kilog. y } 33 \text{ gr.}$  Sobre un decímetro cuadrado que contiene 100 centímetros cuadrados, vale la presión atmosférica 103 kilog.,  $300^{gr}$ , y sobre un metro cuadrado, que comprende 100 decímetros cuadrados, tiene el valor de 10,330 kilogramos.

La presión media que sufre un hombre es igual a 15,500 kilog., porque se evalúa en metro y medio cuadrado la superficie total del cuerpo humano en un individuo de talla y corpulencia ordinarias. Parecerá a primera vista que debiera aplastarnos presión tan considerable, pero la resiste el cuerpo, merced a la reacción de los fluidos elásticos que contiene. No dificulta en manera alguna los movimientos de nuestros miembros, porque, ejerciéndose en todas direcciones la presión atmosférica, sufrimos en todos sentidos presiones iguales y contrarias que se equilibran, y que son más a propósito para sostenernos que para agobiarnos. En efecto, durante los días en que más débil es la presión atmosférica experimentamos un malestar que nos hace decir que *el tiempo está pesado*, siendo así que debiéramos decir lo contrario.

150. Diferentes especies de barómetros. -Dase el nombre de *barómetros* a unos instrumentos que sirven para medir la presión atmosférica. En los barómetros ordinarios se mide esta presión por la altura de una columna de mercurio en un tubo de cristal, como el del experimento de Torricelli: tales son los barómetros que vamos a describir, y que se dividen en barómetros de cubeta, de sifón y de cuadrante. Además, se construyen barómetros sin mercurio, como el de M. Bourdon, notable por su sencillez y su escaso volumen.

151. Barómetro de cubeta. -El *barómetro de cubeta* ([fig. 95](#)) se compone de un tubo de vidrio de unos 85 centímetros de longitud, lleno de mercurio e introducido en una cubeta llena de este metal. Tal es el aparato descrito con el nombre de tubo de Torricelli ([figura 94](#)). A fin de que sea más portátil el barómetro y menos sensibles las variaciones de nivel en la cubeta, cuando sube o baja el mercurio en el tubo, se han dado a aquélla muchas formas.

La cubeta consta de dos cavidades *m* y *n*, de las cuales la mayor está masticada en el tubo, y no comunica con la atmósfera más que por una pequeña abertura que cubierta de una rodajita de piel *a* que se ve representada sobre la pared superior de la cubeta, cerca del tubo. Debajo de la primera cavidad está la más pequeña *u*, completamente llena de mercurio, mientras que la primera no lo está más que parcialmente. Estos dos compartimientos se hallan reunidos por una parte estrecha, en la que penetra la extremidad del tubo barométrico A. Éste no cierra por completo la tubuladura que reúne los dos compartimientos, sino que deja un intervalo suficientemente pequeño para que la capilaridad no permita que se salga el mercurio de la cavidad *n*, al inclinar o al invertir el barómetro. De consiguiente, en todas las posiciones se halla introducida en el líquido la punta aguzada del tubo, sin que en éste pueda penetrar el aire.

Todo el aparato se halla fijo en una tabla de caoba que lleva en su parte superior una escala graduada en milímetros a partir del nivel del mercurio en la cubeta: un indicador móvil *i* sirve para comprobar en la escala el nivel *o* del mercurio.

Este barómetro, así como todos los del mismo género, es poco exacto, porque el cero de la escala no corresponde invariablemente al nivel del mercurio en la cubeta. En efecto, como no es constante la presión de la atmósfera, varía este nivel siempre que aumenta o disminuye dicha presión, porque en tales casos pasa del tubo a la cubeta, o vice-versa, cierta cantidad de mercurio, resultando de aquí que casi

nunca indica la graduación de la escala la verdadera altura del barómetro: no tardaremos en ver que el de Fortin evita esta causa de error.

Llámanse *altura* del barómetro la diferencia de nivel que existe entre el mercurio del tubo y el de la cubeta. Como la presión que por su peso ejerce el mercurio en la base del tubo es independiente de la forma de éste y de su diámetro (83), con tal que no sea capilar, *i* su vez también la altura del barómetro es independiente del diámetro del tubo y de su forma recta o curva; pero esta altura se halla en razón inversa de la densidad del líquido. La altura media del barómetro de mercurio al nivel del mar es de  $0^m,76$ ; la cual sería en uno de agua de  $10^m,53$ .

152. Barómetro de Fortin. -El *barómetro de Fortin*, así llamado en memoria del apellido de su inventor, es de cubeta; pero difiere ésta de la del ordinario (151). El fondo es de piel de gamuza, y puede subir o bajar por medio de un tornillo de presión situado en la parte inferior, obteniéndose así dos ventajas, que son la de poder tenerse un nivel constante en la cubeta, y la de ser más portátil el instrumento. En efecto, para transportarlo en las prácticas, basta levantar el fondo hasta que el mercurio llene por completo el tubo y la cubeta, en cuyo caso puede tomar el instrumento todas las posiciones que se quiera, sin temor de que se introduzca el aire, ni de que rompa el tubo el choque del mercurio.

La [figura 96](#) representa el conjunto de este barómetro, cuyo tubo se halla encerrado en un estuche de cobre, que posee dos aberturas longitudinales y opuestas entre sí, a fin de que se vea el nivel B del mercurio. En el estuche hay una escala graduada en milímetros. Un indicador A, que se hace correr con la mano, da por medio de un vernier la altura del barómetro con una aproximación de  $\frac{1}{10}$  de milímetro. En la parte inferior del estuche se encuentra fija la cubeta B que contiene el mercurio 0.

La [figura 97](#) da en mayor escala los detalles de la cubeta, compuesta de un cilindro de vidrio que permite observar el nivel del mercurio. El fondo de este cilindro se halla cerrado por una piel de gamuza BD, que se hace subir y bajar por medio de un tornillo C. La tuerca de éste se halla abierta en el fondo de un cilindro de cobre G, fijo debajo del de vidrio que contiene el mercurio. Por último, en la pared superior de la cubeta existe una punta de marfil A, cuya extremidad corresponde exactamente al cero de la escala graduada en el estuche. En cada observación se cuida de que el mercurio de la cubeta enrarse con esta punta, para lo cual se da vuelta al tornillo C. De esta suerte, la distancia del vértice B de la columna de mercurio a la punta de marfil *a* ([fig. 96](#)), representa exactamente la altura del barómetro.

153. Barómetro de sifón de Gay-Lussac. -El *barómetro de sifón* consiste en un tubo de vidrio encorvado en dos ramas desiguales. La mayor se halla cerrada en su extremidad superior y llena de mercurio, como en el barómetro de cubeta, haciendo veces de ésta la menor, que se encuentra abierta. La diferencia de nivel en las dos ramas es la altura del barómetro.

La [fig. 98](#) representa el barómetro de sifón tal cual le modificó Gay-Lussac, quien, a fin de poderle transportar más fácilmente sin que le penetrara el aire, reunió las dos ramas por medio de un tubo capilar, que se ve en la parte interior del barómetro. Al invertir el instrumento, queda siempre lleno este tubo en virtud de la capilaridad, sin que pueda el aire introducirse en la rama mayor. Con todo, fácil es que un choque demasiado brusco divida la columna mercurial en este tubito, abriendo así paso al aire. Para obviar este inconveniente adoptó M. Buntzen una modificación ([fig. 99](#)), por la cual el tubo capilar, en vez de hallarse soldado en la rama mayor, lo está con un tubo K de gran diámetro, en el cual penetra esta rama en forma de punta afilada. Mediante esta disposición, si pasan burbujas de aire al tubo capilar, no pueden abrirse paso por la punta afilada del tubo, y se colocan en K, en donde no perjudican, porque siempre continúa el vacío en el vértice.

En el barómetro de Gay-Lussac, la rama corta se halla cerrada por su extremidad superior, poseyendo tan sólo una pequeña abertura lateral *a*, con objeto de que se ejerza la presión atmosférica.

Se mide la altura por medio de dos escalas que tienen su cero común en O, hacia el centro de la rama mayor, y graduadas en sentido contrario, una de O, hacia E y otra de O hacia B, en dos reglas de cobre paralelas al tubo barométrico. Dos indicadores con vernier *m* y *n* pueden correr a lo largo de las escalas, marcando los números de milímetros y de décimas de milímetro contenidos de O a A y de O a B. Sumando los dos números que así se obtienen, resulta la altura total AB.

La [figura 98](#) representa el barómetro de Gay-Lussac, fijo en una tabla de caoba lo cual facilita su manejo. Cuando se viaja, se le encierra en un estuche de cobre semejante en un todo al del barómetro de Fortin ([fig. 96](#)), a excepción de la cubeta.

154. Condiciones a que deben de satisfacer los barómetros. -Lo que vamos a exponer acerca de la construcción de los barómetros, se aplica a todos los de mercurio. Para la fabricación de estos instrumentos se elige el mercurio, porque es el líquido más denso, y por lo tanto el que adquiere menor altura; merece además esta preferencia por su débil volatilización y porque no moja al vidrio. Importa que esté perfectamente puro y nada oxidado el mercurio, pues de lo contrario *forma cola*, es decir, se adhiere al vidrio y le empaña. Por otra parte, si es impuro, varía su densidad, y la altura del barómetro, o es muy grande o muy pequeña.

Es menester que el espacio vacío que queda en la parte superior del tubo del barómetro ([fig. 94](#), y [95](#)), y que se llama *cámara barométrica* o *vacío de Torricelli*, esté completamente purgado de aire y de vapor de agua, pues de lo contrario deprimirían estos fluidos la columna de mercurio en virtud de su fuerza elástica. Para obtener este resultado no se vierte primero en el tubo más que parte del mercurio que ha de llenarle, y se le calienta hasta la ebullición; déjasele luego que se enfríe, vertiendo de nuevo mercurio, que también se hace hervir, y así sucesivamente hasta que se encuentre lleno el tubo. De esta manera los vapores de mercurio arrastran al aire y la humedad adheridos a las paredes del tubo.

Se conoce que un barómetro está bien purgado de aire y de humedad, cuando inclinado suavemente produce un sonido seco y metálico, determinado por el choque del líquido contra la extremidad del tubo. Si hay humedad o aire en el instrumento, el sonido no es metálico.

155. Corrección relativa a la capilaridad. -Siempre se nota, en la altura del mercurio de los barómetros de cubeta, cierta depresión debida a la capilaridad. Basta para corregir este error conocer el diámetro interior del tubo barométrico, porque entonces, por medio del cuadro que hemos insertado en el párrafo 126, se determina la presión que constantemente hay que añadir a las alturas observadas. Cuando el diámetro interior no se conoce, se deduce aproximadamente del diámetro exterior, restando de éste  $2^{\text{mil}},3$ , si es de 8 a 10 milímetros, y  $2^{\text{mil}},5$ , si es de 10 a 12 milímetros. Para un tubo de 20 milímetros de diámetro interior, sería despreciable el error originado por la capilaridad.

En el barómetro de Gay-Lussac ([fig. 98](#)), se evita la corrección de capilaridad, cuidando de que las dos ramas A y B tengan el mismo diámetro, porque siendo iguales las depresiones en A y en B, conserva su verdadera longitud la columna AB.

156. Corrección relativa a la temperatura. -No hay que olvidarse nunca de la temperatura en todas las observaciones barométricas, pues dilatándose o contrayéndose el mercurio por efecto de las variaciones de temperatura, se modifica su densidad, y por lo tanto su altura, la cual se halla en razón inversa de la densidad del líquido del tubo (151); de suerte que, en presiones atmosféricas diferentes, se pueden tener alturas iguales en el barómetro. Interesa, pues, relacionar siempre en cada observación la altura con una temperatura de terminada o invariable. Siendo ésta completamente arbitraria, se ha elegido la del hielo fundente, y, como se verá en el estudio del calor, se efectúa por medio del cálculo esta corrección. A fin de conocer la temperatura del mercurio en el barómetro, se sitúa siempre un termómetro próximo al tubo como se ve en las [figuras 96](#) y [98](#).

También se puede, por medio de un cálculo muy sencillo, reducir a 0 la altura del barómetro, sirviéndose de tablas de corrección que con este objeto se han formado y publicado en Francia en el Anuario de la Oficina o Sección de longitudes, del año 1838.

157. Variaciones de la altura barométrica. -Si se observa el barómetro durante muchos días, se nota que varía su altura en cada lugar, no sólo de un día a otro, sino también en un mismo día.

La amplitud de las variaciones, es decir, la diferencia media entre las alturas mayor y menor, no es la misma en todas partes, pues crece del Ecuador a los polos. Las mayores variaciones, exceptuados los casos extraordinarios, son de 6 milímetros en el Ecuador, de 30 en el trópico de Cáncer, de 40 en Francia, en la latitud media, y de 60, a 25 grados del polo. Por último, en invierno se verifican las mayores variaciones.

Llámanse *altura media diurna* al número que se obtiene sumando las veinte y cuatro observaciones sucesivas del barómetro, efectuadas de hora en hora, y dividiendo esta suma por veinte y cuatro. M. Ramond comprobó experimentalmente que, a la latitud de París, la altura del barómetro a medio día es sensiblemente la *altura media diurna*.

La *altura media mensual* se obtiene sumando las alturas medias diurnas durante un mes, y dividiendo por 30.

Por último, la *altura media anual* se determina sumando las alturas medias de cada día durante un año y dividiendo la suma por 365.

En el Ecuador, la media anual a nivel del mar es  $0^m,758$ . Aumenta a medida que nos alejamos de aquél, y llega, entre las latitudes de 30 a 40 grados, al máximo de  $0^m,763$ . Decece en las latitudes más altas, y en París no asciende más que  $0^m,756$ .

La media general al nivel de los mares es, al parecer,  $0^m,761$ .

La media mensual es más alta en invierno que en verano, lo cual es una consecuencia del enfriamiento de la atmósfera.

Distínguense en el barómetro dos especies de variaciones, que son: 1.º las *variaciones accidentales*, que no ofrecen regularidad alguna en su marcha, y que dependen de las estaciones, de la dirección de los vientos y de la posición geográfica, tales son las que se observan sobre todo en nuestros climas; 2.º las *variaciones diurnas*, que se producen periódicamente a ciertas horas del día.

En el Ecuador y en las regiones intertropicales no se conocen la primera clase de dichas variaciones, esto es, las que dependen de causas accidentales; pero las diurnas se repiten con una regularidad tal, que hasta cierto punto pudiera servir de reloj el barómetro. A contar del medio día, baja éste hasta las cuatro, que es la hora del mínimo, y luego vuelve a subir hasta las diez de la noche, en que llega a su máximo. Por último, baja de nuevo, siendo el mínimo a las cuatro de la madrugada, y el segundo máximo a las diez de la mañana.

En las zonas templadas hay también variaciones diurnas, pero se comprueban con más dificultad que en el Ecuador, porque se confunden con las accidentales.

Las horas de máxima y de mínima de las variaciones diurnas son, al parecer, las mismas en todos los climas, sea cual fuere la latitud, variando tan sólo algún tanto con las estaciones.

158. Causas de las variaciones barométricas. -Nótase que el barómetro y el termómetro siguen opuesta marcha, es decir, que cuando sube la temperatura baja el barómetro, y vice-versa, lo cual indica que las variaciones barométricas en un punto determinado, resultan de las dilataciones o de las contracciones del aire en aquel punto, y por consiguiente de su cambio de densidad. Si fuese constante y uniforme en toda la extensión de la atmósfera la temperatura del aire, no se produciría corriente alguna en el seno de aquélla, y por lo tanto sería invariable, y por todas partes una misma la presión atmosférica en igualdad de altura. Pero cuando cierta región de la atmósfera se calienta más que las que la rodean, el aire dilatado sube en virtud de su ligereza específica, y asciende a las altas regiones, resultando de aquí que decece la presión y baja el barómetro. Igual efecto se obtendría si, conservando una región de la atmósfera la misma temperatura, se enfriasen las regiones vecinas; porque entonces ascendería el aire de la primera en virtud de su menor densidad. Por esto sucede comúnmente que un descenso extraordinario en un punto se halla compensado por una subida semejante en otro.

En cuanto a las variaciones diurnas, dependen, por lo visto, de las dilataciones y contracciones producidas periódicamente en la atmósfera por efecto de la acción calorífica del sol durante la rotación de la tierra.

159. Relación entre las variaciones barométricas y el estado del cielo. -Se observa en nuestros climas que el barómetro no pasa en el buen tiempo, de  $0^m,758$ ; que baja del mismo punto en las épocas de viento, de lluvia, de nieve, o de tempestad; y por fin, que, por término medio, marcando el barómetro  $0^m,758$ , hay tantos días de buen tiempo como de lluvia. En vista de esta coincidencia entre la altura del barómetro y el

estado del cielo, se han marcado en el barómetro las siguientes indicaciones, contando de 9 en 9 milímetros a partir de la altura de 0<sup>m</sup>,758.

Altura.	Estado de la atmósfera.
731	tempestad.
740	gran lluvia.
749	lluvia o viento.
758	variable.
767	buen tiempo.
776	buen tiempo fijo.
785	muy seco.

Sin dejar de consultar el barómetro como instrumento adecuado para anunciar los cambios o mudanzas de *tiempo*, no se pierda de vista que en realidad sólo mide el peso del aire, y que sube o baja según aumenta o disminuye este peso. Así, pues, aun cuando las más de las veces coinciden esos cambios de tiempos con las variaciones de presión, no por eso debe suponerse que unos y otros estén invariablemente relacionados. Depende esta coincidencia de condiciones meteorológicas peculiares de nuestro clima, y no deja de tener sus excepciones. Si el descenso del barómetro precede ordinariamente a la lluvia, debemos atribuirlo a la posición de la Europa; efectivamente, los vientos del sudoeste, que son los más calientes, y por lo mismo los menos pesados, hacen bajar al barómetro, pero al mismo tiempo, como se cargan de vapor acuoso al atravesar el Océano, nos traen la lluvia. Como los vientos del norte y del noroeste son, por el contrario, fríos y más densos, hacen subir el barómetro, pero como llegan después de una larga travesía por vastos continentes, reinan exentos de humedad y acompañados, en general, de un cielo puro y sereno.

Los vientos calurosos del sudoeste propenden a aumentar la presión atmosférica por el peso y la tensión del vapor que contienen; pero al propio tiempo tienden también a disminuirla mediante su dilatación. Por ser más enérgica esta segunda influencia, resulta en definitiva que a causa de la elevación de su temperatura, son los vientos del mar en nuestros climas, la causa del descenso del barómetro. El efecto contrario producirían los vientos fríos del mar. En la desembocadura de la Plata, por ejemplo, se presenta más alto el barómetro cuando reinan los vientos orientales de mar, que cuando se dejan sentir los de oeste, que soplan del continente, lo cual se explica por la elevada temperatura de estos últimos. Ignoramos las indicaciones del barómetro en Egipto; pero fácil es prever que los vientos que soplan del golfo Pérsico harán bajar el termómetro y producirán lluvias, porque son cálidos y húmedos; mientras que, por el contrario, los del sudoeste, que son calurosos y que han atravesado el desierto, deben hacer bajar el barómetro, originando la sequía.

Cuando sube o baja lentamente el barómetro, es decir, durante dos o tres días, hacia el buen tiempo o hacia la lluvia, resulta de un gran número de observaciones, que las indicaciones que da este instrumento son entonces sumamente probables. En cuanto a las variaciones bruscas, en uno u otro sentido, presagian el mal tiempo o el viento. En vista de las observaciones anteriores, de la dirección de los vientos y de la temperatura del aire, pueden deducirse del barómetro útiles indicaciones, particularmente para la agricultura. No se eche en olvido que el cuadro indicador, dado más arriba, es el resultado de antiguas observaciones hechas en París. La mayor parte de los constructores de barómetros han adoptado uniformemente las mismas señales para toda la Francia y para todos los países de la tierra. Claro está, pues, que esas indicaciones serán completamente falsas en localidades más altas que París, o situadas en condiciones geográficas diferentes. Véase por qué es necesario conocer la posición geográfica del punto en el cual se emplee el instrumento.

160. Barómetro de cuadrante. -El *barómetro de cuadrante*, debido a Hook, es un barómetro de sifón, que tiene por principal objeto indicar el buen o mal tiempo. Dásele este nombre, porque lleva un cuadrante que recorre una larga aguja ([figura 100](#)), que pone en movimiento el mismo mercurio del aparato, mediante un mecanismo representado en la [figura 101](#). En el eje de la aguja se encuentra fija una polea O, en la cual se arrolla un hilo que lleva en una de sus extremidades un peso P, y en la otra un flotador algo más pesado que éste y sostenido por el mercurio de la rama menor del tubo barométrico. Si aumenta la

presión atmosférica, baja en la rama pequeña el nivel, desciende el flotador y arrastra la polea la aguja de izquierda a derecha. Verifícase el movimiento contrario cuando disminuye la presión, porque sube el mercurio en la rama pequeña, sucediéndole otro tanto al flotador. Resulta de aquí que se para la aguja en las palabras *variable, lluvia, buen tiempo*, etc., cuando alcanza la columna las correspondientes alturas, con tal que esté bien regulado el instrumento, cuya condición raras veces satisfacen los del comercio.

161. Medición de alturas por medio del barómetro. -Como decrece la presión de la atmósfera a medida que se llega a sitios altos, claro está que debe bajar el barómetro tanto más, cuanto mayor sea la altura, de modo que puede servirnos este instrumento para apreciar la altura de las montañas.

Si no variase la densidad del aire en todas las capas de la atmósfera, se deduciría, por medio de un cálculo muy sencillo, la altura a que se había llegado en vista de la cantidad que hubiese descendido el barómetro. En efecto, siendo la densidad del aire 10466 veces menor que la del mercurio, si bajase un milímetro, por ejemplo, el barómetro, indicaría que la columna de aire que equilibra la de mercurio, ha disminuido 10466 veces más, es decir, 1 milímetro multiplicado por 10466, o  $10^m,466$ . Tal sería, pues, la altura a que se hubiese subido. Si la depresión del mercurio fuese de 2, 3... milímetros, indicaría que el ascenso era igual a dos, tres... veces  $10^m,466$ . Pero como decrece la densidad del aire a medida que se asciende en la atmósfera, no es aplicable el cálculo anterior sino para alturas pequeñas.

Para medir la altura de las montañas por medio del barómetro, dio Laplace la fórmula

$D=18393 (1+0,002837 \cos. 2f) [1+2(T+t)/1000] \log. A/a$ , en la cual D representa la distancia vertical entre los dos lugares cuya diferencia de nivel se busca, A la altura del barómetro en la estación inferior, y a la de la estación superior; T y t son las temperaturas del aire correspondientes a cada observación; y f es la latitud.

Para la latitud de  $45^\circ$   $\cos. 2f=0$ , la fórmula se transforma en

$$D=18393 [1+2(T+t)/1000] \log. A/a.$$

Para alturas menores de 1000 metros, ha propuesto recientemente M. Babinet la fórmula  $D=16000m (A-a/A+a) [1+2(T+t)/1000]$  que dispensa el empleo de los logaritmos.

M. Oltmanns ha formado tablas para calcular de un modo muy sencillo la diferencia de nivel entre dos puntos cuando se conocen las alturas A y a del barómetro en la superior y en la inferior, así como las temperaturas T y t en los mismos lugares. Se encontrarán estas tablas y el modo de usarlas en el Anuario de la Oficina de longitudes de Francia.

Si no es muy grande la altura que se ha de medir, puede efectuarlo un solo individuo; pero si es un poco considerable y exige un tiempo de ascenso algo largo, durante el cual puede variar la presión atmosférica, es preciso que sean dos personas y que empleen dos barómetros que concuerden muy bien entre sí. Uno de los observadores se queda al pie de la montaña, mientras que el otro se sube a la cumbre, y luego, a una hora dada, observan simultáneamente el barómetro, de suerte que la diferencia de las columnas dependa enteramente de la de los niveles.

▽△

## Capítulo II

▽△

### Medida de la fuerza elástica de los gases

162. Ley de Mariotte. -El abate Mariotte, físico francés, muerto en 1684, fue el primero que estableció la siguiente ley acerca de la compresibilidad de los gases: *En igualdad de temperatura, el volumen de una masa dada de gas, está en razón inversa de la presión que sufre.*

Demuéstrase esta ley, por lo que toca al aire, por medio del siguiente aparato, conocido con el nombre de *tubo de Mariotte*. En una tabla de madera, mantenida verticalmente, se halla fijo un tubo de vidrio encorvado en forma de sifón, cuyas dos ramas son desiguales ([fig. 102](#)). A lo largo de la rama menor, que está cerrada, existe una escala que indica capacidades iguales, mientras que otra escala, situada en la rama mayor, señala las alturas en centímetros. Los ceros de las dos escalas se encuentran en una misma línea horizontal.

Para hacer el experimento, se introduce primero mercurio en el aparato, de manera que el nivel del líquido corresponda al cero en ambas ramas, lo cual se obtiene después de algunos tanteos. El aire encerrado en la rama menor se halla sometido entonces a la presión atmosférica que se ejerce en la mayor, en la superficie del mercurio, pues de lo contrario no sería uno mismo el nivel. Viértese, por fin, mercurio en la rama grande hasta que la presión que determina reduzca a la mitad el volumen el aire encerrado en la rama pequeña, es decir, hasta que dicho volumen, que era 10 en un principio pase a 5. Midiendo entonces la diferencia de nivel CA del mercurio en los dos tubos, se encuentra que es precisamente igual a la altura del barómetro en el momento en que se experimenta. La presión de la columna CA equivale, pues, a una atmósfera. Añadiéndole la presión atmosférica que se ejerce en C, en el vértice de la columna, se ve que, en el momento en que se ha reducido a la mitad el volumen de aire, se ha duplicado la presión primera, con lo cual queda demostrada la ley.

Si la rama grande es bastante larga para que se pueda verter en ella mercurio hasta que el volumen de aire en la rama menor, se reduzca al tercio de su volumen primitivo, se nota que la diferencia de nivel en los dos tubos es igual a dos veces la altura del barómetro, es decir, que equivale a dos presiones atmosféricas, las cuales, sumadas con la que directamente se ejerce en la superficie del mercurio del tubo mayor, dan una presión de tres atmósferas. De consiguiente, con una presión triple se ha hecho tres veces menor el volumen de aire. De esta suerte se ha comprobado la ley de Mariotte respecto del aire, hasta 27 atmósferas, por los Sres. Dulong y Arago, quienes se sirvieron de un aparato análogo al que acabamos de describir.

Para demostrar la ley de Mariotte en otro gas cualquiera, debería modificarse el aparato anterior, a fin de introducir en él el gas que se quisiera.

La ley de Mariotte se comprueba también respecto a presiones inferiores a una atmósfera. Al efecto, se llenan de mercurio aproximadamente las dos terceras partes de un tubo barométrico, ocupando el aire el resto de su capacidad: luego se le invierte y se le introduce en una vasija o recipiente profundo, lleno de azogue ([fig. 103](#)), metiendo el tubo hasta tanto que el nivel del líquido sea el mismo, así en el interior como en el exterior. Llegado este momento, la escala del tubo indica el volumen de aire encerrado. Se sube en seguida éste, conforme lo indica la figura, hasta que, a causa de disminuir la presión, se duplique el volumen de aire. Entonces se observa que la altura del mercurio que se eleva en el tubo A, es igual a la mitad de la del barómetro. El aire, pues, cuyo volumen se ha duplicado, se encuentra a media presión atmosférica, porque la fuerza elástica del aire es la que, sumada con el peso de la columna elevada, equilibra a la presión atmosférica exterior. Es exacto, por lo tanto, que el volumen se halla en razón inversa de la presión.

En el experimento del tubo de Mariotte no varía la masa del aire encerrado en aquél, y por esto su densidad es necesariamente tanto mayor, cuanto más reducido se halla su volumen; de lo cual se deduce, como consecuencia de la ley de Mariotte, el siguiente principio: *Siendo igual la temperatura, la densidad de un gas es proporcional a la presión que experimenta.* Por lo tanto, si a la presión ordinaria es el aire 770 veces menos denso que el agua, claro está que a una presión de 770 atmósferas ofrecerá aquél la misma densidad que ésta, suponiendo que a una presión tal continuara siendo gaseoso, lo cual ignoramos.

Se había admitido, hasta hace poco, la ley de Mariotte de una manera absoluta para todos los gases y bajo todas las presiones; pero M. Despretz fue el primero en hacer ver que el ácido carbónico, el hidrógeno sulfurado, el amoníaco, y el cianógeno son más compresibles que el aire; que el hidrógeno si bien en un principio manifiesta la misma compresibilidad que el aire hasta una presión de 15 atmósferas, pasado este

límite disminuye en él aquella propiedad; así es, que en atención a estos resultados, alcanzados por las experiencias de M. Despretz, se ha deducido que la ley de Mariotte no es de una aplicación general.

Acababa de asentarse la deducción que hemos escrito, cuando Dulong y Arago, dieron comienzo a sus investigaciones sobre la fuerza elástica del vapor de agua, en las cuales debían emplear para medir la tensión del mismo, un manómetro de aire comprimido (135). A fin de garantizar la exactitud de este instrumento, lo graduaron, no sujetándose a la ley de Mariotte, sino sometiendo directamente el aire encerrado en el manómetro, a presiones cada vez más intensas. Para conseguirlo, el tubo manométrico se introdujo en un receptáculo de hierro fundido, lleno de mercurio, herméticamente cerrado y que se hallaba en comunicación con un tubo vertical de 25 metros de altura, el cual correspondía a la rama mayor del tubo de Mariotte, mientras que el manómetro hacía las veces de la rama menor. Al verter gradualmente el mercurio en el gran tubo, se transmitía la presión al que contenía el receptáculo de hierro, y el líquido ascendía en el tubo manométrico comprimiendo el aire encerrado en él. De esta suerte, observando la reducción de su volumen, por la altura del mercurio en el gran tubo, se deducía la presión que correspondía a las reducciones del volumen del aire. Empleando este sistema, los dos físicos ya nombrados, extendieron sus investigaciones hasta la presión de 27 atmósferas, y notaron que el volumen del aire disminuía siempre algo más que lo que indicaba la ley de Mariotte; pero siendo muy exiguas las diferencias, las atribuyeron a inexactitudes cometidas en las observaciones, y admitieron que aquella ley era rigurosamente exacta para el aire, o cuando menos hasta la presión de 27 atmósferas, límite de sus experiencias.

Finalmente, M. Regnault, publicó en 1847 varias experiencias respecto a la compresibilidad de los gases, efectuadas con un aparato que guardaba mucha analogía con el de Dulong y Arago, pero en el cual se habían tenido en cuenta todas las inexactitudes, efectuándose las operaciones con extrema precisión. Las experiencias de M. Regnault, efectuadas con el aire, el azoe, el ácido carbónico y el hidrógeno, atestiguaron desde luego, que el aire no sigue rigurosamente la ley de Mariotte, que se comprime mucho más de lo que ésta indica y además que su compresibilidad aumenta con la presión, es decir, que los resultados obtenidos por la observación y los que se deducen de la ley de Mariotte difieren tanto más, cuanto más enérgica es la presión.

Según M. Regnault, el azoe se comporta de igual manera que el aire, con la sola diferencia de ser menos compresible. Respecto al ácido carbónico, se separa mucho más este gas de la ley de Mariotte, cuando son algo considerables las presiones, sucediendo lo propio con el hidrógeno, pero su compresibilidad disminuye, en vez de aumentar con la presión.

Finalmente, ha deducido M. Regnault de sus observaciones, que el ácido carbónico se aleja tanto más de la ley de Mariotte, cuanto más elevada sea la temperatura, admitiéndose en general, que acontece lo propio respecto a los demás gases. En efecto, la experiencia demuestra que los gases se separan tanto más de la ley de Mariotte, cuanto más se aproximan a su punto de liquefacción, y que por el contrario, separándose de este punto tiende cada vez la compresibilidad a ser proporcional a la presión. Consignemos por último, que respecto a todos los gases que no han podido licuarse, las diferencias entre la ley de Mariotte, y la observación son tan sumamente pequeñas, que pueden despreciarse por completo en las experiencias físicas y químicas siempre que en éstas, sólo se consideren presiones de poca consideración cual acontece comúnmente.

163. Aplicaciones de la ley de Mariotte. -He aquí, acerca de la ley de Mariotte, algunos problemas de uso frecuente en física y en química.

I. Una vasija, de paredes compresibles, contiene 4 lit., 3 de aire, siendo 0m,74 la presión: ¿cuál sería el volumen del aire a la presión de 0m,76, en el supuesto de que no ha variado la temperatura?

Si el volumen del aire es 4 litros, 3 a la presión de 0m,74, sería, en virtud de la ley de Mariotte, 74 veces mayor a la presión de 0m,01, o 4 lit.,  $3 \times 74$ ; y según la misma ley, será 76 veces menor a la presión de 0m,76, esto es,  $4,3 \times 74 / 76 = 4$  lit., 186.

II. Se tienen 20 litros de gas a la presión ordinaria: ¿qué presión se necesitaría, en atmósferas, para reducir dicho volumen a 8 litros?

Para reducir el volumen de 20 litros a uno solo, se requería, por la ley de Mariotte, una presión 20 veces mayor, o 20 atmósferas; para hacerlo pasar de un solo litro a 8, habría de ser la presión 8 veces menor, es decir,  $20/8=2\frac{1}{2}$  atmósferas.

III. Un litro de aire pesa 1 gr., 3, a  $0^\circ$  y a la presión de 76c de mercurio: ¿cuál será su peso, en igualdad de temperatura, si baja la presión a 72c?

Siendo directamente proporcional a la presión el peso de un volumen dado de gas, un litro de aire a la presión de 1c pesaría 76 veces menos que a la de 76, es decir,  $1\text{gr},3/76$ , y a la de 72c, pesa 72 veces más, o  $1\text{gr},3 \times 72/76=1\text{gr},23$ .

164. Manómetros. -Dase el nombre general de *manómetro* a los instrumentos destinados a medir la tensión de los gases o de los vapores, cuando ésta es superior a la presión atmosférica. Existen el manómetro de aire libre, el de aire comprimido y el metálico.

En estos diferentes géneros de manómetros, la unidad de medida es la presión atmosférica cuando la altura del barómetro llega a 0m,76. Se ha visto ya (149) que esta presión, en un centímetro cuadrado, equivale al peso de  $1^{\text{kil}},033^{\text{gr}}$ ; por consiguiente, si se dice de un gas que tiene la tensión de dos, de tres atmósferas, se da a entender que ejerce en cada centímetro cuadrado de las paredes que lo contienen una presión igual a dos o tres veces  $1^{\text{kil}},033^{\text{gr}}$ .

165. Manómetro de aire libre. -El *manómetro de aire libre* se compone de un tubo BD (fig. 104) de cristal, de unos 5 metros de longitud, y de una cubeta de hierro forjado que contiene el mercurio en que se ha de introducir el tubo. Éste, abierto por sus dos extremidades, se halla sólidamente masticado en la cubeta y fijo en una tabla de abeto, a lo largo de la cual se ve un segundo tubo AC de hierro y de 4 metros de altura. Por este tubo se trasmite al mercurio de la cubeta, la presión del gas o del vapor. Como las más de las veces funcionan los manómetros en contacto con vapor que reblandecería el mástic que fija el tubo de cristal a la cubeta, se llena el tubo AC de agua, a fin de que reciba ésta directamente la presión del vapor y la trasmita al azogue.

Para graduar el manómetro, se deja el orificio A en comunicación con la atmósfera, y en el nivel, en donde se para entonces el mercurio en el tubo de cristal, se pone el número 1, es decir, una atmósfera; luego a partir de este punto, de 76 en 76 centímetros, se marcan las cifras 2, 3, 4, 5, 6, que indican el número de atmósferas, pues sabido es que una columna de mercurio de 76 centímetros representa la presión atmosférica. Divídense, por último, los intervalos de 1 a 2, de 2 a 3... en 10 partes iguales, y se obtendrán décimos de atmósfera.

Poniendo en seguida el tubo A en comunicación con una caldera de vapor, sube el mercurio en el tubo BD a una altura que mide la tensión de aquél. En nuestro dibujo marca el manómetro 4 atmósferas, que están representadas por 3 veces la altura de 76 centímetros, más la presión atmosférica que se ejerce en el vértice de la columna.

El manómetro de aire libre sólo se usa para presiones que no pasan de 5 a 6 atmósferas; más allá de este término, fuera preciso dar al tubo BD una longitud que le haría tan frágil como embarazoso. Para estos casos se recurre al siguiente manómetro.

166. Manómetro de aire comprimido. -El *manómetro de aire comprimido*, fundado en la ley de Mariotte, se compone de un tubo de cristal, cerrado en su extremidad superior y lleno de aire seco. Introdúcese este tubo en una cubeta llena en parte de mercurio, y en la cual se halla masticado. Ésta, por medio de un tubo lateral A (fig. 105), se pone en comunicación con la vasija cerrada, que contiene el gas o el vapor, cuya fuerza elástica se trata de medir.

En cuanto a la graduación de este manómetro, es tal la cantidad de aire encerrada en el tubo, que cuando el orificio A comunica con la atmósfera, el nivel del mercurio es el mismo en el tubo y en la cubeta. De consiguiente, se escribe el número 1 en este nivel en la placa que sostiene al tubo. Nótese, para el resto de la graduación, que si crece la presión que se trasmite por el tubo A, sube por él el mercurio hasta que su peso, sumado con la tensión del aire comprimido, equilibra a la presión exterior. Resulta de ahí que, si se marcasen 2 atmósferas en medio del tubo, a partir de 1, se cometería un error; porque cuando se reduce a

la mitad el volumen del aire del tubo, su tensión, en virtud de la ley de Mariotte, vale 2 atmósferas; por consiguiente, sumada con el peso de la columna de mercurio del tubo, representa una presión mayor que 2 atmósferas. No hay que marcar el número 2 en medio del tubo, sino un poco más abajo, a una altura tal, que la fuerza elástica del aire comprimido, sumada al peso de la columna de mercurio del tubo, equivalga a 2 atmósferas. Por medio del cálculo se determinará la exacta posición de los números 2, 3, 4... en la escala del manómetro.

Para efectuar este cálculo, consideremos desde luego el caso en que el diámetro interior de la cubeta sea bastante grande para que pueda admitirse que permanece en ella sensiblemente constante el nivel, cuando se eleva el mercurio en el tubo. Hecha esta suposición, pongamos en comunicación el manómetro con un vaso que contenga un gas comprimido, representando por  $F$  la tensión en centímetros en el vaso, por  $h$  la altura en el tubo manométrico a contar desde el nivel del mercurio en la cubeta, y por  $x$  a altura a la cual se eleva el mercurio por efecto de la presión  $F$ .

Siendo en un principio la presión exterior de una atmósfera, o sea de 76 centímetros, el volumen del aire en el tubo manométrico, puede representarse por  $h$ , y trasformándose después la presión exterior en  $F$ , el volumen de aire se reduce a  $h-x$ , por consiguiente aumenta entonces su compresión y adquiere la tensión que se calcula según la ley de Mariotte, según vamos a consignar:

$$f/76=h/h-x, \text{ de donde } f=76h/h-x.$$

Pero como  $F$  equilibra a la columna de mercurio  $x$ , y a la elasticidad  $f$  del aire comprimido, se tiene  $F=76h/h+x+x$  [1]; de cuya igualdad se deducen los dos valores

$$x'=(F+h)+\sqrt{(F+h)^2-4h(F-76)/2},$$

$$x''=(F+h)-\sqrt{(F+h)^2-4h(F-76)/2}.$$

La segunda ecuación es la única que satisface la cuestión, porque haciendo  $F=76$  reduce a  $x=0$ , que es lo que debe ser; haciendo en la misma sucesivamente  $F=2.76, 3.76, 4.76...$ , se determinan las alturas a las cuales es preciso escribir en la escala los números 2, 3, 4...

Si en la actualidad quiere tenerse en cuenta la depresión del mercurio en la cubeta, representemos por  $x'$  esta depresión, por  $R$  el radio interior de la cubeta, por  $r$  el del tubo manométrico y por  $x$  el ascenso del mercurio en este último. El ascenso y la depresión del mercurio, como se encuentran en razón inversa de las secciones del tubo y de la cubeta, o lo que es lo mismo, en razón inversa de los cuadrados de los radios de estas mismas secciones, se tiene:

$$x'/x=r^2/R^2, \text{ de donde } x'=r^2x/R^2$$

Sentado esto, la diferencia de nivel en el tubo y en la cubeta siendo en la actualidad  $x+x'$ , la tensión  $F$  equilibra a una columna de mercurio  $x+x'$ , a más de la fuerza elástica del aire comprimido en el tubo, la cual es  $76h/h-x$ . Tenemos, pues,  $F=x+x'+76h/h-x$ . Reemplazando  $x'$  por su valor, y simplificando, tendremos:

$$F=(R^2+r^2)x/R^2+76h/h-x \text{ [2]}.$$

En el caso en que el manómetro consistiese simplemente en un tubo encorvado, cerrado por su extremidad superior y lleno de mercurio (fig. 106), se tendría  $R=r$ , y entonces la fórmula [2] se trasformaría en  $F=2x+76h/h-x$  [3].

167. Manómetro de M. Bourdon. -Un mecánico de París, llamado M. Bourdon, ha inventado recientemente un nuevo manómetro (fig. 107), completamente metálico, sin mercurio, y cuya aplicación estriba en el siguiente principio, que se funda en la deformación de los tubos por efecto de las presiones. Siempre que un tubo de paredes flexibles y ligeramente aplanadas sobre sí mismas se halla enrollado en espiral, en el sentido de su diámetro menor, *cualquiera presión interna sobre las paredes, desarrolla el tubo, y al contrario, toda presión exterior le enrolla más y más.*

Según este principio, consta el manómetro de M. Bourdon de un tubo encorvado de latón y de 0<sup>m</sup>,7 de longitud, cuyas paredes son delgadas y flexibles.

Su sección S representada a la izquierda de la figura, es una elipse que mide 11 milímetros en su eje mayor y 4 en el menor. La extremidad abierta *a*, se fija a un tubo con llave *m*, que comunica con la caldera de vapor; el extremo *b* se encuentra cerrado, y es móvil, lo mismo que el resto del tubo.

Sentado esto, si abrimos la llave *m*, la presión que produce la tensión del vapor en el interior de las paredes del tubo, le desarrolla y la extremidad *b* se mueve entonces de izquierda a derecha, y con ella una larga aguja *e*, que señala o marca en un cuadrante la tensión del vapor en atmósferas. Este cuadrante se gradúa de antemano comparativamente con un manómetro de aire libre, haciendo marchar el aparato con el aire comprimido.

El manómetro de M. Bourdon reúne, sobre los demás, la doble y preciosa ventaja de ser muy portátil y nada frágil; y así es que ya hoy funciona en las locomotoras de la mayor parte de los caminos de hierro.

168. Barómetro metálico de M. Bourdon. -M. Bourdon es el inventor de un barómetro metálico fundado en el mismo principio que su manómetro. Se compone ([figura 108](#)) de un tubo semejante al del anterior manómetro, pero menos largo, herméticamente cerrado y fijo tan sólo en su parte media; de suerte que, hecho de antemano en él el vacío, siempre que disminuye la presión atmosférica, se desarrolla dicho tubo en virtud del principio enunciado más arriba (167), comunicándose en seguida el movimiento a una aguja que indica la presión sobre un cuadrante. En cuanto a la trasmisión del movimiento, se efectúa por medio de dos alambres *b* y *a*, que enlazan las extremidades del tubo con una palanca fija en el eje de la aguja. Si, por el contrario, aumenta la presión, se cierra por sí mismo el tubo, moviéndose entonces la aguja de izquierda a derecha sobre el cuadrante, merced a un resorte espiral *c*. Este barómetro es de corto volumen, muy sensible y notable por su gran sencillez.

169. Leyes de las mezclas de los gases. -Se ha visto que en las mezclas de los líquidos no es posible el equilibrio sino en tanto que se hallan éstos superpuestos por orden de densidades crecientes de arriba hacia abajo (89), siendo además horizontal la superficie de separación de los diferentes líquidos. Los gases, por efecto de su fuerza expansiva, presentan en su mezcla otras condiciones de equilibrio, que son las dos siguientes:

1.<sup>a</sup> *La mezcla, que se efectúa siempre rápidamente, es homogénea y persistente, de suerte que todas las partes del volumen total contienen la misma proporción de cada uno de los gases mezclados.*

2.<sup>a</sup> *Siendo constante la temperatura, si la mezcla se verifica en una vasija de paredes inextensibles, la fuerza elástica de la mezcla es siempre igual a la suma de las fuerzas elásticas de los gases mezclados, relacionada cada una al volumen total, en virtud de la ley de Mariotte.*

Esta segunda ley puede también enunciarse diciendo que, *en una*

*mezcla de muchos gases, la presión ejercida por cada uno de ellos es la misma que si existiese solo.*

La primera ley es una consecuencia de la extremada porosidad de los gases y de su fuerza expansiva. Demostrola por vez primera el químico francés Berthollet, sirviéndose de un aparato ([fig. 109](#)), que se compone de dos globos de vidrio, provistos cada uno de su cuello y llave correspondientes, y atornillados entre sí. El globo superior estaba lleno de hidrógeno, cuya densidad es 0,0692, y el otro de gas ácido carbónico de un peso específico igual a 1,529, es decir, 22 veces mayor. Colocó el aparato en las cuevas del Observatorio de París, a fin de preservarle de cualquiera agitación y de las variaciones de temperatura. Abiertas las llaves, el ácido carbónico, a pesar de su exceso de peso, subió en parte al globo superior y a poco tiempo contenían ambos globos proporciones iguales de hidrógeno y de ácido carbónico. Sometidos al mismo experimento todos los gases que no ejercen entre sí acción química, dan idéntico resultado, observándose que se verifica la mezcla con tanta más rapidez, cuanto mayor es la diferencia de las densidades.

La segunda ley es una consecuencia de la de Mariotte. Dedúcese de ésta, además, que si las paredes de la vasija en que se hace la mezcla son extensibles, y si los gases que se mezclan se hallan sometidos a la

presión atmosférica, la fuerza elástica de la mezcla es también igual a esta presión; pero entonces el volumen de aquélla es precisamente igual a la suma de los volúmenes de los gases mezclados. Por último, las mezclas gaseosas se encuentran sometidas a la ley de Mariotte, lo mismo que los gases simples, conforme se demostró ya para el aire (162), que es una mezcla de nitrógeno y de oxígeno.

170. Leyes de las mezclas de los gases y de los líquidos. -El agua y muchos líquidos se hallan dotados de la propiedad de dejarse penetrar por los gases; pero, dadas las mismas condiciones de temperatura y de presión, no absorbe un mismo líquido cantidades iguales de diferentes gases. Por ejemplo, a la temperatura y presión ordinarias disuelve el agua 25 milésimas de su volumen de nitrógeno, 46 de oxígeno, un volumen igual al suyo de ácido carbónico y 430 veces su volumen de amoníaco. El mercurio se resiste, al parecer, por completo a la penetración de los gases.

La experiencia demuestra que las mezclas de los gases y de los líquidos se hallan sometidas a las tres leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Para un mismo gas, un mismo líquido y una misma temperatura, el peso de gas absorbido es proporcional a la presión*, lo cual vale tanto como decir, que, a todas las presiones es igual el volumen disuelto, o también, que la densidad del gas absorbido se halla en una relación constante con la del gas exterior no absorbido.

2.<sup>a</sup> *La cantidad absorbida de gas es tanto mayor, cuanto más baja es la temperatura*, esto es, cuanto menor es la fuerza elástica del gas.

3.<sup>a</sup> *La cantidad de gas que un líquido puede disolver es independiente de la naturaleza y de la cantidad de los demás gases que tiene ya en disolución.*

En efecto, si en vez de un solo fluido elástico contiene muchos la atmósfera superior al líquido, se nota que cada uno de estos gases, sea cual fuere su número, se disuelve en la misma proporción que si estuviera solo, tomando en cuenta, no obstante, la presión que le es propia. Por ejemplo, el oxígeno no forma sensiblemente más que 1/5 del aire, pues bien, en las condiciones ordinarias, absorbe precisamente el agua la misma cantidad de oxígeno que si estuviera constituida por este gas la atmósfera, bajo una presión igual a 1/5 de la de esta última.

En virtud de la primera ley, debe decrecer la cantidad disuelta de gas siempre que disminuye la presión. Puede esto demostrarse colocando una disolución gaseosa debajo del recipiente de la máquina neumática y haciendo el vacío, pues se ve así, que obedece el gas a su fuerza expansiva, desprendiéndose bajo la forma de burbujas. Se obtiene también el mismo efecto mediante la elevación de temperatura, porque así aumenta la fuerza elástica del gas disuelto.

171. Equilibrio de los fluidos de desigual densidad en sus diversas partes. -Es imposible el equilibrio en una masa fluida, líquida o gaseosa, si la presión no es la misma en todos los puntos de cada capa horizontal (81). Lo propio decimos de la densidad, pues de lo contrario, las partes menos densas suben a la manera de los cuerpos flotantes (98), y bajan las más densas. De consiguiente, para el equilibrio de una masa fluida se requiere: 1.<sup>o</sup> *que la densidad sea la misma para todos los puntos de una capa horizontal*; y 2.<sup>o</sup> *para que sea estable el equilibrio, deben hallarse dispuestas las capas fluidas por orden de densidades crecientes de arriba hacia abajo.*

Siendo muy dilatables los gases y los líquidos por la acción del calor, decrece su densidad cuando aumenta la temperatura; de consiguiente, no puede satisfacerse la segunda condición arriba expuesta, por lo menos en punto a los líquidos, sino en el caso en que las capas inferiores sean más frías que las superiores, más en cuanto a los gases, que son muy compresibles, no es necesario que éstas sean más calientes que aquéllas, porque tienden las inferiores a ser más densas a medida que están más comprimidas. Basta, pues, que la densidad aumente, por efecto de la presión en las capas inferiores, más de lo que disminuye a causa de la elevación de temperatura, que es lo que generalmente sucede en la atmósfera.

Las corrientes que se originan en una masa fluida por efecto de las diferencias de densidades dependientes de las diferencias de temperatura de una capa a otra, han recibido su aplicación en el tiro de

las chimeneas y en los aparatos caloríferos que actúan por la circulación de agua caliente. Ya expondremos estas aplicaciones (lib. VI, cap. XI) después que hayamos dado a conocer la dilatación de los líquidos y de los gases.

△

## Capítulo III

▽△

### Presiones que sufren los cuerpos sumergidos en el aire, globos aerostáticos

172. Principio de Arquímedes aplicado a los gases. -Sabido es que las presiones que ejercen los gases en virtud de su fuerza elástica y de su peso, se transmiten con igualdad en todos sentidos (142), según se demostró respecto del aire por medio de los hemisferios de Magdeburgo (146). Claro está, pues, que punto por punto podemos aplicar a los cuerpos sumergidos en la atmósfera todo cuanto dijimos (95) de los cuerpos introducidos en los líquidos, y deducir que pierden de su peso una cantidad igual al peso del aire que desalojan.

Esta pérdida de peso en el aire se demuestra por medio del *barómetro*, que consiste en una cruz de balanza que sostiene en su extremidad una pequeña masa de plomo, y en la otra una esfera hueca de cobre que viene a tener cerca de medio decímetro cúbico ([fig. 110](#)). En el aire se equilibran ambos cuerpos; pero en el vacío del recipiente de la máquina neumática se inclina la cruz hacia la esfera mayor, lo cual indica que en realidad pesa más que la pequeña masa de plomo; porque entonces, ni la primera ni la segunda masa sufren presión alguna, y no obedeciendo más que a la gravedad. Por lo tanto, es evidente que perdía en el aire la esfera cierta parte de su peso. Si se desea comprobar por medio del mismo aparato, que es exactamente igual dicha pérdida al peso del aire desalojado, se mide el volumen de la esfera, que supondremos igual a un semilitro; y como el peso de un volumen igual de aire vale 0<sup>gr</sup>,65 (141), se añade este peso a la pequeña masa de plomo, notándose entonces que cesa el equilibrio en el aire para restablecerse en el vacío.

Supuesto que es exacto para los cuerpos sumergidos en el aire, el principio de Arquímedes, se les puede aplicar todo cuanto dijimos de los introducidos en los líquidos (98), es decir, que cuando un cuerpo es más pesado que el aire, cae, por efecto del exceso de su peso sobre el empuje del fluido. Si es de la misma densidad que el aire, su peso y el empuje de abajo hacia arriba se equilibran, flotando el cuerpo en la atmósfera. Por último, si el cuerpo es metros denso que el aire, domina el empuje y asciende el cuerpo en la atmósfera hasta llegar a una capa de aire tan densa como él. La fuerza de ascensión es igual entonces al exceso del empuje sobre el peso del cuerpo. Tal es la causa de que el humo, los vapores, las nubes y los globos aerostáticos se eleven en la atmósfera.

▽△

## Globos aerostáticos

173. Descubrimiento de los globos aerostáticos. -Los *globos aerostáticos* son globos de tela ligera e impermeable que, llenos de aire caliente o de gas hidrógeno, se elevan en la atmósfera en virtud de su ligereza relativa.

Débase la invención de estos globos a los hermanos Esteban y José Montgolfiers, fabricantes de papel en la pequeña ciudad de Annonay, en donde se efectuó el primer ensayo el día 5 de junio de 1783. Hízose el globo de tela forrada de papel, teniendo 36 metros de circunferencia y pesando 250 kilogramos. Como estaba abierto en su parte inferior, le llenaron de aire caliente, quemando en la inferior papel, lana y paja mojada.

«Al recibir esta noticia, escribía el académico Lalande, exclamamos todos: Así debe suceder; ¿cómo no haberlo pensado antes?» Debemos consignar, que si bien se había pensado en la ascensión de los cuerpos, en la atmósfera, en cambio media mucha distancia de la concepción a la práctica de un pensamiento. Black, que era profesor de física en Edimburgo, había expuesto en sus cursos, en 1767, que una vejiga llena de hidrógeno se elevaba naturalmente en la atmósfera; pero jamás hizo el experimento, por creerle puramente recreativo. Por fin, Cavallo comunicó, en 1782, a la Sociedad real de Londres varios experimentos que había hecho, y que consistían en llenar de hidrógeno algunas burbujas de jabón, que ascendían por sí mismas en la atmósfera por ser más ligero que el aire, el gas que las llenaba.

Como quiera que sea, lo cierto es que los hermanos Montgolfiers no conocían los trabajos de Cavallo ni los de Black, cuando hicieron su descubrimiento. Por haberse servido exclusivamente del aire caliente para llenar sus globos, se ha dado el nombre de *mongolfieras* a los globos llenos de aire enrarecido, para distinguirlos de los de hidrógeno, que son los que hoy día se usan.

Charles, catedrático de física en París, que murió en 1825, fue el primero que sustituyó el gas hidrógeno al aire caliente. El 27 de agosto de 1783, se elevó en el Campo de Marte un globo henchido de aquel gas. «Jamás, escribe Mercier, contó una lección de física con un auditorio más numeroso ni más atento».

El 21 de noviembre del mismo año emprendió Pilatre de Rozier, en compañía del caballero d'Arlandes, el primer viaje aéreo en un globo lleno de aire caliente. Verificose la ascensión en el jardín de la Muette, cerca del bosque de Boloña. Los aeronautas alimentaban en la parte inferior del globo un fuego de paja mojada para conservar la dilatación del aire inferior: de suerte que con suma facilidad podía comunicarse a cada instante la llama al globo.

Diez días después repetían el mismo experimento Charles y Robert en el jardín de las Tullerías, con un globo lleno de hidrógeno.

El 7 de enero de 1785, hicieron la travesía de Douvres a Calais los señores Blanchard y Jeffries. Los dos aeronautas llegaron a duras penas a las costas de Francia, viéndose en la precisión de arrojar todo al mar, incluso sus propios vestidos, a fin de disminuir el peso del globo.

Posteriormente se han ejecutado innumerables ascensiones; pero la más interesante es la de Gay-Lussac, en 1804, por los datos con que enriqueció a la ciencia, y por la altura a que llegó el célebre físico, que fue de 7016 metros sobre el nivel del mar. M. Green se elevó después a más altas regiones. A aquella altura, había bajado el barómetro a 32 centímetros; y el termómetro centígrado, que marcaba 31 grados en la superficie del suelo, señalaba entonces 9°,5 bajo cero. Una ascensión reciente ha dado, para la misma altura, una temperatura aun mucho más baja.

En las altas regiones, a las cuales nos contraemos era tal la sequedad el día de la ascensión de Gay-Lussac, efectuada en julio, que las sustancias higrométricas, tales como el papel y el pergamino, se secaban y se torcían, como si actuara sobre ellas el fuego. La respiración y la circulación de la sangre se aceleraron a causa del notable enrarecimiento del aire. Cerciorose Gay-Lussac de que daba su pulso entonces 120 pulsaciones en vez de 66 que era su estado normal. El cielo a tan elevada altura adquiere un matiz azul muy oscuro, casi negro, cercandole al aeronauta un silencio absoluto y solemne.

Seis horas después de haber abandonado el patio del Conservatorio de artes y oficios, bajaba Gay-Lussac cerca de Rouen, es decir, que había recorrido unas 30 leguas en dicho tiempo.

174. Construcción de los globos, operaciones preliminares para su ascenso y elevación de los mismos. -Los globos se construyen de largas tiras fusiformes de tafetán, cosidas entre sí y barnizadas, con objeto de que sea impermeable el tejido. En el vértice del globo hay una válvula que se mantiene cerrada, merced a un resorte, pero que puede abrirla el aeronauta por medio de una cuerda. Una ligera barquilla de mimbres suficiente para contener varias personas, pende debajo del globo, sostenida por una red de cuerda que envuelve a éste por completo ([fig.111](#) y [112](#)).

Un globo de dimensión ordinaria, que puede elevar fácilmente a tres personas, cuenta unos 15 metros de altura, 11 de diámetro, y su volumen, una vez henchido por completo, es aproximadamente de 700 metros cúbicos. La cubierta pesa 100 kilogramos y 50 los accesorios, tales como la red y la barquilla.

Se hinchen los globos, bien con el hidrógeno puro, o con el hidrógeno carbonado, que sirve para el alumbrado, que es hoy el que se refiere generalmente, no obstante su mayor densidad, por ser más barato y de más fácil obtención que el hidrógeno puro. Basta, en efecto, procurarse un tubo de tela engomada que conduzca el gas de la fábrica, en la cual se produce, al globo.

La [fig. 111](#) representa un globo lleno de hidrógeno puro. A la derecha del dibujo existe una serie de toneles con virutas de hierro, agua y ácido sulfúrico, que son las sustancias con las cuales se prepara el hidrógeno. Desde cada tonel va el gas a uno central, que carece de tapa inferior, a fin de introducirse en un recipiente lleno de agua, en donde se lava el gas, pasando en seguida al globo por un largo tubo de tela fijo por un extremo en el tonel central, y por el otro en el globo.

Para facilitar la introducción del gas, se clavan en el suelo dos mástiles, en cuyo vértice hay poleas, en las cuales se arrolla una cuerda que pasa por un anillo fijo en la corona de la válvula. Levantado de esta suerte el globo como cosa de un metro sobre el nivel del

suelo, se llena con más facilidad, procurando levantarle poco a poco a medida que se hincha, y cuidando de deshacer sus dobleces, hasta que ya no requiera estos cuidados, en cuyo momento es preciso oponerse a su fuerza de ascensión. Para esto fin, varios hombres le retienen por medio de cuerdas atadas a la red, y entonces ya no falta más que quitar el tubo que conducía el gas y colocar la barquilla. Estos diversos preparativos exigen cuando menos dos horas. Entra, por fin, en su barquilla el aeronauta, y a una señal dada, se sueltan las cuerdas y se eleva el globo con una velocidad tanto mayor, cuanto más ligero sea con relación al aire que desaloja ([fig. 112](#)).

No debe llenarse por completo el globo, porque como disminuye la presión atmosférica, a medida que se eleva, se dilata el gas interior en virtud de su fuerza expansiva, y tiende a reventarle.

Basta que la fuerza de ascensión, es decir, que el exceso de peso del aire desalojado, respecto del peso total del aparato, sea de 4 a 5 kilog. Téngase presente que permanece constante esta fuerza, mientras el globo no se halla henchido por completo, merced a la dilatación del aire interior. En efecto, si la presión atmosférica llega a ser, por ejemplo, dos veces menor, el gas del globo, en virtud de la ley de Mariotte, duplica su volumen, resultando de aquí que el aire desalojado es a la vez dos veces mayor; y como por otra parte es dos veces menor su densidad, claro está que su peso, y por consiguiente, el empuje de abajo hacia arriba no han sufrido alteración. Pero si el globo está lleno por completo y continúa subiendo, decrece la fuerza de ascensión, porque no variando el volumen de aire desalojado, disminuye la densidad; y así es que llega un momento en que el empuje es igual al peso del globo, el cual ya no se mueve más que horizontalmente arrastrado por las corrientes de aire que reinan en la atmósfera.

Por el barómetro tan sólo sabe el aeronauta si se eleva o si desciende, pues en el primer caso baja la columna de mercurio, y en el segundo sube. Mediante el mismo instrumento evalúa la altura a que se encuentra. Una larga banderola en la barquilla ([fig.112](#)), indica también, por su situación hacia arriba o hacia abajo, si se baja o se sube.

Cuando trata de descender el aeronauta, tira de la cuerda que abre la válvula situada en la parte superior del globo, mezclándose entonces el hidrógeno con el aire, lo cual hace bajar el globo. Por el contrario, para disminuir un descenso demasiado rápido, o para remontarse, si se efectúa éste en un punto peligroso, hacia el aeronauta varios sacos de arena que le sirven de lastre. Así aligerado, sube de nuevo el globo para descender luego en un sitio más conveniente. Se facilita también el descenso suspendiendo de una larga cuerda una ánclora en la barquilla; cuando se fija aquélla en un obstáculo, se baja lentamente tirando de la cuerda.

Hasta ahora carecen de importancia las aplicaciones de los globos aerostáticos. En la batalla de Fleurus, en 1794, se hizo uso de un globo cautivo, es decir, retenido por una cuerda, a fin de que un observador, metido en él, diese a conocer, por medio de señales, los movimientos del enemigo. Muchas son también las ascensiones que se han emprendido con la idea de hacer observaciones meteorológicas en las altas regiones de la atmósfera; pero los globos no serán realmente útiles hasta que se les pueda dar dirección. Las tentativas que al efecto se han hecho hasta ahora han fracasado por completo, y así es que actualmente no hay más recurso que elevarse en la atmósfera

hasta encontrar una corriente de aire que tenga poco más o menos la dirección que se desea seguir.

175. Paracaídas. -El *paracaídas* tiene por objeto permitir al aeronauta que abandone su globo, ofreciéndole el medio de debilitar la velocidad del descenso. Este aparato se compone de una gran pieza circular ([fig. 113](#)) de tela, de unos 5 metros de diámetro, y que por efecto de la resistencia del aire se extiende en forma de un gran paraguas, y desciende por lo mismo con lentitud. En su contorno se encuentran atadas varias cuerdas, que sostienen una barquilla, en la cual se coloca el aeronauta. En el centro del paracaídas se ve una abertura que da paso al aire que comprime el descenso, pues, de lo contrario, surgirían oscilaciones que, comunicadas a la barquilla, pueden ser fatales.

Se nota junto al globo ([fig. 112](#)) un paracaídas, plegado y atado a la red, por medio de una cuerda que pasa por una polea para ir a parar a la barquilla: soltando esta cuerda el paracaídas abandona al globo.

J. Garnerin, fue el primero que efectuó un descenso con el paracaídas; pero su invención, al parecer, se debe a Blanchard.

176. Cálculo del peso que puede elevar un globo. -Para calcular el peso que puede elevar un globo de dimensiones dadas, se le supone perfectamente esférico y se hace uso de la fórmula  $V=4 p R^3/3$ , que representa en geometría el volumen de una esfera, siendo R el radio y p la relación de la circunferencia al diámetro. Sea, pues, un globo lleno de hidrógeno y de 11 metros de diámetro. Si estuviese completamente henchido, sería su volumen de 696 metros cúbicos, según la fórmula arriba indicada. Pero como, en general, en el momento de la partida no está lleno más que hasta la mitad el globo, se pueden tomar por volumen 348 metros cúbicos. Tal es, pues, el volumen de aire desalojado en el momento en que principia el ascenso. Como un litro de aire pesa 1gr,3 (138), y 1 metro cúbico lk,300gr, resulta que 348 metros cúbicos de aire pesan 452 kilogramos. Éste es el empuje que tiende a elevar al globo (172). Para calcular la fuerza efectiva de ascensión, hay que sustraer el peso del hidrógeno, el de la cubierta y el de los accesorios. El del hidrógeno es con corta diferencia 14 veces menor que el del aire, y de consiguiente, el que hay en el globo pesará 1/14 de 452, o 32 kilogramos. Añadiendo a este peso el de la cubierta y de los accesorios, evaluado en 150 kilogramos, habrá que restar 182 de 452. Quedan, pues, 270 kilogramos para la fuerza de ascensión, y como basta que sea ésta de 5, resulta que puede elevar el globo 265 kilogramos.

▽△

## Capítulo IV

▽△

### Aparatos fundados en las propiedades del aire

177. Máquina neumática. -La *máquina neumática* es un aparato que sirve para hacer el vacío en un espacio dado, o más rigurosamente para enrarecer el aire, porque no puede dar el vacío absoluto.

Fue inventada esta máquina por Otto de Guericke, burgomaestre de Magdeburgo, en 1650, pocos años después de la invención del barómetro. Dicho físico sólo dotó a su máquina con un cuerpo de bomba, pues el segundo le fue añadido por el físico inglés Hawksebee, acelerando y facilitando así la manipulación de la máquina, porque tienden a equilibrarse las presiones que ejerce la atmósfera sobre los dos émbolos.

Tal cual se construye hoy, se compone la máquina neumática de dos cilindros de cristal, cada uno con un émbolo P ([fig. 114](#)), formado de muchas rodajas de cuero superpuestas y con una capa de aceite, a fin de que, cerrando herméticamente contra las paredes de los cilindros, no dé entrada al aire. En cada émbolo se encuentra fija una barra dentada, en la que engrana un piñón H ([fig. 116](#)), que se mueve alternativamente de derecha a izquierda y de izquierda a derecha por medio de un manubrio MN; de suerte que cuando un émbolo sube, el otro baja.

Los dos cuerpos de bomba se hallan masticados por su base sobre un pie de cobre que termina, por la extremidad opuesta, en un platillo D, recubierto por un cristal grueso y bien plano. Sobre este platillo, llamado *platina*, se coloca el *recipiente* E, en el cual se trata de hacer el vacío. En el centro de la platina hay un orificio C que pone en comunicación el interior del recipiente con los cuerpos de bomba por medio de un canal ([fig. 115](#)), que se bifurca en *Kcbs* y *Kcdo*.

La [figura 116](#) representa un corte vertical y anterior de los cuerpos de bomba, y en ella se ve cómo el piñón H, movido por el manubrio MN, trasmite el movimiento a las dos barras dentadas, y por consiguiente, a los émbolos P y Q. Éstos no son macizos, existiendo en su interior una cavidad cilíndrica cerrada en su base por una valvulita sujeta por un débil resorte. Las cavidades en donde se hallan situadas estas válvulas, comunican con la capacidad superior de los cuerpos de bomba, mediante un agujero que existe en la parte superior de cada émbolo, y que está siempre abierto para la salida del aire. Además de las válvulas situadas en el interior de los émbolos, hay otras dos *o* y *s* en la base de los cuerpos de bomba, cónicas y fijas cada una en un vástago de hierro que resbala a frotamiento suave en la masa de los émbolos. Estas válvulas abren y cierran alternativamente la comunicación entre los cuerpos de bomba y el recipiente. Si baja, por ejemplo, el émbolo P, arrastra consigo al vástago de hierro y cierra la válvula *s*; y si sube, se eleva la varilla y la válvula, pero muy poco, porque la longitud de aquélla es tal que viene a chocar desde luego contra el platillo superior del cuerpo de bomba, de suerte que después no hace ya más que resbalar en el émbolo que sube solo.

Para comprender el juego de la máquina, basta considerar lo que pasa en uno de los cuerpos de bomba, porque todo es idéntico en el otro. Cuando el pistón Q, por ejemplo, situado primero en la parte más baja de su carrera, suba, por la acción del manubrio, arrastra consigo la varilla y la válvula *o*, permaneciendo cerrada la del interior del émbolo mientras éste asciende, en virtud de su propio peso y del de la atmósfera que actúa merced a los orificios *m* y *n* de los platillos superiores del cuerpo de bomba. Por efecto de esta disposición de las válvulas, tiende a producirse el vacío debajo del émbolo al subir; pero obedeciendo a su elasticidad, el aire del recipiente pasa en parte al

cuerpo de bomba por el orificio *o*. Si, por ejemplo, el volumen del cuerpo de bomba es  $\frac{1}{20}$  de el del recipiente,  $\frac{1}{21}$  de la masa del aire de este último pasa a aquél.

Cuando baja el émbolo, la varilla de la válvula *o* es arrastrada de arriba hacia abajo, se cierra esta válvula, y el aire del cuerpo de bomba no puede retroceder al recipiente. Si continúa bajando el émbolo, se comprime cada vez más y más el aire que está debajo, hasta que llegando a ser mayor su fuerza elástica que la presión atmosférica, levanta la válvula que se halla en el interior del pistón, y el aire comprimido va a situarse entonces encima del mismo, saliéndose por el orificio *m* a la atmósfera. Luego que llega el émbolo a la parte inferior de su carrera, ha sido ya sensiblemente expulsado todo el aire extraído del recipiente. A un segundo golpe del pistón se renueva la misma serie de fenómenos, y así sucesivamente en ambos cuerpos de bomba, hasta que se llega a un límite en el cual el aire que sale del recipiente se halla tan enrarecido, que no puede ya levantar la válvula interior del pistón, aun cuando se halle éste en el punto más bajo de su carrera.

178. Probeta de la máquina neumática. -Después de haber funcionado por algún tiempo los émbolos, se mide la fuerza elástica del aire que queda en el recipiente, por medio de la diferencia de nivel que adquiere el mercurio en las dos ramas de un tubo de vidrio encorvado en forma de sifón, estando cerrada una de ellas y abierta la otra como en el barómetro. Este instrumentito se llama *probeta* o *barómetro truncado*, porque es un verdadero barómetro de sifón que tiene menos de 76 centímetros de altura; se halla fijo en una escala vertical y colocado debajo de una campana de cristal ([fig. 114](#)), que comunica con el recipiente E por medio de una llave A, que se ve en el conducto que va del orificio C a los cuerpos de bomba. Por último, la rama cerrada y la parte curva del tubo se encuentran previamente llenas de mercurio.

Antes de que se principie a aspirar el aire que se halla debajo del recipiente, se equilibra su fuerza elástica con el peso de la columna de mercurio de la rama cerrada, quedando ésta llena; pero a medida que se enrarece el aire por el luego de los émbolos, decrece la fuerza elástica y cesa aquel equilibrio, de manera que desciende la columna de mercurio, tendiendo éste a nivelarse en ambas ramas. Si se llegara a hacer el vacío absoluto, se restablecería exactamente el nivel, porque ni en uno ni en otro lado habría presión; pero con las mejores máquinas queda siempre un milímetro, por lo menos, más alto el nivel en la rama cerrada; lo cual indica que el vacío no es perfecto, y que la tensión de este residuo de aire equilibra a una columna de mercurio de un milímetro de altura.

Prácticamente, no puede dar la máquina neumática el vacío absoluto, porque llega un momento en que se halla tan enrarecido el aire, que, aun cuando se encuentren los émbolos en la parte más baja de su carrera, no puede vencer su fuerza elástica la presión atmosférica que pesa sobre las válvulas situadas en el interior de los pistones, no abriéndose ya éstas por lo mismo. Teóricamente es también imposible el vacío absoluto, porque, siendo, por ejemplo, el volumen de cada cuerpo de bomba  $\frac{1}{20}$  del del recipiente, sólo se extrae a cada golpe  $\frac{1}{21}$  de la masa de aire que queda en este último, y así es que jamás se agota todo el aire. El cálculo demuestra, en efecto, que se requeriría un número infinito de golpes de émbolo para obtener el vacío perfecto.

179. Llave de doble acción. -M. Babinet ha aplicado a la máquina neumática una llave que permite extender a un alto grado el enrarecimiento del aire. Se pone esta llave en la

bifurcación del canal que conduce el aire del recipiente a los dos cuerpos de bomba, y ofrece muchos orificios que se utilizan, dándola dos posiciones diferentes. La [figura 115](#) representa un corte o una sección horizontal de la llave R, en una posición tal, que por su orificio del centro y por dos aberturas laterales establece la comunicación entre la platina K y las válvulas *o* y *s*. La máquina funciona según dijimos más arriba (177). En la [figura 118](#), ha dado sobre sí misma la llave un cuarto de vuelta; el conducto transversal *db*, que era horizontal en la [figura 115](#), se encuentra ahora vertical, y sus orificios se hallan cerrados por las paredes que están en contacto con la llave. Pero un segundo conducto, que antes no funcionaba, y que ha reemplazado al primero, pone actualmente al cuerpo de bomba, el del lado derecho tan sólo, en comunicación con el recipiente por medio del canal *cbs* ([fig. 118](#)), y además hace que se relacione el cuerpo de bomba de la derecha con el de la izquierda, por un conducto *aeo* ([fig. 118](#)) o *aico* ([fig. 117](#)) Este conducto parte de una abertura central *a*, situada en la base del cuerpo de bomba de la derecha, y va a la válvula *o* del otro cuerpo de bomba, al través de la llave ([fig. 117](#) y [118](#)); pero el mismo conducto se encuentra interrumpido por dicha llave cuando se encuentra ésta en su primera posición ([fig. 115](#) y [116](#)).

Ahora bien; al elevarse el émbolo de la derecha aspira el aire del recipiente; mas al bajar, repele el aire espirado al cuerpo de bomba de la izquierda al través del orificio *a*, del canal *ci* y de la válvula *o* ([fig. 117](#)) entonces abierta. Cuando se eleva de nuevo el mismo émbolo, baja el de la izquierda; pero el aire que se encuentra debajo, no vuelve al cuerpo de bomba de la derecha por estar cerrada ahora la válvula *o*. Como el émbolo de la derecha continúa aspirando así el aire del recipiente y rechazándole al cuerpo de bomba de la izquierda, se acumula en éste y acaba por adquirir allí la suficiente tensión para levantar la válvula del émbolo Q, lo cual era imposible antes de hacer girar la llave, porque únicamente debe efectuarse esta operación, según un cuarto de su vuelta, cuando las válvulas de los émbolos resisten a abrirse.

180. Usos de la máquina neumática. -Ya hemos dado a conocer muchísimos experimentos hechos con la máquina neumática, como son los de la lluvia de mercurio (15), los de la caída o descenso de los cuerpos en el vacío (51), los de la vejiga en el vacío los del rompe-vejigas (149), los de los hemisferios de Magdeburgo (146) y los del barómetro (172).

La máquina neumática sirve también para demostrar que el aire, por el oxígeno que contiene, es necesario para el sostén de la combustión y de la vida. En efecto, si se coloca debajo del recipiente un cuerpo inflamado, una vela, por ejemplo, se ve que palidece la llama a medida que se hace el vacío, hasta que por fin se apaga. De igual manera cae asfixiado un animal y muere, si después de haberle colocado debajo del recipiente se hace el vacío. Los mamíferos y las aves perecen en él muy pronto; los peces y los reptiles resisten por mucho más tiempo la privación del aire, y en cuanto a los insectos, pueden permanecer días enteros en el vacío sin morir.

En el vacío se conservan las sustancias fermentescibles sin alteración durante un tiempo muy largo, por no encontrarse en contacto con el oxígeno que es necesario para la fermentación. Varios alimentos conservados en cajas herméticamente cerradas, en las que se había hecho el vacío, se han encontrado al cabo de muchos años tan frescos como el primer día.

La *fuenta en el vacío* ([fig. 119](#)) es también un experimento que se hace con la máquina neumática, y que sirve para demostrar la fuerza expansiva del aire. Consiste en un frasco lleno de agua en parte y de aire el resto, con un tapón que da paso al tubo que se introduce en el líquido. Puesto el frasco debajo del recipiente, se ve que salta el agua por el vértice del tubo, luego que se enrarece el aire de aquél, por efecto de la fuerza elástica del aire encerrado en el frasco.

Por último, la [figura 120](#) representa un experimento que comprueba el efecto de la presión atmosférica en el cuerpo humano. El recipiente es un cilindro abierto por sus dos extremidades, con objeto de que en la parte superior se aplique bien la mano, mientras otra persona hace el vacío. Entonces, como ya no se equilibra la presión en las dos caras de la mano, se ve ésta muy comprimida contra los bordes del cilindro, de suerte que se requiere un grande esfuerzo para retirarla. Además, no hallándose tampoco contrabalanceada la elasticidad de los fluidos que contienen los órganos por el peso de la atmósfera, se hincha la palma de la mano, tendiendo a salir la sangre por los poros.

181. Máquina neumática de doble efecto de M. Bianchi. -Este constructor, de París, ha introducido, hace algunos años, un sistema de máquina neumática, que posee varias ventajas. Este aparato, completamente de hierro fundido, cuenta con un solo cilindro, que oscila sobre un eje horizontal, fijo en su base, según indica la [figura 121](#). En un armazón de hierro fundido se encuentra montado un árbol horizontal, con un volante muy pesado V, que se pone en movimiento por medio de un manubrio M. En el mismo árbol se halla fijo un manubrio *m* que va a articularse a la cabeza del vástago del émbolo, así es que al efectuar cada revolución completa el volante, efectúa el cilindro dos oscilaciones sobre su eje.

De esta descripción se deduce que la máquina que nos ocupa es de doble efecto; es decir, que el émbolo PP ([fig. 122](#)) efectúa el vacío tanto al subir como al descender; para este fin, cuenta con una válvula *b*, que se abre de abajo hacia arriba, cual sucede en las máquinas ordinarias; pero además de esta circunstancia, el vástago AA es hueco, existiendo en su interior un tubo X de latón, destinado a dar salida al aire que cruza la válvula *b*. En la parte superior del cilindro existe una segunda válvula *a*, que también se abre de abajo hacia arriba. Finalmente, un vástago de hierro D cruza rozando suavemente el émbolo, y termina en sus dos extremos por dos válvulas cónicas *s* y *s'*. Éstas sirven para la aspiración que se efectúa por el tubo BC, que comunica con el recipiente, en el cual se verifica el vacío, mientras que las válvulas *a b* sirven para el desprendimiento del aire.

Conocidos estos detalles, supongamos que descende el émbolo entonces se cierra la válvula *s'*, encontrándose abierta la *s*, y el aire del recipiente pasa encima del émbolo, mientras que en su parte inferior el aire comprimido por el émbolo, eleva la válvula y se desprende por el tubo X, que comunica con la atmósfera. Cuando asciende el émbolo, la aspiración se efectúa por *s'*, y la válvula *s*, encontrándose cerrada, desprende el aire comprimido por la válvula *a*.

La máquina tiene una llave de doble paso R, semejante a la que hemos descrito (179), la cual se halla provista de un sistema de lubricación muy ingenioso. Una copa o vaso metálico E, fijo en el vástago del émbolo, se llena de aceite, el cual cae en el espacio anular comprendido entre el vástago AA y el tubo X; de dicho ánulo pasa a un pequeño tubo *oo*, existente en el cuerpo del émbolo, e inyectado por la presión atmosférica, se

distribuye el aceite de una manera permanente por el contorno interior del cilindro. Esta máquina cuenta además con otros muchos detalles importantes en su construcción, de cuya descripción no podemos ocuparnos aquí. Así, pues, nos limitaremos a manifestar que siendo completamente de hierro, puede construirse según dimensiones mayores que las máquinas comunes de dos émbolos, y efectuar el vacío en menos tiempo y en capacidades mayores.

182. Máquina de compresión. -Se denomina *máquina de compresión* un aparato que sirve para comprimir el aire o cualquiera otro gas. Como no difiere en cuanto a la forma, de la máquina neumática ([fig. 114](#)), nos limitaremos a representarla según una sección longitudinal, a fin de demostrar el juego de las válvulas que se abren de arriba hacia abajo, mientras que en la neumática lo hacen de abajo hacia arriba. Estas válvulas (*a* en la base del émbolo y *o* en el cuerpo de bomba, [figura 123](#)) son cónicas y permanecen cerradas por pequeños resortes espirales. Cuando el émbolo P sube, se enrarece el aire interior, permanece cerrada la válvula *o*, y la *a* se abre por efecto de la presión atmosférica, permitiendo así que el aire exterior entre en el cuerpo de bomba. Cuando baja el pistón, se comprime el aire que se halla debajo, se cierra la válvula *a*, pero se abre la *o* y da paso al aire repetido, el cual se dirige al recipiente R. A cada golpe del émbolo, penetra de esta suerte en el recipiente la masa de aire que contiene el cuerpo de bomba. Sin embargo, reconoce un límite la tensión que puede tomar el gas comprimido, porque llega un momento en que el aire de los cuerpos de bomba no adquiere ya, aun cuando se encuentre el émbolo en la parte más baja de su carrera, una fuerza elástica superior a la que tiene el del recipiente, y así es que desde este momento no pasa más aire a éste, porque tampoco se abren las válvulas.

En la máquina de compresión se mide la tensión del aire por medio de un pequeño manómetro de aire comprimido (166) que comunica con el recipiente. Por último, en dicha máquina debe fijarse fuertemente el recipiente en la platina, porque de lo contrario lo levantaría la elasticidad del gas. Se compone dicho recipiente de un cilindro de vidrio, abierto por sus dos extremidades, una de las cuales se apoya en la platina A, y la otra se halla cerrada por una segunda platina de cristal B, con cuatro orificios que dan paso a cuatro barras de hierro D fijas en la platina. Por medio de éstas y de las tuercas E, se aplica bien el cristal B sobre el cilindro, y a fin de prevenir los accidentes que pueden surgir, dado caso que se rompiera el cilindro por la tensión del gas comprimido, se le protege con una rejilla de alambre.

Pocas son las aplicaciones de esta máquina de compresión, de tan frecuente uso, lo contrario sucede cuando tiene la forma siguiente.

183. Bomba de compresión. -La *bomba de compresión*, que es una verdadera bomba impelente, no se compone más que de un cuerpo de bomba A de pequeño diámetro ([fig. 125](#)): en el cual entra y se mueve a mano un émbolo macizo o sin válvula. El cuerpo de bomba termina en una rosca que le fija en un recipiente K, en el que se ha de comprimir el aire o un gas cualquiera. En la [fig. 124](#) puede verse la disposición de las válvulas, situadas de manera que la lateral *o* se abre de fuera hacia adentro, y al revés la inferior *s*, encontrándose todas cerradas por medio de pequeños resortes espirales. Su juego es el mismo que el de la máquina de compresión.

En la bomba que nos ocupa, lo mismo que en el aparato anterior, depende el límite de compresión de la relación entre los dos volúmenes de aire que existen debajo del

émbolo, cuando se encuentra en la parte superior y en la inferior de su curso. Si el segundo volumen es, por ejemplo,  $\frac{1}{60}$  del primero, no pasará de 60 atmósferas la compresión, porque, salvando este término, la tensión, en el recipiente K, sería mayor que en el cuerpo de bomba, y en tal caso no podría abrirse la válvula inferior de éste para dar paso a una nueva cantidad de aire.

Este aparato sirve, particularmente para hacer absorber los gases por el agua. Al efecto, se pone en comunicación la llave B, por medio de un tubo D, con un depósito lleno del gas que se trata de disolver, por ejemplo, de ácido carbónico; la bomba aspira este gas y le repele a la vasija K, en donde se disuelve en una cantidad tanto mayor, cuanto más comprimido está (170, 1.º). Con aparatos análogos se fabrican las aguas gaseosas artificiales.

184. Fuente de Heron. -La *f fuente de Heron*, así llamada por el apellido de su inventor, que vivía en Alejandría 120 años antes de la era cristiana, se compone de una cubeta de cobre D ([fig. 126](#)) y de dos globos de vidrio M y N de 2 a 3 decímetros de diámetro. La cubeta comunica con la parte inferior del globo N, por medio de un largo tubo de cobre B; un segundo tubo A relaciona entre sí los dos globos, y por último, un tercer tubo más pequeño atraviesa la cubeta y va a la parte inferior del globo M. Dicho tercer tubo se quita para llenar de agua este globo hasta la mitad; y luego, colocándolo de nuevo, se vierte agua en la cubeta. Desciende el líquido por el tubo B al globo inferior expulsando el aire, el cual es repelido al globo superior, en donde reacciona sobre el agua haciéndola saltar, según indica el grabado. Sin la resistencia del aire y el rozamiento, se elevaría el líquido, encima de la cubeta, a una altura igual a la diferencia del nivel existente en los dos globos.

El principio de la fuente de Heron se ha aplicado en las lámparas hidrostáticas de Girard.

Los aparatos que acabamos de describir se fundan en la fuerza elástica del aire, y los siguientes lo están además en la presión atmosférica.

185. Fuente intermitente. -La *f fuente intermitente* se compone de un globo de vidrio C ([fig. 127](#)) cerrado herméticamente por un tapón esmerilado, y con dos o tres tubitos capilares D para la salida del líquido. Un tubo de cristal, abierto por sus dos extremidades, penetra por la una en el globo C, y por la otra termina cerca del orificio central de una cubeta de cobre B que sostiene todo el aparato.

Estando lleno de agua el globo C hasta los dos tercios, sale primero el líquido por los orificios D, según lo indica la figura, por ser igual en D la presión interna a la de la atmósfera que se trasmite por la parte inferior del tubo de cristal, más al peso de la columna de agua CD, siendo así que exteriormente, en el mismo punto, sólo existe la presión atmosférica. Persisten estas condiciones mientras está abierto el orificio inferior del tubo, es decir, en tanto que la tensión del aire en el interior es igual a la presión de la atmósfera, pues el aire entra a medida que fluye el agua; pero como se halla regulado el aparato de manera que el orificio practicado en el fondo de la cubeta B deje salir menos agua que la que dan los tubitos D, sube el nivel poco a poco en la vasija, hasta que por fin queda sumergido por completo el tubo en el líquido. Como no puede entrar el aire exterior en el globo C, se enrarece en éste a medida que continúa la salida, llegando un momento en que la presión de la columna de agua CD y de la tensión del aire encerrado

en el aparato es igual a la presión exterior que se ejerce en D, y por consiguiente, cesa la salida. Pero la cubeta, continuando vaciándose, pronto se halla libre la extremidad del tubo, y entonces al entrar el aire, principia de nuevo la salida, y así sucesivamente mientras quede agua en el globo C.

186. Sifón.- El *sifón* es un tubo encorvado de ramas desiguales, que sirve para trasvasar los líquidos, introduciendo en éstos la rama más corta ([fig 128](#)).

Llénase primero por completo de líquido, y luego, cerrando momentáneamente sus dos orificios, se le coloca según indica la figura; o bien introduciendo la rama menor en el líquido, se aspira con la boca por el orificio B el aire del aparato. Hecho así el vacío, sube por el tubo el líquido de la vasija C, y le llena por efecto de la presión atmosférica.

Si el líquido que se va a trasvasar pudiese ser nocivo, se emplea un sifón con un segundo tubo M ([fig. 129](#)) paralelo a la rama mayor. Por el orificio O de este tubo adicional se aspira el aire, cerrando al mismo tiempo el P, y no permitiendo que suba hasta la boca el líquido en el tubo adicional. Pero de cualquier modo que se le haya llenado, continúa pasando el líquido de la rama menor a la mayor, mientras permanezca aquélla dentro del líquido.

Para hacerse cargo de esta salida, nótese que la fuerza que actúa sobre el líquido en C ([fig. 128](#)) y que le solicita en la dirección CMB, es igual a la presión atmosférica, menos el peso de una columna de agua cuya altura es CD. De igual manera, en B, la fuerza que solicita al líquido en la dirección BMC es la presión atmosférica, menos el peso de una columna de agua que tiene por altura AB; y como ésta es mayor que DC, claro está que la fuerza efectiva que obra en B es menor que la que actúa en C. La salida se verifica, pues, en virtud de la diferencia de estas dos fuerzas. De consiguiente, será tanto mayor la velocidad de salida, cuanto mayor sea también la diferencia de nivel entre el orificio B y la superficie líquida en C.

Dedúcese de la teoría del sifón que no funcionaría este aparato en el vacío ni tampoco si la altura CD fuese mayor que la columna líquida que equilibra la presión atmosférica.

187. Sifón de salida constante. -En atención a lo que precede, es preciso, para que sea constante en este aparato la salida, que no sufra variación alguna la diferencia entre las alturas del líquido en las dos ramas. Se obtiene este resultado disponiendo el aparato conforme se ve en la [fig. 130](#). Mantiénese en equilibrio el aparato por medio de un flotador *a* y de un peso *p*, de manera que, a medida que baja el nivel en el depósito H, descienda con él el sifón, permaneciendo así invariable la diferencia entre las alturas.

188. Sifón intermitente. -El *sifón intermitente*, como ya su nombre lo indica, es aquél en el cual la salida no es continua. Se dispone este sifón en una vasija, de manera que la rama más corta se abra cerca del fondo, mientras que la mayor le atraviesa y se abre en la parte externa ([fig. 131](#)). Alimentada la vasija por un chorro constante de agua, sube en ella poco a poco el nivel, y al mismo tiempo en la rama menor hasta el vértice del sifón. Éste se llena entonces por efecto de la presión del líquido, y surge la salida; pero como se procura que el gasto del sifón (118) sea mayor que el del caño que alimenta a la vasija, desciende el nivel en ésta, con lo cual queda muy pronto en seco la rama pequeña; se vacía el sifón, y se interrumpe la salida. Mas la vasija continúa llenándose

por efecto del caño en continua acción; sube de nuevo el nivel, y periódicamente se renueva la misma serie de fenómenos.

En la distribución de las aguas por los diferentes distritos de una ciudad, se recurre a menudo a salidas intermitentes para abrir y cerrar a horas fijas las llaves de los conductos. Al efecto, varias vasijas, alimentadas por un hilito constante de agua, se vacían por intervalos, y volviéndose así más pesados o más ligeros, obran por medio de contrapesos en un sentido o en otro sobre dichas llaves.

La teoría del sifón intermitente da una cumplida explicación de las fuentes intermitentes naturales que se observan en muchas comarcas. Fuentes de éstas hay que dan agua durante muchos días o muchos meses, secándose por más o menos tiempo para volver a fluir de nuevo; y otras cesan y recobran su curso muchas veces en una hora.

Explícanse estos fenómenos admitiendo cavidades subterráneas que se llenan de agua con más o menos lentitud, y que se vacían luego por hendiduras que vienen a formar un sifón intermitente.

189. Diferentes especies de bombas. -Las *bombas* son las máquinas que se emplean para elevar el agua por aspiración, por presión o por ambos efectos combinados: de aquí su división en *aspirantes*, *impelentes* y *aspirantes e impelentes*. Atribuíase en épocas anteriores a la de Galileo la ascensión del agua en las bombas aspirantes al *horror de la naturaleza al vacío*; pero dicho fenómeno es un simple efecto de la presión atmosférica.

190. Bomba aspirante. -La [fig. 132](#) representa un modelo de bomba aspirante que sirve para la demostración en las cátedras, pero con las mismas disposiciones que las usadas en la industria. Se compone: 1.º de un *cuerpo de bomba* cilíndrico B, con una válvula S en la base que se abre de abajo hacia arriba; 2.º de un *tubo de aspiración* A, que se introduce en el depósito del agua que se va a elevar, y 3.º de un *émbolo*, con un agujero que le cruza según su altura, y cuyo orificio superior cubre una válvula O, que se abre de abajo hacia arriba. El émbolo se halla ajustado en un vástago o varilla que es el que le pone en movimiento, actuando el esfuerzo que se aplique a la bomba sobre la palanca P.

Situado el émbolo en la parte baja de su curso, al elevarse tiende a efectuar el vacío en su parte inferior: la válvula O permanece cerrada por la presión atmosférica, mientras que el aire del tubo A, en virtud de su elasticidad, levanta la válvula S, y pasa en parte al cuerpo de bomba. Enrarecido así el aire, sube el agua en el tubo hasta que la presión de la columna líquida elevada, añadida a la tensión del aire enrarecido que queda en el tubo, equilibre la presión atmosférica que se ejerce sobre el agua del depósito.

Si baja el émbolo, se cierra por su propio peso la válvula S, y se opone a que el aire vuelva desde el cuerpo de bomba al tubo de aspiración. El aire, comprimido por el émbolo, abre la válvula O, y se va a la atmósfera por el tubo C que se halla encima del cuerpo de bomba, y que se denomina *tubo de ascensión*. A una segunda pulsación del émbolo se reproduce la misma serie de fenómenos, y al cabo de algunas penetra el agua por fin en el cuerpo de bomba. A partir de este momento, se modifica el efecto producido. Durante el descenso del émbolo se cierra la válvula S; el agua comprimida abre la válvula O, y penetra en la parte superior del émbolo, el cual la eleva en seguida al subir hasta el depósito superior D. Entonces ya no hay aire en el cuerpo de bomba, y

el agua, oprimida por la presión atmosférica, asciende con el émbolo, a no ser que el término de su curso se halle a más de  $10^m,3$  sobre el nivel del agua en el depósito en el cual entra el tubo de aspiración A, pues ya hemos visto (148) que una columna de agua de  $10^m,3$  equilibra la presión atmosférica.

Para cerciorarse de la altura que se puede dar al tubo de aspiración A, obsérvese que, en la práctica jamás se aplica exactamente el émbolo sobre la base del cuerpo de bomba, y que, cuando se halla en la parte más baja de su curso, queda todavía debajo de él un *espacio perdido* lleno de aire a la presión atmosférica. Supongamos que sea este espacio  $\frac{1}{30}$  del volumen del cuerpo de bomba: el aire que contiene se dilata a medida que sube el émbolo, y llegado que haya éste a la parte más alta de su curso, su tensión será, según la ley de Mariotte,  $\frac{1}{30}$  de la presión atmosférica. No puede, pues, enrarecerse más allá de este límite el aire del tubo de aspiración, y por lo tanto, no es posible que suba en este tubo el agua, en el caso supuesto, más que a una altura igual a los  $\frac{29}{30}$  de  $10^m,3$  es decir, a  $9^m,9$ . Esta altura es aún demasiado grande, porque el agua debe elevarse cierta cantidad sobre las válvulas, y así es que en general sólo se dan 8 metros a los tubos de aspiración.

En resumen, en la bomba aspirante sube primero el agua en el tubo de aspiración por efecto de la presión atmosférica, no pudiendo pasar de 8 a 9 metros la altura que en el mismo se obtiene. Pero una vez que se encuentra el agua encima del émbolo, sube por efecto de la fuerza ascensional de éste, de suerte que la altura a que puede elevarse entonces no depende va más que de la fuerza que mueva el émbolo.

191. Bomba aspirante-impelente. -La bomba aspirante-impelente eleva el agua por aspiración y por presión a la vez; difiere muy poco de la anterior, siendo su principal diferencia la de ser macizo su émbolo. En la base del cuerpo de bomba, sobre el orificio del tubo aspirador, existe la válvula S ([fig. 133](#)) que se abre de abajo hacia arriba. Otra válvula O, que se abre en el mismo sentido, cierra la abertura de un tubo acodillado que, partiendo del orificio *o*, practicado cerca de la válvula S, va a terminar, debajo del platillo *a*, en un receptáculo M, que es el *depósito de aire*. Por último, de este depósito parte un tubo de ascensión D, que eleva el agua a una altura más o menos considerable.

A cada ascensión del émbolo B, sube el agua por el tubo A y penetra en el cuerpo de bomba. Al bajar aquél se cierra la válvula S, y el agua comprimida levanta la válvula O para pasar al depósito M, y de aquí al tubo D, en el cual no tiene más límite la altura que la fuerza del motor que actúa sobre la bomba.

Si fuese el tubo D la prolongación del de comunicación *Jao*, sería intermitente la salida verificándose al bajar el émbolo y cesando al subir. Pero entre estos dos tubos hay una solución de continuidad, la cual, por medio del aire encerrado en M, facilita la salida continua. En efecto, repelida el agua al depósito M, se divide en dos partes, una de las cuales, al elevarse en el tubo D, comprime al líquido del depósito, y la otra, en virtud de esta presión, asciende en el mismo encima del orificio inferior del tubo D, comprimiendo al aire que tiene encima. De consiguiente, cuando sube el pistón y no actúa ya para repeler el agua, el aire del depósito, por el exceso de presión que ha recibido, reacciona sobre el líquido y se eleva en el tubo D, hasta que baja de nuevo el émbolo, de suerte que no existe intermitencia en la salida.

192. Bomba impelente. -La *bomba impelente* no actúa más que por presión, y no utiliza el peso de la atmósfera. Esta bomba difiere simplemente de la anterior por carecer de tubo de aspiración, introduciéndose el cuerpo de bomba en el agua misma que se trata de elevar. La continuidad de la salida se obtiene por medio de un depósito de aire, semejante al que ya hemos descrito, o bien sirviéndose de un sistema de dos bombas que funcionan alternativamente. Tales son las de incendios.

193. Carga que experimenta el émbolo. -En la bomba aspirante (fig. 132), cuando el agua llena el tubo aspiración y el cuerpo de bomba hasta el orificio de salida, el *esfuerzo necesario para levantar el émbolo es igual al peso de una columna de agua que tuviese por base el émbolo y por altura la distancia vertical del orificio de salida al nivel del agua en el depósito de donde se saca, es decir, la altura a que ha de elevarse el agua*. En efecto, sea  $A$  la presión atmosférica,  $a$  la altura del agua en  $C$ , sobre el émbolo, y  $a'$  la de la columna de agua que llena el tubo de aspiración y la parte inferior del cuerpo de bomba. La presión encima del émbolo es evidentemente  $A+a$  y la de abajo  $A-a'$ , pues el peso de la columna  $a'$  tiende a equilibrar la presión atmosférica. Como la presión  $A-a'$  tiende a levantar el émbolo, la resistencia efectiva es igual al exceso de  $A+a$ , sobre  $A-a'$ , es decir,  $a+a'$ , que es lo que debía demostrarse.

En la bomba aspirante-impelente (fig. 133) fácilmente se ve que la presión que sufre el émbolo es también igual al peso de una columna de agua que tenga por base la sección del émbolo, y por altura la que debe alcanzar el agua.

194. Frasco de Mariotte; su uso. -El *frasco de Mariotte* es un aparato que ofrece muchos efectos notables de presión atmosférica, y que da una salida constante. Consiste en un frasco algo grande con el tapón (fig. 134) cruzado por un tubo de vidrio abierto por sus dos extremidades. En la pared del frasco existen tres tubitos  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , de orificio estrecho y cerrado por un taponcito de madera.

Suponiendo enteramente llenos de agua el frasco y el tubo, consideremos lo que pasa cuando se abre sucesivamente uno de los tubitos  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , siempre que la extremidad inferior del tubo  $g$  se halle entre los dos tubitos  $b$  y  $c$ .

1.º Si se abre primero el tubito  $b$ , sale el agua, baja el nivel en el tubo  $g$ , y luego que este nivel es el mismo que en  $b$ , cesa la salida. Explícanse estos fenómenos por el exceso de presión que desaparece luego que el nivel es el mismo en el tubo  $g$  que en  $b$ . En efecto, antes de que principiase la salida, no era igual la presión sobre todos los puntos de la capa horizontal  $be$ ; pues en  $e$  se componía de la presión atmosférica, a más del peso de la columna de agua  $ge$  mientras que en  $b$  era la presión igual a la atmosférica. Pero luego que el nivel es el mismo en  $e$  que en  $b$ , existe equilibrio, porque en el frasco y en el tubo es entonces idéntica la presión en todos los puntos de la capa horizontal  $be$  (81, 3º). Efectivamente, la presión que se ejerce en este caso es igual a la de la atmósfera, y también es fácil demostrar que la misma presión actúa en un punto cualquiera  $o$  de la capa  $be$ . Al efecto, representemos por  $H$  la presión de la atmósfera, y como esta fuerza obra directamente en  $b$  y en  $e$ , se trasmite en todos sentidos en el interior del frasco, según el principio de Pascal (80), y la pared  $k$  resiste de abajo hacia arriba una presión igual a  $H-ko$ , porque el peso de la columna de agua  $ko$  destruye en parte la presión que tiende a transmitirse en  $k$ . Ahora bien, en virtud del principio de mecánica que sienta que *la reacción es siempre igual y contraria a la acción*, la presión  $H-ko$  es rechazada de arriba abajo por la pared  $k$  sobre la capa  $be$ ; de suerte que la molécula  $o$  resiste en realidad dos presiones, igual la una al peso de la columna  $ko$ , y la otra a la presión  $H-ko$  que resulta de la reacción de la pared  $k$ . La presión real que sufre la molécula  $o$  es, pues,  $ko+H-ko$ , o  $H$ , que es lo que íbamos a demostrar.

2.º Si se cierra el tubito  $b$ , y se abre el  $a$ , no hay salida; al contrario, entra el aire en el frasco por el orificio  $a$  y sube el agua en el tubo  $g$  hasta la capa  $ad$ , y llegado ya este momento se restablece el equilibrio. En efecto, fácil es reconocer, por medio de un razonamiento anterior, que la presión es entonces la misma en todos los puntos de la capa horizontal  $ad$ .

3. Cerrados ahora los tubos  $a$  y  $b$ , abramos el orificio  $c$ . En este caso hay salida con una velocidad constante, mientras el nivel del agua en el frasco no es inferior al orificio  $l$  del tubo. Entra en este caso a burbujas el aire por dicho orificio, y se acumula en la parte superior del frasco, en donde ocupa el sitio del agua que fluye.

Para demostrar que la salida es constante por el orificio  $c$ , preciso es hacer ver que la presión que se ejerce en la capa horizontal  $ch$  es invariablemente igual a la presión de la atmósfera aumentada con la de la columna de agua  $hl$ . Supongamos, en efecto, que haya bajado en el frasco el nivel hasta la capa  $ad$ : el aire que ha penetrado sufre entonces una presión igual a  $H-pn$ ; presión que, en virtud de su elasticidad, transmite a la capa  $ch$ , la cual resiste además el peso de la columna de agua  $pm$ ; de manera que la presión que se nota en  $m$  es en realidad  $pm+H-pn$ , o  $H+mn$ , es decir,  $A+hl$ . Demostraríase de igual manera que esta presión es también la misma cuando el nivel baja a  $eb$ , y así sucesivamente ínterin está más alto aquél que el orificio. Por lo tanto, es constante la presión en la capa  $ch$ , y de consiguiente, la velocidad de salida. Pero luego que el nivel es interior al punto  $l$ , decrece esta presión, y por lo mismo la velocidad.

Vese, por lo que precede, que el frasco de Mariotte da el medio de obtener una salida constante; para lo cual se le llena de agua, y se tiene abierto el tubito situado debajo del orificio  $l$  del tubo. La velocidad de la salida es entonces proporcional a la raíz cuadrada de la altura  $lh$  (117).

▽△

## Libro quinto

Acústica

▽△

### Capítulo primero

▽△

#### Producción, propagación y reflexión del sonido

195. Objeto de la acústica. -La *acústica* tiene por objeto el estudio del sonido y el de las vibraciones de los cuerpos elásticos.

La música considera los sonidos bajo el punto de vista de los sentimientos y de las pasiones que pueden excitar en nosotros, mientras que la acústica sólo atiende a las propiedades de los sonidos, haciendo abstracción de las sensaciones que experimentamos.

196. Sonido y ruido. -El *sonido* es una sensación particular excitada en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, siempre que puede transmitirse este movimiento al órgano del oído, al través de una sustancia elástica.

No son idénticos todos los sonidos, pues presentan diferencias suficientemente sensibles para distinguirlos entre sí, compararlos y determinar sus relaciones.

Distínguese, en general, el sonido del *ruido*. El sonido propiamente dicho, o el *sonido musical*, es el que produce una sensación continua, siendo factible apreciar su valor musical; mientras que el ruido es un sonido de muy escasa duración para que sea dable su exacta apreciación, como sucede en el estampido de los cañonazos; o bien es una mezcla confusa de muchos sonidos discordantes, como el retumbo de los truenos o el

murmullo de las olas. Con todo no se halla bien deslindada la diferencia entre el sonido y el ruido, pues hay oídos tan perfectamente organizados, que determinan el valor musical del ruido de los carruajes que circulan por el empedrado de las calles.

197. Causa del sonido. -El sonido es siempre el resultado de rápidas oscilaciones comunicadas a las moléculas de los cuerpos elásticos, cuando algún choque o algún rozamiento, ha roto su equilibrio. Tienden entonces, a recobrar su posición primitiva, lo cual no lo consiguen sino después de haber ejecutado varios movimientos oscilatorios o de vaivén sumamente veloces, y cuya amplitud decrece con no menor rapidez.

Llámase *cuerpo sonoro* el que produce un sonido; *oscilación o vibración sencilla*, el movimiento que no comprende más que una *ida* o una *vuelta* de las moléculas vibrantes, y *vibración doble o completa*, si comprende *ida* y *vuelta*. Se comprueban experimentalmente las vibraciones con la mayor facilidad, pues si se proyecta finísimo polvo sobre un cuerpo que produce sonidos, se nota que toma aquél un rápido movimiento, haciendo así visibles las vibraciones de los cuerpos. De igual manera, si se da un golpe a una cuerda tensa y algo larga, son aparentes a la simple vista sus vibraciones.

198. El sonido no se propaga en el vacío. -Las vibraciones de los cuerpos elásticos sólo causan en nosotros la sensación del sonido cuando se transmiten al través de un medio ponderable, interpuesto entre el órgano del oído y el cuerpo sonoro, y vibrando a la par con él. Este medio es ordinariamente el aire; pero no obstante, los gases, los vapores, los líquidos y los sólidos, transmiten también el sonido.

Para demostrar que es necesaria la presencia de un medio ponderable para la propagación del sonido, se hace el siguiente experimento: se coloca debajo del recipiente de la máquina neumática un timbre o campana que golpee de una manera continua un martillito movido por un aparato de relojería ([fig. 135](#)). Mientras se halla el recipiente lleno de aire, se oyen con perfecta claridad los golpes del martillito; mas a medida que va enrareciéndose el aire, se nota que pierden parte de su intensidad, cesando por fin de ser perceptibles luego que queda hecho el vacío; vemos, pues, que en éste no se propaga el sonido.

Para que el experimento sea concluyente, se dispone el aparato sobre sustancias blandas, como la pluma, etc., porque las piezas metálicas de que aquél se compone pueden transmitir sus vibraciones a la platina de la máquina neumática, y ésta al aire exterior.

Este mismo experimento puede efectuarse de un modo más sencillo por medio de un globo de vidrio con llave, y que contenga una campanita suspendida de un hilo. Si se agita el globo mientras está lleno de aire, se oye aquélla distintamente; pero deja de notarse luego que éste se enrarece por medio de la máquina neumática.

199. El sonido se propaga en todos los cuerpos elásticos. Si en los dos experimentos que acabamos de describir, hecho el vacío se deja que penetre en el recipiente o en el globo un gas cualquiera o un vapor, se oye muy bien el sonido del timbre, con lo cual queda demostrado que éste se propaga en los gases y en los vapores, del mismo modo que en el aire.

De igual manera se trasmite el sonido en los líquidos. En efecto, cuando dos cuerpos se chocan debajo del agua, se oye perfectamente el choque; y los buzos que bajan hasta el fondo de las aguas entienden perfectamente todo lo que se les dice desde la superficie de las mismas.

En cuanto a los sólidos, es tal su conductibilidad, que basta un ruido sumamente ligero, como el del roce de las barbas de una pluma, producido en la extremidad de un madero, para que se oiga en la otra. Tan perfectamente conduce el suelo el sonido, que de noche, con sólo aplicar el oído sobre la tierra, pueden percibirse, a grandes distancias, los pasos de las caballerías o cualquiera otro ruido.

200. Propagación del sonido en el aire. -Con objeto de simplificar la teoría de la propagación del sonido, consideraremos primero el caso en el cual se propaga por un tubo cilíndrico indefinido. Sea, pues, un tubo MN ([fig. 136](#)) lleno de aire a una presión y temperatura constantes, en cuyo interior existe un émbolo P que oscila con gran velocidad de  $a$  a A, y recíprocamente. Dicho émbolo, al pasar de  $a$  a A, comprime al aire que contiene el tubo, y por efecto de la gran compresibilidad de este fluido, no se verifica la condensación en toda la longitud del tubo, sino simplemente en cierta parte AH, que se denomina la *onda condensada*.

Pero no todas las porciones de esta onda ofrecen igual condensación, ni tampoco es idéntica su velocidad; porque el émbolo, en su movimiento de vaivén, se halla animado de velocidades variables. La velocidad, nula primeramente en  $a$ , crece de un modo progresivo hasta la parte media de su curso, para decrecer luego hasta A, en donde vuelve a ser nula. Resultan, pues, de aquí, en la onda AH, densidades y velocidades del aire que varían a la par que la velocidad del émbolo. En A, donde se halla éste en reposo, es nula la velocidad del aire, por lo que ha recobrado éste su densidad primitiva. En H, que es el punto en el cual finaliza la onda, la velocidad y la densidad son las mismas que en A; pero en los puntos intermedios crecen estas cantidades desde A hasta la sección media de la onda, decreciendo en seguida hasta H.

Si suponemos dividido el tubo MN en longitudes iguales a AH, y subdividida cada una de estas en secciones paralelas al émbolo, se demuestra, por medio del cálculo, que en el momento en que la primera sección de la onda AH queda en reposo, principia a participar del movimiento la primera sección de la parte HH'; luego, cuando la segunda sección de la onda AH pasa al estado de reposo, se comunica el movimiento a la segunda de HH' y así sucesivamente de sección en sección en las longitudes H'H'', H''H'''... La onda condensada avanza, pues, en el tubo, pasando sucesivamente cada una de sus partes por los mismos lados de velocidad y de condensación.

Al retroceder el émbolo en la dirección Aa, se forma detrás de él un vacío, en el cual se enrarece la capa de aire en contacto con la cara posterior del émbolo. Enrareciéndose luego la capa siguiente, devuelve a la primera a su estado primitivo de condensación, y así sucesivamente de capa en capa, de suerte que, cuando regresa a  $a$  el émbolo, se produce una *onda enrarecida* de igual longitud que la condensada, a la cual sigue inmediatamente en el tubo cilíndrico, donde se propagan juntas, por poseer las secciones correspondientes de ambas ondas velocidades iguales y contrarias.

El conjunto de la onda condensada y de la enrarecida forma una *ondulación*, es decir, que una ondulación comprende la parte de la columna de aire modificada durante una

ida y una vuelta del émbolo. Por *longitud de la ondulación* se entiende el espacio que recorre el sonido, mientras dura una vibración completa del cuerpo que le produce. Esta longitud es tanto menor, cuanto más rápidas son las vibraciones.

Fácilmente se pasa de la teoría de las ondas sonoras en un cilindro a la de su movimiento en todos sentidos en un medio indefinido. Basta para esto aplicar en todas direcciones, a cada molécula de los cuerpos vibrantes, cuanto acabamos de decir de un émbolo móvil en un tubo. Producense, en efecto, alrededor de cada centro de vibración, una serie de ondas esféricas, alternativamente condensadas y enrarecidas. Como estas ondas se hallan comprendidas entre dos superficies esféricas concéntricas, cuyos radios crecen gradualmente, mientras que permanece constante la longitud de ondulación, aumenta su masa a medida que se alejan del centro de vibración, resultando de aquí, que va de debilitándose por grados la velocidad de vibración impresa a las moléculas, y que disminuye la intensidad del sonido.

Estas ondas esféricas, alternativamente condensadas y enrarecidas, son las que, al propagarse en el espacio, transmiten el sonido. Se agitan a un tiempo muchos puntos, fórmase alrededor de cada uno de ellos un sistema de ondas semejante al anterior. Todas estas ondas se transmiten las unas al través de las otras, sin modificar su longitud ni su velocidad. Unas veces, las ondas condensadas o enrarecidas se superponen sobre ondas de la misma naturaleza, determinando así un efecto igual a su suma; y en otras ocasiones se encuentran y producen un efecto que equivale a su diferencia. Basta agitar en muchos puntos la superficie del agua tranquila, para hacer sensible a la vista la *coexistencia de las ondas*.

201. Causas que hacen variar la intensidad del sonido. Muchas causas modifican la fuerza o la *intensidad* del sonido, a saber: la distancia del cuerpo sonoro, la amplitud de las vibraciones, la densidad del aire en el sitio en que se produce el sonido, la dirección de las corrientes de aire, y por último, la inmediatez o proximidad de otros cuerpos sonoros.

1.º *La intensidad del sonido se halla en razón inversa del cuadrado de la distancia del cuerpo sonoro al órgano auditivo.* Esta ley, a que nos conduce el cálculo, se puede demostrar también experimentalmente.

En efecto, concibamos muchos sonidos que sean exactamente de igual intensidad, por ejemplo, el que produzcan timbres idénticos, golpeados por macitos de igual peso, y que caigan de alturas iguales. Si se colocan cuatro de estos timbres a una distancia de 20 metros del oído, y uno solo a la distancia de 10 metros, se observa que este último, herido él solo, produce un sonido de igual intensidad que los cuatro primeros, heridos simultáneamente; lo cual nos demuestra que para una distancia doble la intensidad es cuatro veces menor.

2.º *La intensidad del sonido aumenta con la amplitud de las vibraciones del cuerpo sonoro.* La dependencia que se nota entre la intensidad del sonido y la amplitud de las vibraciones, se evidencia fácilmente por medio de las cuerdas vibrantes, pues si son éstas un poco largas, se hacen sensibles a la simple vista las oscilaciones, notándose que, cuando decrece su amplitud, se debilita el sonido.

3.º *La intensidad del sonido depende de la densidad del aire en el lugar en el cual se produce.* Colóquese debajo del recipiente de la máquina neumática un aparato de relojería, y se observará que decrece la intensidad del sonido a medida que se enrarece el aire.

En el hidrógeno, que viene a ser unas 14 veces menos denso que el aire, son mucho menos intensos los sonidos, por más que permanezca invariable la presión. Lo contrario sucede en el ácido carbónico, que por ser su peso específico 1,52, presta más intensidad a los sonidos. En las altas montañas, a cuya altura se encuentra el aire muy enrarecido, es necesario hablar muy alto para hacerse oír, notándose además que son más débiles las explosiones de las armas de fuego.

4.º *La agitación del aire y la dirección de los vientos modifican la intensidad del sonido.* Está probado que en tiempo de calma, siempre se propaga mejor el sonido, que cuando reina algún viento, y en este último caso, es más intenso aquél, en igualdad de distancia según la dirección del viento, que en el sentido opuesto.

5.º Por último, *la proximidad de un cuerpo sonoro refuerza el sonido.* La cuerda de un instrumento, tensa al aire libre, da un sonido muy débil cuando se la hace vibrar lejos de todo cuerpo sonoro; pero si se la coloca encima de una caja sonora, como puede verse en una guitarra, en un violín o en un contrabajo, produce un sonido lleno e intenso, debido a que la caja y el aire que contiene vibran al unísono con la cuerda. A esta propiedad se debe la aplicación de las cajas sonoras en los instrumentos de cuerda.

202. Aparato para reforzar el sonido. -Para demostrar la influencia de las cajas llenas de aire respecto al refuerzo del sonido, construyó Savart un aparato ([fig. 137](#)), que consiste en una vasija hemisférica A de bronce, que se hace vibrar por medio de un arco, junto al cual existe un cilindro hueco B de cartón, abierto en su extremidad anterior y cerrado por la posterior. Por medio de un mango, puede aceptar este cilindro todas las posiciones que se quieran, pues además de poder girar sobre su montante, insiste éste sobre la pieza C, que resbala libremente sobre el pie del aparato, de suerte que con suma facilidad se aleja el cilindro B de la vasija A. Dispuesto el aparato conforme se ve en el grabado, los sonidos que produce cuando se le hace vibrar adquieren una fuerza y una claridad tal, que, sólo oyéndolos, se puede comprender; pero pierden casi toda su intensidad si se da una vuelta al cilindro, debilitándose gradualmente cuando éste va separándose poco a poco, lo cual nos demuestra que el refuerzo del sonido depende de las vibraciones del aire contenido en el cilindro. En este aparato, el cilindro B debe contar una profundidad determinada, a fin de que el aire que contiene vibre al unísono con la vasija de bronce, pues de lo contrario vibraría sólo ésta.

Refiere Vitruvio que, antiguamente, se colocaban en los teatros vasijas resonantes para reforzar la voz de los actores.

203. Influencia de los tubos respecto a la intensidad del sonido. -Hemos dicho que la intensidad del sonido está en razón inversa del cuadrado de la distancia, pero no es aplicable esta ley a los sonidos transmitidos por tubos, sobre todo si son cilíndricos y rectos. Las ondas sonoras dejan de propagarse entonces en forma de esferas concéntricas crecientes, y por lo mismo se puede transmitir el sonido a una distancia considerable sin alteración muy sensible. M. Biot demostró que en una de las cañerías que conducen las aguas en París, la cual contaba 951 metros de longitud, la intensidad

de la voz decrecía tan poco, que de un extremo a otro de la cañería se podía seguir una conversación en voz baja. Con todo, la debilitación del sonido se hace sensible en los tubos de gran diámetro o en aquéllos cuyas paredes presentan asperezas, como se observa en los subterráneos y en las galerías de gran longitud.

Esta propiedad que poseen los tubos de transmitir el sonido a largas distancias, se utilizó por primera vez en Inglaterra, aplicando en los grandes establecimientos, *speaking tube* (tubos parlantes o acústicos) para la transmisión de órdenes y avisos. Constituyen estos aparatos tubos de goma elástica de pequeño diámetro, que pasan de una a otra pieza cruzando las paredes. Hablando en voz baja en un extremo, se oye todo distintamente en el otro.

En vista de los experimentos ya citados de M. Biot, es evidente que por medio de tubos acústicos se podría establecer una correspondencia de viva voz entre dos ciudades alejadas. Como el sonido recorre por término medio 337 metros por segundo, en cuatro minutos se propagaría según una distancia de 20 leguas de a 4,000 metros.

204. Velocidad del sonido en los gases. -Siendo sucesiva la propagación de las ondas sonoras, debe tardar un intervalo de tiempo más o menos largo en transmitirse el sonido de un punto a otro; y así lo demuestran efectivamente muchísimos fenómenos. Por ejemplo, el trueno no se oye hasta pasados algunos momentos después de visto el relámpago, por más que tanto éste como aquél surjan simultáneamente en las nubes.

Numerosas tentativas se han efectuado para determinar la velocidad del sonido en el aire, es decir, el espacio que recorre en un segundo. Hízose la última de noche, en el verano de 1822, por los individuos de la Oficina o del departamento de longitudes de Francia. Eligiéronse para estaciones dos alturas, situadas una en Villejuif, y en Montlhéry la otra, cerca de París. En cada estación se disparaba un cañonazo de 10 en 10 minutos. Los observadores de Villejuif oyeron muy distintamente los doce que se tiraron en Montlhéry; pero los de esta estación sólo oyeron siete de los doce disparados en aquélla, por serles contraria la dirección del viento.

En cada estación anotaban los observadores, valiéndose de cronómetros, el tiempo que trascurría entre la aparición de la luz en el momento del estampido y la percepción de éste, tiempo que podía tomarse muy bien como si fuera el empleado por el sonido en propagarse de una a otra estación, porque el intervalo entre ambas sólo era de  $18612^m,52$ , y en la óptica veremos que, para recorrer esta distancia, tarda la luz un tiempo inapreciable. Encontróse así, que el tiempo gastado en la transmisión era  $54^{\prime\prime},6$ , y dividiendo por este número la distancia, resultó que la velocidad del sonido era de  $340^m,89$  por segundo a la temperatura de  $16^{\circ}$ , que fue la de la atmósfera durante el experimento.

La velocidad del sonido en el aire decrece con la temperatura, pues a  $10$  grados sólo corre  $337$ , y a cero  $333$  metros; pero a una misma temperatura es independiente de la densidad del aire, y por lo tanto, de la presión. Siendo igual la temperatura, la velocidad es la misma para todos los sonidos, fuertes o débiles, graves o agudos. En efecto, Biot demostró, en los ya mencionados experimentos sobre la conductibilidad de los tubos, que cuando se tocaba la flauta en la extremidad de un tubo de fundición de  $951$  metros de longitud, conservaban su armonía los sonidos en la otra extremidad, lo cual indica que los diferentes sonidos se propagan con velocidades iguales.

Varía la velocidad del sonido, según la naturaleza de los gases, aunque permanezca constante la temperatura. Haciendo resonar un mismo tubo de órgano con diferentes gases, obtuvo Dulong, por medio del cálculo, que, a la temperatura de cero, la velocidad del sonido, en los gases siguientes, es:

Ácido carbónico	116 <sup>m</sup>
Oxígeno	317
Aire	333
Óxido de carbono	337
Hidrógeno	1269

205. Fórmulas para calcular la velocidad del sonido en los gases. -Para calcular la velocidad del sonido en los gases, a la temperatura de cero, Newton fue el primero que dio la fórmula

$$v = \sqrt{e/d},$$

en la cual  $v$  representa la velocidad del sonido, es decir, el espacio que recorre en un segundo,  $e$  la elasticidad del gas a cero, y  $d$  su densidad también a cero.

Se deduce de esta fórmula que la velocidad de propagación del sonido, en los gases, *es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad del gas que se considera, e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad.* Se observa al mismo tiempo que esta velocidad permanece constante, cualquiera que sea la presión, porque aumentando la elasticidad, aumenta en la misma relación la densidad, según la ley de Mariotte.

Representando por  $g$  la intensidad de la gravedad, por  $a$  la altura de barómetro referida a cero, y por  $d$  la densidad del mercurio también a cero, es evidente que, para un gas sometido a la presión atmosférica, la elasticidad  $e$ , creciendo como cada una de estas cantidades, se puede establecer  $e = ga d$ . La fórmula de Newton se convierte entonces, para la temperatura cero,

$$v = \sqrt{ga d/d};$$

pero aumentando la temperatura de un gas desde  $o$  a  $t$  grados, su densidad varía en razón inversa del volumen; por consiguiente, si representamos por 1 el volumen del gas a cero, su volumen a  $t$  grados será  $1 + at$ ,  $a$  siendo el coeficiente de dilatación del gas (CALÓRICO, cap. IV); y su densidad será  $d/1 + at$  a  $t$  grados. La fórmula de Newton, para una temperatura  $t$ , debe representarse por

$$v = \sqrt{gad/d (1 + at)}.$$

Los valores de  $v$  obtenidos por esta fórmula, han sido siempre menores que los obtenidos por la experiencia. Laplace dio, como causa de esta diferencia, el calor que se desarrolla, por efecto de la presión, en las ondas condensadas. Poisson y M. Biot, apoyándose en las ideas de Laplace, han encontrado que la fórmula de Newton debía de representarse según la forma

$$v = \sqrt{gad/d (1 + at)c/c'};$$

$c$  representando el calórico específico, a una presión constante, del gas en que se propaga el sonido (CALÓRICO cap. VIII), y  $c'$  su calórico específico según un volumen constante. Modificada así, esta fórmula da valores de  $v$  acordes con los de la experiencia.

206. Velocidad del sonido en los sólidos y en los líquidos. -La velocidad del sonido en los líquidos es mucho mayor que en el aire; pues los señores Colladon y Sturm encontraron en los experimentos hechos en 1827 en el lago de Ginebra, que la velocidad

del sonido en el agua vale 1435 metros es decir, que es cuádruple de la que posee en el aire.

Esta velocidad es mucho mayor en los sólidos. M. Biot encontró directamente, haciendo varios experimentos con tubos de hierro fundido, destinados para conducir el agua, que en la fundición se propaga el sonido con una velocidad 10,5 veces más considerable que en el aire. Chladni, Savart, M. Masson y M. Wertheim la determinaron teóricamente en los demás sólidos, apoyándose, ya en el número de vibraciones longitudinales o transversales de los cuerpos, ya en su coeficiente de elasticidad. Valiéndose de las vibraciones longitudinales encontró Chladni, que en las maderas es la velocidad del sonido de 10 a 16 veces mayor que en el aire. En los metales es más variable esta velocidad, y de 4 a 16 veces superior a la que posee en el aire.

207. Reflexión del sonido. -Mientras nada se opone al desenvolvimiento de las ondas sonoras, se propagan éstas en la forma de esferas concéntricas; pero luego que tropiezan con algún obstáculo, siguen la ley general de los cuerpos elásticos, es decir, que retroceden sobre sí mismas, formando nuevas ondas concéntricas, que emanan, al parecer, de un segundo centro situado al otro lado del obstáculo: esta acción se expresa diciendo que las ondas se *reflejan*.

La [fig. 138](#) representa una serie de ondas incidentes reflejadas sobre un obstáculo PQ. Si se considera por ejemplo, la onda incidente MCDN, emitida del centro A, la reflejada correspondiente se halla indicada por el arco CKD, que tienen en *a* el *centro virtual*.

Si se une un punto cualquiera C del cuerpo reflector con el centro sonoro A, y se tira la perpendicular CH a la superficie de dicho cuerpo, el ángulo ACH es el *ángulo de incidencia* y el BCH el *ángulo de reflexión*.

Ahora bien, la reflexión del sonido se halla sujeta a las dos leyes siguientes, que son idénticas para el calor y la luz.

1.º *El ángulo de reflexión es igual al de incidencia.*

2.º *El rayo sonoro de reflexión y el de incidencia se hallan situados en un mismo plano, perpendicular a la superficie reflejante.*

En virtud de estas leyes, la onda que en la figura se propaga en el sentido AC, acepta después de la reflexión el camino CB; de suerte que un observador situado en B oye, además del sonido que parte del punto A, otro que le parece emitido según la dirección CB.

208. Ecos y resonancias. -Llámase *eco* la repetición de un sonido en el aire por efecto de su reflexión sobre algún obstáculo.

Para que haya eco, es menester que se refleje el sonido en la dirección del observador, y que la superficie reflectante se encuentre por lo menos a una distancia de 17 metros. En efecto, apenas es posible distinguir un sonido de otro, si no pasa por lo menos un décimo de segundo entre la percepción de ambos. Como el sonido recorre sensiblemente 340 metros por segundo, es claro que en un décimo de segundo recorrerá 34 metros; por lo tanto, si se encuentra el obstáculo a 17 metros, el sonido tendrá que

recorrer por lo menos 34 para ir y volver. El tiempo que transcurre entre el sonido directo y el reflejado, valdrá, pues, a lo menos un décimo de segundo; de suerte que ya no se confundirán los sonidos, oyéndose distintamente el reflejado. Vese, por lo que precede, que si se habla en alta voz delante de un reflector que diste 17 metros, no puede oírse más que la última silaba reflejada, por lo que el eco se llama *monosilábico*; pero si distase aquél dos, tres veces 17 metros, sería el eco *bisilábico*, *trisilábico*, y así sucesivamente.

Cuando la distancia de la superficie reflectora no llega a 17 metros, se confunden los sonidos directo y reflejado; pero si bien no es posible oírlos separadamente, sin embargo, se encuentra reforzado el sonido único, circunstancia que se expresa diciendo que hay *resonancia*. Tal es lo que se observa en las habitaciones espaciosas. Las salas desamuebladas resuenan mucho; mas por el contrario, si existen en ellas tapices y cortinajos que reflejan mal el sonido, pierden aquella propiedad, trasformándose en sordas.

Denomínanse *ecos múltiples* los que repiten muchas veces el mismo sonido, que es lo que sucede cuando dos obstáculos, situados el uno enfrente del otro, como dos paredes paralelas, por ejemplo, se envían sucesivamente el sonido. Ecos hay que repiten así hasta 20 o 30 veces el mismo sonido, y en ninguna obra de física deja de citarse particularmente el del castillo de Simonetta, en Italia.

Siendo las leyes de la reflexión del sonido las mismas que las de la luz y del calor, dan origen las superficies curvas a *focos acústicos* análogos a los luminosos y caloríficos que se producen delante de los reflectores cóncavos. Por ejemplo, si se habla debajo del arco de un puente de piedra, con la cara vuelta hacia uno de los pilares, puede reproducirse la voz junto al otro pilar, con bastante intensidad para mantener así una conversación en voz baja, sin que puedan oírla las personas que se hallan en el espacio intermedio.

En el Conservatorio de Artes y oficios de París hay en el piso bajo una sala cuadrada, de bóveda elíptica, que ofrece este fenómeno de un modo notable, al situarse dos personas con los dos focos de la elipse.

Por lo demás, obsérvese que, no sólo se refleja el sonido en la superficie de los cuerpos sólidos, como son las paredes de un edificio, las maderas y las rocas, sino también en las nubes, al cruzar capas de aire de diferente densidad, y por fin, en las mismas vejiguillas o vesículas de las nieblas. Nótase, en efecto, que si el aire está cargado de niebla, sufren los sonidos una multitud de reflexiones parciales, apagándose con rapidez. De noche, y con un aire puro tranquilo y de densidad uniforme, es cuando pueden oírse a mayor distancia los sonidos.

209. Refracción del sonido. -Veremos más adelante que se entiende por *refracción* un cambio de dirección que experimentan la luz y el calor al pasar de un medio a otro. Recientemente ha demostrado M. Sondhauss, en Alemania, que las ondas sonoras se refractan lo mismo que el calor y la luz.

Al efecto, construyó lentes gaseosas llenando de ácido carbónico varias cubiertas membranosas de forma esférica o lenticular. Con cubiertas de papel o de intestino no es

sensible la refracción del sonido, pero con las de *colodión* alcanza un éxito completo el experimento.

M. Sondhauss cortó en un globo muy grande de colodión dos segmentos iguales, y los fijó en las dos caras de un anillo de palastro de 31 centímetros de diámetro, de manera que formasen una lente biconvexa, hueca y de unos 12 centímetros de espesor en el centro. Llenando luego de ácido carbónico la lente así formada, puso un reloj ordinario en la dirección del eje, y buscó en seguida en el otro lado de la lente los puntos en que era más intenso el sonido. Así observó que era apenas perceptible fuera del eje, pero que era muy distinto en éste a una regular distancia de la lente. Las ondas sonoras, pues, al salir de la lente convergen hacia el eje, lo cual demuestra que variaron de dirección, o lo que es lo mismo, que estaban refractadas.

210. Bocinas, trompetilla acústica. -La *bocina* y la *trompetilla acústica* son dos instrumentos fundados a la vez en la reflexión del sonido y en la conductibilidad de los tubos cilíndricos (203).

La bocina, conforme su nombre lo indica, sirve para transmitir la voz a grandes distancias. Consiste en un tubo de hojadelata o de latón ([fig. 139](#)), ligeramente cónico y muy ancho en una de sus aberturas, que se denomina *pabellón*. Este instrumento, que se aplica a la boca por la otra extremidad, trasmite la voz tanto más lejos, cuanto mayores son sus dimensiones. Explícate su efecto por las sucesivas reflexiones de las ondas en las paredes del tubo, reflexiones en virtud de las cuales tienden las ondas a propagarse paralelas al eje del instrumento. Se ha objetado a esta teoría, que los sonidos emitidos al través de la bocina, no sólo se refuerzan en la dirección de su eje, sino también en todas direcciones, y también que el pabellón sería inútil para obtener el paralelismo de los rayos sonoros, mientras que, por el contrario, una influencia notable sobre la intensidad de los sonidos trasmitados. Algunos físicos atribuyen los efectos de la bocina a un refuerzo producido por la columna de aire que existe en el tubo, la cual vibra al unísono a medida que se habla en su extremidad. En cuanto al efecto del pabellón, no se ha dado hasta ahora una explicación satisfactoria.

La trompetilla acústica sirve para las personas que tienen el *oído duro*. En un tubo cónico de metal, con una extremidad en forma de pabellón para recibir el sonido, mientras que la otra se introduce en el oído. El pabellón sirve en este aparato de embocadura, es decir, que recibe los sonidos que salen de la boca de la persona que habla. Trasmítense dichos sonidos mediante una serie de reflexiones en el interior de la trompetilla, de suerte que las ondas que ya han adquirido un gran desarrollo, se encuentran concentradas en el aparato auditivo, produciendo en él un efecto mucho más sensible que el que originarían, si fuesen divergentes.

▽△

## Capítulo II

▽△

## Vibraciones de las cuerdas, número de vibraciones que corresponden a un sonido dado

211. Vibraciones de las cuerdas. -Dase el nombre de *cuerdas*, en acústica, a los cuerpos filiformes elásticos por tensión.

Distínguense en las cuerdas dos especies de vibraciones, unas *trasversales*, o según una dirección perpendicular a las cuerdas, y otras *longitudinales*, o producidas en el sentido de la longitud de aquéllas. Se excitan las primeras con un arco, como en el violín, o pulsando las cuerdas, como en el arpa y en la guitarra. Las longitudinales se originan frotando las cuerdas en el sentido de su longitud con un pedazo de tela espolvoreada con colófano.

Sólo trataremos de las vibraciones trasversales, por ser las únicas que se consideran en la teoría física de la música.

212. Sonómetro. -El *sonómetro* es un aparato que sirve para estudiar las vibraciones trasversales de las cuerdas, y como a menudo sólo posee una de éstas, recibe también por esta razón el nombre de *monocordio*. Consta este aparato de una caja de madera delgada, que refuerza el sonido; de dos caballetes A y D ([fig. 140](#)), por los cuales pasa una cuerda metálica, fija por un extremo y tensa por el otro, mediante diversas pesas P, que pueden aumentarse según se desee. Un tercer caballete o puente B sirve para variar la longitud de la parte de la cuerda que se quiere hacer vibrar.

213. Leyes de las vibraciones trasversales de las cuerdas. -Representando por  $l$  la *longitud* de una cuerda, es decir, la parte vibrante comprendida entre los dos caballetes A y B ([fig. 137](#)), por  $r$  al radio de su sección, por  $d$  su densidad, por P el peso que la tiende, y por  $n$  el número de vibraciones en cada segundo, se encuentra, por medio del cálculo,  $n=1/rl \sqrt{P/p d}$ ; representando  $p$  la relación de la circunferencia al diámetro.

Dedúcese de esta fórmula las cuatro leyes siguientes:

1.º *Siendo constante la tensión de una cuerda, el número de vibraciones, en un tiempo dado, está en razón inversa de la longitud.*

2.º *En igualdad de condiciones, el número de vibraciones está en razón inversa del radio de la cuerda.*

3.º *El número de vibraciones de una misma cuerda es directamente proporcional a la raíz cuadrada del peso que la tiende.*

4.º *En igualdad de circunstancias, el número de vibraciones de una cuerda es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad.*

En música, tienen su aplicación estas leyes en los instrumentos de cuerda, en los cuales se hace variar la longitud, el diámetro y la tensión de las cuerdas hasta que den tal o cual nota.

214. Nodos y líneas nodales. -Siempre que un cuerpo vibra, no sólo lo verifica en su conjunto, sino que generalmente se divide en cierto número de partes alicuotas, animada cada una de vibraciones que le son propias.

Entre estas diversas partes hay puntos o líneas que vibran menos que otras, y que podemos considerar como sensiblemente fijas. Estos puntos y estas líneas son las que se designan con los nombres de *nodos* y de *líneas nodales*. Las partes vibrantes comprendidas entre dos nodos o dos líneas nodales se llaman *concameraciones*. La parte media de una concameración, o sea el punto en que las vibraciones miden su máximo de amplitud, es un *vientre*.

Las cuerdas vibrantes presentan ejemplos curiosos de nodos y vientres, cuando no se hace vibrar más que una parte alicuota de su longitud, es decir, un tercio, un cuarto, un quinto. Para esto se fija una cuerda por sus dos extremidades, haciendo correr o resbalar por debajo un pequeño caballete que se sitúa sucesivamente en el tercio, en el cuarto o en el quinto de la cuerda. Cuando se encuentra en el tercio el caballete ([fig. 141](#)), se hace vibrar la porción BD con un arco, subdividiéndose entonces la AB en las dos partes AC y CB, que vibran por separado, permaneciendo fijo el punto C. Compruébase esto colocando varios papelitos doblados, uno en C, otro entre B y C, y otro entre C y A, notándose que el primero se estremece débilmente, mientras que los otros dos se proyectan a lo lejos. Hay, por lo tanto, un modo en el primer punto, y vientres en los otros dos. Si B se coloca en la cuarta parte de la cuerda, se forman entre A y B dos nodos y tres vientres ([fig. 142](#)); y si en el quinto se notan entre los mismos puntos, tres nodos y cuatro vientres, y así sucesivamente.

No tardaremos en ver cómo se comprueban la presencia y la forma de las líneas nodales en las placas y en las membranas vibrantes.

215. Rueda dentada de Savart, -La *rueda dentada de Savart*, así denominada en recuerdo del apellido de su inventor, es un aparato que sirve para dar a conocer el número absoluto de vibraciones que corresponden a un sonido determinado. Consta de un banco de encina, bien sólido y abierto en toda su longitud, a fin de montar en él dos ruedas A y B ([fig. 143](#)), de las cuales sirve la primera para imprimir una gran velocidad a la menor, y esta última, que es dentada, para hacer vibrar un naípe E fijo en el banco; por medio de esta disposición, chocado el naípe por cada uno de los dientes de la rueda menor, origina en el transcurso de una de sus revoluciones, un número de vibraciones igual a los dientes de la rueda. Finalmente, en un pequeño cuadrante H existe un contador que recibe un movimiento del eje de la rueda dentada, y que indica el número de vueltas, y por lo mismo las vibraciones efectuadas en un tiempo dado.

Si se comunica primero a la rueda dentada un movimiento pausado, se oyen distintamente los choques sucesivos de los dientes contra el naípe; pero si se aumenta gradualmente la velocidad, se obtiene un sonido continuo cada vez más intenso. Cuando se ha logrado reproducir el sonido cuyo número de vibraciones desea conocerse, se sostiene la misma velocidad durante cierto número de segundos; y leyendo en seguida en el contador las revoluciones de la rueda dentada, sólo resta multiplicar este número por el de los dientes para obtener el número total de vibraciones. Divídase, por último, este producto por los segundos correspondientes, y el cociente indica las vibraciones por segundo.

216. Sirena. -La *sirena* es un aparatito que sirve, como la rueda de Savart, para medir con exactitud las vibraciones de un cuerpo sonoro en un tiempo dado. M. Cagniard-Latour, que es su inventor, le dio el nombre de sirena, porque puede producir sonidos debajo del agua.

La sirena es enteramente de cobre. La [figura 144](#) la representa montada sobre una caja o fuelle acústico ([fig. 147](#)), que reconoce por objeto hacer pasar al instrumento una corriente continua de aire. Las [figuras 145](#) y [146](#) revelan los detalles interiores de la sirena. Consiste la parte interna en una caja cilíndrica O, recubierta por una platina fija B, en la cual se apoya un vástago vertical T con su disco A que gira libremente con él. Véanse en la platina B varios orificios circulares equidistantes, y en el disco A otros tantos de igual magnitud, y a la misma distancia del centro que los de aquélla. Estos orificios no son perpendiculares a los planos de la platina y del disco; al contrario, todos ofrecen cierta inclinación constante con respecto a la platina, y en sentido contrario relativamente al último; de suerte que, cuando están unos enfrente de otros, se hallan dispuestos como se ve en *mn* ([fig. 146](#)). Por efecto de esta disposición, cuando pasa del fuelle a la caja cilíndrica y al orificio *m* una corriente de aire, hiere oblicuamente las paredes del orificio *n*, e imprime al disco A un movimiento de rotación en el sentido *nA*.

A fin de simplificar la explicación del juego de la sirena, supongamos primero que, teniendo el disco móvil A 18 orificios, sólo haya uno en la platina B, y consideremos el caso en que coincide con uno de los superiores. Como el aire va a herir oblicuamente la pared de este último, principia a girar el disco móvil, cerrando el orificio del platillo, inferior la parte llena que se encuentra entre dos orificios, consecutivos. Pero como continúa girando el disco en virtud de su velocidad adquirida, al encontrarse otra vez enfrente dos orificios, resulta un nuevo impulso, y así sucesivamente. De esta suerte, durante una revolución completa del disco, se halla el orificio inferior abierto 18 veces y otras tantas cerrado. De aquí resultan una serie de salidas y de suspensiones que ponen en vibración al aire, acabando al fin por producir un sonido, cuando las impulsiones sucesivas son bastante rápidas. Si suponemos ahora que B tenga 18 orificios, lo mismo que el disco que gira, cada orificio producirá simultáneamente el mismo efecto que uno solo; de suerte que el sonido será 18 veces más intenso, pero sin que por esto aumente el número de vibraciones.

Falta averiguar cuántas revoluciones da por segundo el disco A, a fin de conocer las vibraciones que corresponden al sonido que produce el aparato, mientras dura su movimiento de rotación. Al efecto, el vástago T lleva un tornillo sin fin que comunica el movimiento a una rueda *a* de 100 dientes. Esta rueda, que avanza un diente por cada revolución del disco, posee un tope P, el cual a cada vuelta hace andar un diente de una segunda rueda *b* ([fig. 145](#)). Los ejes de estas ruedas ponen en marcha dos agujas que marcan, en sus correspondientes cuadrantes ([fig. 144](#)), una, el número de vueltas del disco A, y la otra, los centenares de vueltas. Dos botones D y C sirven para engranar o para desengranar, cuando así se requiera, la pequeña rueda *a* con el tornillo sin fin.

Como aumenta de tono el sonido a medida que crece la velocidad del disco A, basta forzar el viento para conseguir del aparato el sonido que se desea. Mantiénese entonces por cierto tiempo la misma corriente de aire, dos minutos, por ejemplo, y en seguida se lee en los cuadrantes las revoluciones efectuadas por el disco. Multiplicando este

número por 18 y dividiendo el producto por los 120 segundos, indica el cociente las vibraciones por segundo.

Siendo igual la velocidad de la sirena, el mismo sonido produce debajo del agua que en el aire, sucediendo también lo mismo en todos los gases, lo cual demuestra que un sonido determinado sólo depende del número de vibraciones, sin que en nada influya la naturaleza del cuerpo sonoro.

217. Fuelles acústicos. -Se denominan *fuelles acústicos* los que se emplean como depósitos de aire para poner en acción los instrumentos de viento, tales como las sirenas y los órganos. Entre los cuatro pies de una mesa de madera se ve un fuelle S ([fig. 147](#)), puesto en movimiento por el pedal P. Un depósito D, de piel flexible, sirve para almacenar el aire que en él inyecta el fuelle. Si se comprime dicho depósito por medio de pesas colocadas encima, o por el empleo de un vástago T que mueva la mano, pasa el aire por un conducto E a una caja fija sobre la mesa, la cual posee varios orificios cerrados por pequeñas válvulas de cuero que se abren a voluntad, efectuando un esfuerzo sobre un teclado dispuesto delante de aquélla. En dichos agujeros se fijan la sirena, o bien los tubos sonoros.

218. Límite de los sonidos perceptibles. -Antes que publicara Savart sus experiencias, admitían los físicos que el oído dejaba de percibir el sonido cuando el número de vibraciones sencillas por segundo era inferior a 32 en los sonidos graves, y superior a 18000 en los agudos. Pero aquel físico eminente demostró que dichos límites eran muy reducidos, y que la facultad de percibir con mayor o menor facilidad los sonidos muy graves o muy agudos, depende antes de la intensidad que del tono; de suerte que, cuando no se oyen los sonidos extremos, debemos atribuirlo a que no tienen la suficiente intensidad para impresionar el órgano del oído.

Aumentando el diámetro de su rueda dentada (215), y por consiguiente, la amplitud y la intensidad de las vibraciones, dio más ensanche Savart al límite de los sonidos agudos, el cual extendió hasta 48000 vibraciones sencillas por segundo.

Para los sonidos graves, substituyó, a su rueda dentada, una barra de hierro de 65 centímetros de longitud, que giraba entre dos láminas delgadas de madera, distantes tan sólo de la barra dos milímetros. A cada paso surgía un sonido seco, debido al desalojamiento del aire. Cuando se aceleraba el movimiento, se hacía el sonido muy lleno, continuo y atronador. Cerciorose Savart, por medio de este aparato, que cuando se producen de 14 a 16 vibraciones sencillas por segundo, todavía percibe el oído un sonido bien determinado, pero sumamente grave.

M. Despretz, que ha hecho investigaciones sobre el mismo objeto, ha encontrado, para límite de los sonidos graves, 32 vibraciones simples, y para los agudos, 73700.

▽△

### Capítulo III

▽△

## Teoría física de la música

219. Cualidad del sonido musical. -El sonido musical es el resultado de vibraciones continuas, rápidas e isócronas, que producen en el órgano del oído una sensación prolongada. Se le puede comparar constantemente con otros sonidos y tomar el unísono, que es cabalmente lo que no puede hacerse con el ruido (196).

El oído distingue en el sonido musical tres cualidades particulares, como son: el tono, la intensidad y el timbre.

El *tono* es la impresión que resulta, para el órgano del oído, del mayor o menor número de vibraciones efectuadas en un tiempo dado.

Denominanse *sonidos graves* los producidos por un corto número de vibraciones y *sonidos agudos*, los que son el resultado de muchísimas. De consiguiente, sólo serán sonidos absolutamente graves o agudos, los que se encuentren en los puntos extremos de la escala de los sonidos perceptibles, pues todos los intermedios no son más que graves o agudos de un modo relativo. Con todo, se dice que un sonido es grave o agudo, así como se expresa que es alta o baja una temperatura, comparando el sonido con los que se oyen comúnmente.

La relación entre la gravedad y lo agudo o *alto* de los sonidos se llama *tono*. Es decir, que esta palabra expresa el grado de altura de un sonido, y bajo el punto de vista músico, indica el grado de altura de la gama que se está ejecutando.

Ya hemos visto (201), que la *intensidad* o la fuerza del sonido depende de la amplitud de las oscilaciones, pero no de su número. Un mismo sonido puede conservar igual grado de gravedad o de altura, y adquirir mayor o menor intensidad, cuando se varía la amplitud de las oscilaciones que le producen. Tal es lo que sucede con una cuerda tensa, cuando se separa más o menos de su posición de equilibrio.

El *timbre* es la circunstancia a la cual se debe que dos distintos instrumentos produzcan un sonido de igual tono e intensidad, pudiéndose distinguir, perfectamente uno de otro. El sonido del oboe, por ejemplo, es muy distinto del de la flauta, y el de la trompa de el del fagot. También la voz humana posee un timbre muy diferente según los individuos, la edad y el sexo.

No es fácil explicar la causa del timbre. Esta cualidad depende, al parecer, no sólo de la materia de los instrumentos, sino también de su forma y de su modo de vibrar. Se cambia por completo el sonido de una trompeta de latón templado, si se recuece en un horno. Obsérvase también, que la trompeta recta tiene un sonido más chillón que la que es curva.

220. Unísono. -Se dice que están *al unísono* dos sonidos producidos por un mismo número de vibraciones por segundo, en cuyo caso son igualmente graves o agudos. Por ejemplo, la rueda de Savart y la sirena están al unísono cuando sus contadores indican un mismo número de vibraciones en tiempos iguales.

Siempre se puede tomar el unísono de un sonido musical, pero no el de un ruido. Poniendo la sirena al unísono con un cuerpo sonoro, es como se averigua el número de vibraciones de éste.

221. Escala musical, gama. -Dase el nombre de escala musical a una serie de sonidos separados entre sí por intervalos que tienen, al parecer, su origen, en la naturaleza de nuestra organización.

Como en esta serie se reproducen los sonidos en el mismo orden, por períodos de siete, cada período se designa con el nombre de *gama*, y los siete sonidos o *notas* de cada gama, por los nombres *do, re, mi, fa, sol, la, si*.

Se pueden representar por medio de números las notas de la gama. Al efecto, se toma para el *do* el *sonido fundamental* del sonómetro (212), es decir, el que produce la cuerda cuando vibra en toda su longitud. Haciendo variar en seguida la posición del caballete móvil B (fig. 140), un observador de oído ejercitado encuentra fácilmente la longitud que hay que dar sucesivamente a la parte vibrante AB, para obtener las otras seis notas. Representando por 1 la longitud de la cuerda que produce el *do*, se encuentra que las longitudes de las cuerdas que dan las demás notas, están representadas por las fracciones siguientes:

(A) Notas	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>
Longitudes relativas de las cuerdas	1	8/9	4/5	3/4	2/3	3/5	8/15

La cuerda que da el *re* no es, pues, más que los  $\frac{8}{9}$  de la que da el *do*; la del *mi* los  $\frac{4}{5}$  de la misma cuerda y así sucesivamente. Tales son los números que sirven para representar las notas de la gama según la longitud relativa de las cuerdas que las producen.

Si continúa moviéndose el caballete sobre el sonómetro, se ve que produce el octavo sonido la mitad de la cuerda que emitía el sonido fundamental. La misma serie de las relaciones ya indicadas se reproduce a partir de este sonido, obteniéndose así una nueva gama enteramente comparable con la primera, siendo la longitud de cuerda correspondiente a cada nota de esta segunda gama la mitad de la cuerda que corresponde a la nota del mismo nombre en la gama anterior, y así sucesivamente respecto a una tercera y a una cuarta gama.

Para obtener el número relativo de vibraciones correspondientes a cada nota, en un tiempo dado, basta invertir las fracciones del cuadro anterior; porque, en virtud de la primera ley de las vibraciones de las cuerdas (213), el número de vibraciones de una cuerda está en razón inversa de su longitud. Representado, pues, por 1 el número de vibraciones que emite el sonido fundamental *do*, se forma el cuadro siguiente:

(B) Notas	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>
Números relativos de vibraciones	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8

La gama, cuya relación entre las vibraciones acabamos de indicar, se llama *escala diatónica*; así como se denomina *escala cromática* la que procede por semitonos y se compone de 13 sonidos.

222. Número absoluto de vibraciones para cada nota. -La sirena nos ofrece un medio sencillo para deducir del cuadro anterior el número real de vibraciones que produce cada una de las notas de la escala musical. En efecto, si se la pone al unísono del *do* fundamental, indica su número exacto de vibraciones. No hay más que multiplicar, pues, este número por las relaciones  $\frac{9}{8}$ ,  $\frac{5}{4}$  del cuadro anterior, para tener el número de vibraciones de las demás notas.

Como el sonido fundamental tomado por *do* varía con la longitud de la cuerda del sonómetro, con su tensión y con su naturaleza, lo mismo le sucede al número de vibraciones correspondiente al *do*. Los números reales de vibraciones, calculados, según acabamos de decir, podrían representarse, pues, por medio de una infinidad de cifras, a las cuales correspondían otras tantas gamas diferentes.

Entre todas las gamas que pueden representarse así, se ha elegido la del *do* correspondiente al sonido más grave del contrabajo, conviniéndose, en física, en distinguir las notas de esta gama, dándoles el índice  $r$ , mientras que se da a las notas de las gamas más altas los índices  $2, 3, \dots$  y a las de los más graves, los índices  $-1, -2, \dots$  es decir, que se escribe  $do_1, re_1, do_{-1}, re_{-1}, \dots$

Sabido por experiencia que el número de vibraciones correspondiente al sonido más grave del contrabajo es 128, basta multiplicar este número por las relaciones inscritas en el cuadro B (221), para obtener el número absoluto de vibraciones de cada nota, resultando así el siguiente cuadro:

© Notas	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>
Números absolutos de vibraciones sencillas	128	144	160	170	192	214	240

Los números absolutos de vibraciones, para las gamas superiores, se obtiene multiplicando sucesivamente por 2, por 4, por 8... los números del cuadro C; y para las inferiores se dividen estos mismos números por 2, por 4... Por ejemplo, el número de vibraciones simples de  $sol_3$  es igual a  $192 \times 4$  o sea a 768 por segundo.

223. Longitud de las ondas. -Cuando se conoce el número de vibraciones simples que produce un cuerpo sonoro por segundo, fácilmente se deduce la longitud de las ondas. Sabemos, en efecto, que el sonido recorre 337 metros, o unos 1024 pies franceses por segundo. Luego si un cuerpo no efectúa más que una vibración simple por segundo, valdrá la longitud de la onda 1024 pies; si emite dos, sólo valdrá la mitad de 1024, y así sucesivamente. Ya hemos visto que al *do*, corresponden 128 vibraciones sencillas por segundo, por manera que la longitud de sus ondas es el cociente de 1024 pies por 128, es decir 8 pies.

La tabla siguiente indica la longitud de una onda correspondiente a la primera nota de las gamas sucesivas.

	Long. de la onda en pies.	Número de vibraciones.
$do_{-3}$	64	16
$do_{-2}$	32	32
$do_{-1}$	16	64

$do_1$	8	128
$do_2$	4	256
$do_3$	2	512
$do_4$	1	1024

224. Intervalos, sostenidos y bemoles. -Denomínase *intervalo* en música, la relación de un sonido a otro, es decir, el número que indica cuánto más alto es un sonido que otro. El intervalo de *do* a *re* se llama *segunda*; de *do* a *mi*, *tercera*; de *do* a *fa*, *cuarta*; de *do* a *sol*, *quinta*; de *do* a *la*, *sexta*; de *do* a *si*, *sétima*; y de *do* a *do*, *octava*. La tabla siguiente consigna los intervalos de las notas consecutivas, obtenidos, dividiendo el número de vibraciones de una nota cualquiera por el de vibraciones de la nota inmediatamente inferior:

(D) Notas	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>do</i>
Números relativos de las vibraciones	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
Intervalos		9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15

Vemos, pues, que los intervalos diferentes se reducen a tres que son  $\frac{9}{8}$ ,  $\frac{10}{9}$ ,  $\frac{16}{15}$ . El primero, que es el más considerable, se llama *tono mayor*; el segundo, *tono menor*, y el tercero, o sea el más pequeño, *semitono mayor*.

El intervalo entre el tono mayor y el menor es  $\frac{80}{81}$ . Es el intervalo más pequeño que se considera, y se le denomina *comma*, requiriéndose un oído muy ejercitado para apreciarle.

Los músicos intercalan entre las notas de la gama otras intermedias que se designan con los nombres de *sostenidos* y de *bemoles*. *Sostener* una nota, es aumentar el número de sus vibraciones en la razón de 24 a 25; y *bemolizarla* es disminuir este mismo número en la de 25 a 24. En música, el signo del sostenido es **#** y el del bemol **b**.

225. Acorde perfecto, disonancia. -Llámase acorde, en general, la coexistencia de muchos sonidos que producen en el oído una sensación agradable. Sólo hay acorde cuando los números de vibraciones de los sonidos simultáneos se hallan en una relación sencilla, pues si ésta es complicada, se afecta desagradablemente el oído, y se dice que hay *disonancia*. El acorde más sencillo es el unísono, siguiendo luego la octava, la quinta, la tercera, la cuarta y la sexta.

Dase el nombre de *acorde perfecto*, a tres sonidos simultáneos, tales que el tercero y el segundo formen una tercera mayor; el segundo y el tercero una tercera menor, el primero y el tercero una quinta; es decir, tres sonidos, tales que los números de vibraciones que les correspondan, estén entre sí como los números 4, 5, 6. Ejemplo: *do, mi, sol*; *sol, si, re*, forman dos acordes perfectos. Estos acordes son los que producen en el oído la sensación musical más grata.

226. Pulsaciones. -Cuando dos sonidos, que no están al unísono, se emiten simultáneamente, se oyen intervalos iguales un refuerzo del sonido que se denomina *pulsación* (*battement*). Supongamos, por ejemplo, que sean 30 y 31 el número de las vibraciones de los dos sonidos que se consideran; después de 30 vibraciones del primero o de 31 del segundo, habrá coincidencia, y por lo mismo, pulsación. Si las pulsaciones están bastante aproximadas para producir un sonido continuo, será éste evidentemente más grave que aquéllos de los cuales se deriva, pues proviene de una sola pulsación, siendo así que los demás dan 30 y 31.

227. Diapasón. -El *diapasón* es un pequeño instrumento por medio del cual se reproduce, según se desee, una nota invariable, por lo cual es muy propio para regular los instrumentos de música. Consta de una barra de acero encorvada sobre sí misma en forma de pinzas (fig. 148), que se hace vibrar, bien sea pasando un arco por sus bordes, o separando bruscamente sus dos ramas por medio de un cilindro de hierro que forzosamente se hace pasar entre ellas, conforme lo indica la figura. Las dos ramas o lengüetas, así separadas de su posición de equilibrio, la recobran vibrando y produciendo un sonido constante para

cada diapasón. Se refuerza el sonido de este aparato fijándole en una caja de madera abierta por una de sus extremidades.

Hace algunos años que se había notado, que el diapasón se iba elevando cada vez más, en los grandes teatros de Europa; pero como no acontecía lo propio en París, Viena, Berlín, Milán, etc., se originaban graves inconvenientes para el arte musical, así como para los compositores y los artistas, lo cual ha sido causa de que se haya instituido recientemente en Francia una comisión para establecer, cuando menos en dicho país, un diapasón musical uniforme, fijando, digámoslo así, un patrón que sirviese de tipo invariable. La mencionada comisión ha aceptado un *diapasón normal*, obligatorio para todos los establecimientos musicales de Francia, desde el 1.º de diciembre de 1859, y cuyo patrón que se conserva en el Conservatorio de música de París, efectúa 870 vibraciones por segundo, o sea la nota  $la_3$ , sonido que emite la tercera cuerda del violín.

▽△

## Capítulo IV

▽△

### Vibración del aire en los tubos sonoros

228. Tubos sonoros. -Denominanse *tubos sonoros* unos tubos en los que se producen sonidos, haciendo vibrar la columna de aire que contienen. También se designan estos tubos con el nombre de *instrumentos de viento*. En los diversos aparatos descritos hasta ahora, resulta el sonido de las vibraciones de cuerpos sólidos, siendo tan sólo el aire su vehículo; pero en los instrumentos de viento, cuando tienen los tubos suficientemente resistentes sus paredes, el cuerpo sonoro es tan sólo la columna de aire encerrada en dichos tubos. Compruébase, en efecto, que la naturaleza de los tubos no ejerce la menor influencia en el sonido, el cual no varía, en igualdad de dimensiones, aunque sean de madera, de cristal o de metal, los tubos, modificándose únicamente el timbre.

En cuanto al medio de hacer vibrar el aire en los tubos, podemos dividir los instrumentos de viento, en instrumentos de *boca* y de *lengüeta*.

229. Instrumentos de boca. -En los instrumentos de boca son fijas todas las partes de la embocadura. La [figura 150](#) representa la de un tubo de órgano, y la [149](#) la del silbato o caramillo. En las dos figuras se llama *luz* la abertura *i* que sirve para dar entrada al aire, y *bo* es la *boca*, cuyo *labio* superior se halla cortado a bisel. En la parte superior de ambos grabados se ve el tubo que puede estar abierto o cerrado. En la [figura 150](#), el pie P sirve para fijar el tubo en un fuelle acústico ([fig. 147](#)).

Cuando llega por la luz una rápida corriente de aire, tropieza en el labio superior, resultando de aquí un choque que es causa de que el aire no salga de un modo continuo por la boca *bo*, sino por intermitencias. Prodúcese, pues, pulsaciones que, transmitiéndose al aire del tubo, le hacen vibrar y producir un sonido. Para que éste sea puro, debe establecerse cierta relación entre las dimensiones de los labios, la abertura de la boca y la magnitud de la luz. Por último, ha de ser muy largo el tubo relativamente a su diámetro. El número de vibraciones depende en general de las dimensiones del tubo y de la velocidad de la corriente de aire.

En la flauta travesera, consiste la boca en una simple abertura lateral y circular; y, merced a la disposición que se da a los labios, se quiebra la corriente de aire contra los bordes de dicha abertura, sucediendo otro tanto en la flauta de Pan, y en una llave horadada con la cual se silba.

230. Instrumentos de lengüeta. -En los instrumentos de boquilla, una simple laminita elástica de metal o de madera pone en vibración al aire, advirtiendo que la corriente de éste es la que comunica el movimiento a aquélla. Estas especies de boquillas se encuentran en los oboes, los fagots, el clarinete, la

trompeta de los niños y en la trompa, que es el instrumento más sencillo de esta especie. Algunos tubos de órganos son simplemente de boca ([fig. 150](#)), y otros de lengüeta.

La [figura 151](#) representa uno de estos últimos, con la disposición que se les da para la demostración en las cátedras. Se halla montada sobre el depósito de aire Q, y un vidrio o cristal E, engastado en las paredes del tubo hace visibles las vibraciones de la lengüeta. Una corneta de madera H sirve para reforzar el sonido.

El [grabado 152](#) representa la lengüeta fuera de su cañón, pudiendo verse así, que consta de las cuatro piezas siguientes: 1.<sup>a</sup> de un tubo rectangular de madera, cerrado en su parte inferior y abierto por la superior en *o*; 2.<sup>a</sup> de una placa de cobre *cc* con una abertura longitudinal que se llama *canilla*, y que sirve para dar paso al aire hasta el orificio *o*; 3.<sup>a</sup> de una lámina elástica *i*, denominada *lengüeta*, y que cuando está fija, enrasa con los bordes de la canilla, como que casi la cierra; y 4.<sup>a</sup> de un alambre *r*, encorvado en su parte inferior, por la que oprime a la lengüeta. Este alambre, que se denomina *el muelle*, puede bajar más o menos, para regular todos los movimientos de la lengüeta y determinar la altura del sonido que desea producirse. Este alambre permite templar perfectamente los tubos de lengüeta, porque al ser repelida ésta en el tubo MN por la entrada de una corriente de aire por el pie P, se encuentra comprimida la lengüeta, se encorva de fuera hacia adentro y da paso al aire que se escapa por el orificio *o*; pero, al recobrar su primitiva posición la lengüeta, en virtud de su elasticidad, forma una serie de oscilaciones que abren y cierran sucesivamente la canilla, de manera que, pasa y se interrumpe por intermitencias la corriente de aire, resultando de aquí ondas sonoras producen un sonido que aumenta con la velocidad del aire.

La lengüeta que acabamos de describir oscila alternativamente hacia adelante y hacia atrás sin batir los bordes de la canilla, por lo cual se llama *lengüeta libre*. Pero también se construyen *lengüetas batientes*, las cuales no pueden oscilar más que hacia un lado. Esta clase de lengüeta se ha representado en la [figura 153](#), la cual manifiesta una embocadura de clarinete, en la que no existe alambre para regular la oscilación de la lengüeta, consiguiéndose este efecto por la presión de los labios. Lo mismo sucede para las embocaduras del fagot y del oboe.

231 Leyes de las vibraciones del aire en tubos cerrados por un extremo. -El caso más simple de los tubos sonoros es el de los que se hallan cerrados por un extremo; por ejemplo, la flauta de Pan, o cuando se sopla en una llave horadada. La columna de aire puede entonces vibrar entera, o dividirse espontáneamente en partes iguales que vibran separadamente y al unísono. Las superficies de separación de las masas de aire así formadas sólo experimentan cambios de compresión y son sensiblemente inmóviles; por ser así se denominan *nodos de vibración*. Por el contrario, los medios de las columnas de aire comprendidas entre dos nodos consecutivos tienen siempre la misma compresión, pero experimentan las mayores oscilaciones, y reciben el nombre de *vientres de vibración*.

Daniel Bernoulli, célebre geómetra no murió en 1782, fue el primero que dio a conocer las siguientes leyes sobre los sonidos producidos por los tubos sonoros:

1.<sup>a</sup> Un tubo cerrado por un extremo y provisto de una lengüeta en el otro, estando fijo sobre la tabla de un fuelle, produce sonidos cada vez más agudos a medida que se esfuerza el aire; y si se representa por 1 el sonido más grave o el sonido fundamental, se observa que el tubo produce sucesivamente los sonidos 1, 3, 5, 7, 9..., representados por la serie de los números impares.

2.<sup>a</sup> Para tubos desiguales, los sonidos del mismo orden corresponden a números de vibraciones que están en razón inversa de las longitudes de los tubos.

3.<sup>a</sup> Las vibraciones del aire, en los tubos, son longitudinales, y la columna de aire vibrante se halla dividida en partes iguales por nodos y vientres, existiendo siempre un nodo en el fondo de los tubos, y un vientre en la boca.

4. Los nodos, o la superficie de separación de las partes vibrantes, son inmóviles y no sufren cambios de densidad, mientras que los vientres, o las mitades de los partes vibrantes, conservan la misma densidad, pero se hallan constantemente en vibración.

5.<sup>a</sup> En el caso de un solo nodo, produce el tubo el sonido fundamental, y la longitud de la onda es igual a dos veces la del tubo.

En el caso de un solo nodo, éste se encuentra siempre en el fondo del tubo, y entonces hay un vientre en la boca. La [figura 154](#) manifiesta por la dirección de las flechas, en qué sentido se propagan sucesivamente las ondulaciones del aire en el tubo, cuando en aquél no hay más que un nodo. Del mismo modo, la [figura 155](#) muestra la dirección alternada según la cual marcha el aire en cada vibración, cuando existen dos nodos. Uno de los nodos está entonces en el fondo del tubo y el otro al primer tercio, contando desde la extremidad abierta. La distancia de los dos nodos, es decir, la longitud de la onda, es, pues, los dos tercios de la longitud del tubo; siendo, por consiguiente, tres veces menor que la onda que se produce en el caso de un solo nodo, y como en este caso era el sonido 1, será 3 cuando haya dos. De igual manera se ve que, contándose 3, 4, 5 nodos, será el sonido 5, 7, 9, resultado que comprueba lo que más arriba expusimos.

232. Leyes de las vibraciones del aire en los tubos abiertos por sus dos extremidades. -Las leyes de los tubos abiertos por sus dos extremidades, sólo difieren de las anteriores, en que los *sonidos producidos por un mismo tubo están representados sucesivamente por la serie natural de los números 1, 2, 3, 4, 5, 6...*, y en que las extremidades de los tubos son siempre vientres.

Además, *el sonido fundamental de un tubo abierto por sus dos extremidades, es siempre la octava aguda del mismo sonido, en un tubo abierto por una sola.*

Si no hay más que un nodo, se encuentra en el centro, comprendiendo cada mitad del tubo una semi-onda sonora. Si existen dos nodos, se les observa en el primer cuarto a partir de cada extremidad. Si hay tres nodos, se sitúan en el primero, tercero, y sexto; pero en todos los casos siempre hay un vientre en la embocadura, y otro en la extremidad opuesta. En esta distribución de los vientres está fundado el uso de los orificios que se practican en las paredes de los instrumentos de viento, como la flauta y el clarinete. En presencia de un vientre no produce ningún efecto el orificio, y no modifica el sonido en manera alguna, mientras que delante de un nodo, cambia al momento el sonido, trasformando el nodo en vientre, y haciendo variar así la longitud de la columna de aire vibrante.

Para reconocer la existencia de los nodos en los tubos sonoros, se introduce en ellos un émbolo móvil, y se observa, introduciéndole a profundidades diferentes, que el sonido no experimenta alteración siempre que el émbolo corresponde a una superficie nodal.

Todavía se puede reconocer la existencia de los nodos y vientres haciendo resonar un tubo rectangular horizontal, cuyas paredes tengan poco espesor. Estas paredes entran entonces en vibración con la columna de aire interior, y si se las recubre de arena, se ve que ésta abandona las partes donde existen los vientres para colocarse donde están los nodos.

Las diferentes leyes que acabamos de exponer sobre las vibraciones del aire en los tubos sonoros, se conocen con el nombre de *leyes de Bernoulli*; pero no pueden comprobarse exactamente por la experiencia. Si los tubos son de boca o de lengüeta, se obtienen sonidos más graves que los que indica la teoría. Para que estas leyes estuviesen acordes con la experiencia, serían necesarios unos tubos cuya sección fuese infinitamente pequeña con relación a su longitud, y el aire debería ponerse directamente en vibración por todo el contorno del tubo, y no por un solo lado, como se efectúa comúnmente.

▽△

## Capítulo V

▽△

### Vibración de las varillas, de las placas y de las membranas

233. Vibración de las varillas y de las láminas. -Las varillas y las láminas delgadas de madera, de vidrio, de metal, y sobre todo las de acero templado, vibran en virtud de su elasticidad, y presentan, como las cuerdas, dos especies de vibraciones, transversales unas y longitudinales otras. Originanse las primeras, fijando las varillas o las láminas por un extremo, y pasando un arco por su parte libre. Producense las vibraciones longitudinales en una varilla, fijándola por uno de sus puntos, y frotándola en el sentido de su longitud, con un pedazo de tela mojada o espolvoreada con colofonia. Con todo, en este último caso no se obtiene un sonido, sino en el supuesto de que el punto fijo de la varilla sea su mitad, su tercio, o su cuarto, o bien en una palabra, una parte alicuota.

Se demuestra, por medio del cálculo, *que el número de vibraciones transversales de las varillas y de las láminas o placas de igual naturaleza, está en razón directa de su espesor, e inversa del cuadrado de su longitud.* El ancho de las placas no influye en el número de vibraciones que puedan producir, sólo se limita simplemente, a modificar la fuerza necesaria para vibrarlas.

En las varillas elásticas de igual naturaleza, *el número de vibraciones longitudinales está en razón inversa de su longitud, sean cuales fueren su diámetro y la forma de su sección trasversal.*

La [fig. 156](#) representa un instrumento fundado en las vibraciones longitudinales de las varillas. Este instrumento, construido por M. Marloye, consiste en un zócalo macizo, de madera, con unas veinte varillas cilíndricas de abeto, coloradas unas y blancas otras. Sus longitudes están determinadas de manera que las blancas producen la gama diatónica, mientras que las coloradas originan los semi-tonos que completan esta gama y la hacen cromática. Para tocar una piececita con dicho instrumento, se frota las varillas en el sentido de su longitud entre el pulgar y el índice, previamente impregnados con resina en polvo. Los sonidos que así se obtienen son muy semejantes a los de la flauta de Pan.

234. Vibraciones de las placas. -Cuando se quiere hacer vibrar una placa, se la asegura por su centro ([fig. 157](#)), y se la agita en sus bordes por medio de un arco; o bien se la sostiene por un punto cualquiera de su superficie, y se la conmueve en su centro, que posee una abertura, en la cual se determina un rozamiento, valiéndose de crines dadas de colofonia ([fig. 158](#)).

Las placas que se hacen vibrar presentan líneas nodales (214), que varían por su número y su posición, según sea la forma de las placas, su elasticidad, el medio de conmoción y el número de vibraciones. Se hacen visibles las líneas nodales cubriendo las placas con una ligera capa de arena antes de hacerlas vibrar. Luego que principian las vibraciones, abandona la arena las partes vibrantes, y va a depositarse en las líneas nodales, según indican las [fig. 157](#) y [158](#).

Determinase, por decirlo así, según se desee, la posición de las líneas nodales, tocando las partes en que se quiere que se produzcan. El número de estas líneas es generalmente tanto más considerable, cuanto mayor es el número de vibraciones, es decir, cuanto más agudo es el sonido que producen las placas. Las líneas nodales presentan siempre una gran simetría de forma, reproduciéndose idénticamente para una misma placa, agitada en las mismas condiciones. Chladni fue el primero que dio a conocer el fenómeno de las líneas nodales en las placas.

Las vibraciones de las placas se hallan sometidas a las leyes siguientes: *Para placas de igual naturaleza, de la misma forma y que den las mismas figuras, el número de las vibraciones está en razón directa del espesor de estas placas e inversa de sus superficies.*

235. Vibraciones de las membranas. -La flexibilidad de las membranas no les permite vibrar, a no ser que estén tensas como la piel de un tambor; en este caso producen un sonido tanto más agudo, cuanto menores son sus dimensiones y mayor su tensión. Con el fin de obtener membranas vibrantes, pegaba Savart, en marcos de madera, binza muy flexible.

Las membranas pueden vibrar por percusión, como en el tambor, o por influencia. En efecto, observó Savart que puede vibrar una membrana por la influencia de las vibraciones del aire, sea cual fuere el número de éstas, siempre que sean suficientemente intensas. La [figura 159](#) representa una membrana vibrante bajo el influjo de las vibraciones que imprime el aire a un hemisferio sonoro; y una capa de arena fina, dispuesta sobre la misma, demuestra la formación de los vientres y de los nodos, de igual manera que en las placas.

## Capítulo VI

### Métodos gráficos para el estudio de los movimientos vibratorios

236. Método de M. Lissajous para hacer aparentes las vibraciones. -Al estudiar las vibraciones de las placas y de las membranas, acabamos de ver cómo se hacen visibles sus movimientos vibratorios proyectando sobre las mismas, polvos de arena fina; pero recientemente M. Lissajous ha aceptado otro método que no sólo patentiza el movimiento vibratorio de los cuerpos sonoros, bien directamente o por su proyección sobre una pantalla, sino que permite al mismo tiempo comparar, sin la ayuda del oído, los movimientos vibratorios de dos cuerpos sonoros, de suerte que pueda reconocerse la relación exacta de las vibraciones que efectúan al mismo tiempo.

El método al cual nos contraemos, fundado en la persistencia de las sensaciones visuales sobre la retina, consiste en fijar sobre el cuerpo que vibra, un pequeño espejo metálico que vibre con él y que imprima a un haz luminoso un movimiento vibratorio, semejante al que anima al cuerpo.

El físico M. Lissajous opera con diapasones, y para lograr que sea visible el movimiento de estos aparatos, fija en una de sus ramas un pequeño espejo metálico  $m$  ([fig. 160](#)), y en la otra un contrapeso  $n$ , indispensable para lograr que el diapason vibre por mucho tiempo y de una manera regular. A algunos metros de distancia existe una lámpara, cubierta por una pantalla opaca en la cual se ha practicado un pequeño orificio, que proyecta un simple punto luminoso. Sentado esto, y cuando el diapason permanece en reposo, se sitúa el ojo del observador de manera que se vea la imagen, del punto luminoso en  $o$ , y después de hacer vibrar el diapason, se nota al momento que se prolonga la imagen en el sentido de la longitud de las ramas de aquel instrumento, proyectando una imagen persistente  $oi$  que disminuye de magnitud, al mismo tiempo que decrece la amplitud de las oscilaciones. Si al movimiento oscilatorio que posee el espejo, se le agrega un movimiento de rotación, haciendo girar el diapason alrededor de su eje; en este caso en lugar de una imagen rectilínea  $io$ , se produce una sinuosa  $oix$ . Se explican estos diferentes efectos, por los cambios sucesivos de posición que imprimen al haz luminoso reflejado, las vibraciones del espejo, y por la duración en el de la sensación luminosa después que ha cesado la causa que la ha originado; fenómeno que volverá a ocuparnos, al tratar de la visión.

Si en lugar de observar directamente los efectos que acabamos de describir, se quiere que sean visibles por su proyección sobre una pantalla, se dispone el experimento según indica la [figura 161](#). El haz reflejado sobre el espejo que vibra, vuelve a reflejarse segunda vez sobre un espejo fijo  $m$ , que lo proyecta sobre una lente acromática  $l$ , situada de suerte que forme distintamente sobre una pantalla, las mismas imágenes que se han notado directamente en el experimento a que se refiere la [figura 160](#).

237. Composición óptica de dos movimientos vibratorios, de igual dirección. -Después de lograr que sean visibles las vibraciones de los cuerpos sonoros, dando un brillo intenso a uno de los puntos del cuerpo vibrante, el físico M. Lissajous ha resuelto igualmente el problema de la composición óptica de dos movimientos vibratorios de igual dirección en un principio, y después, según una dirección rectangular: en estos problemas ha conseguido el físico eminente, al cual nos referimos, efectuar un estudio óptico de las cuestiones acústicas, lo más completo y laborioso que puede imaginarse.

Para comparar dos movimientos vibratorios y paralelos, se dispone el experimento como indica la [figura 162](#). Dos diapasones provistos de espejos, se sitúan uno enfrente de otro, y la luz, reflejada sobre uno del los espejos, se proyecta sobre el otro, que es sensiblemente paralelo al primero, proyectándose por último hacia una pantalla, después de haber cruzado una lente convergente.

Dispuestos así los aparatos, si sólo se hace vibrar en un principio el primer diapason, se prolonga la imagen, según hemos visto en el experimento de la [figura 160](#); pero si se hacen vibrar los dos,

suponiéndolos perfectamente unísonos, aumenta o disminuye la prolongación, según exista acorde o disonancia entre los movimientos simultáneos impresos, a la imagen por las vibraciones de los espejos.

Si los dos diapasones pasan al mismo tiempo y según el mismo sentido por su forma de equilibrio la imagen alcanza su magnitud máxima; por el contrario, si pasan por dicha forma, pero en sentido contrario, se presenta según su magnitud mínima. Entre estos dos límites, la amplitud de la imagen varía con el período de tiempo, más o menos prolongado, que transcurre entre los momentos exactos en que los dos diapasones pasan por su forma de equilibrio. La relación entre este tiempo y la duración de una vibración doble, ha recibido de M. Lissajous, la denominación de *diferencia de faz*.

Cuando existe acorde riguroso entre los diapasones, la traza luminosa proyectada sobre la pantalla, sólo experimenta una disminución progresiva en su longitud, a medida que decrece la amplitud de las vibraciones; pero si el acorde no es tan perfecto, la magnitud de la imagen varía periódicamente, y mientras que el oído nota las pulsaciones (226) que origina la falta de acorde, distingue la vista distintamente las pulsaciones concomitantes de la imagen.

238. Composición óptica de dos movimientos vibratorios rectangulares. -La composición óptica de dos movimientos vibratorios rectangulares, se efectúa según indica la [fig. 163](#), es decir, por medio de dos diapasones, uno horizontal y otro vertical, ambos provistos de los espejos que hemos indicado en los experimentos anteriores. Si al principio sólo se hace vibrar el horizontal, se presenta sobre la pantalla una traza luminosa horizontal, y si lo efectúa el segundo aisladamente, la imagen es vertical; pero si vibran de consuno los dos diapasones, se combinan sus dos movimientos, y el haz reflejado describe sobre la pantalla una curva más o menos complicada, cuya forma depende de la relación que medie entre los números de vibraciones efectuadas en el mismo tiempo por los dos diapasones; de esta suerte se obtienen preciosas indicaciones para comparar el número de las vibraciones de los dos cuerpos sonoros.

La [figura 164](#) representa las formas diferentes que ofrece la proyección luminosa sobre la pantalla, cuando actúan al unísono los dos diapasones, es decir, cuando son entre sí el número de vibraciones, como 1 es a 1.

Las fracciones situadas debajo de cada una de las curvas, indican las diferencias de las fases que corresponden a cada una de ellas. La diferencia de la fase es la que determina la forma inicial de la curva; ésta conserva exactamente la misma forma cuando entre los diapasones existe acorde, pero siempre con la condición de que las amplitudes de las dos vibraciones rectangulares disminuyan en la misma relación.

Si entre los diapasones no existe acorde riguroso, la diferencia inicial de la fase no es constante, y la curva acepta una variedad de formas: al parecer oscila sobre sí propia, con tanta mayor rapidez, cuanto más difiere el acorde de los diapasones.

La [figura 165](#) indica los diferentes aspectos que ofrece la imagen luminosa cuando los diapasones se arreglan a la octava, es decir, cuando el número de sus vibraciones son entre sí como 1 es a 2; y la [figura 166](#) nos da a conocer la serie de las curvas que se obtienen cuando los números de las vibraciones son entre sí, como 3 es a 4.

Vemos, pues, que las curvas son tanto más complicadas a medida que los dos términos de la relación de los números de las vibraciones adquieren un valor más elevado. Por lo que concierne al examen teórico de estas curvas y a los fenómenos que representan, convertimos la atención de los lectores hacia la erudita memoria que publicó el físico M. Lissajous (*Anales de física y química*, año de 1857), en la cual se encontrará el trazado geométrico de las curvas de las vibraciones, y el cálculo de su ecuación general.

En las diferentes experiencias que acabamos de describir hemos supuesto, que únicamente se aceptaba como germen de la luz, una lámpara común: empleando la luz eléctrica, como por ejemplo, el aparato foto-eléctrico de M. Duboscq, los mencionados fenómenos adquieren un brillo notable, y debe ciertamente, a este concurso de la luz eléctrica, la física, una serie de bellas experiencias para el estudio de los fenómenos acústicos, que le permiten trazar con líneas de fuego, digámoslo así, curvas que caracterizan distintamente las vibraciones transversales, longitudinales o giratorias, el acorde, la octava, el tercio, el cuarto, el quinto, las disonancias, las pulsaciones, los sonidos producidos, etc., etc.

239. Fonautógrafo de M. Leon Scott. -Los señores Duhamel y Wertheim ya habían empleado un método gráfico para medir el número de vibraciones de los cuerpos sonoros, fijando sobre éstos un hilo metálico que al vibrar con ellos, trazaba sobre un cilindro giratorio, cubierto de negro de humo, las mismas vibraciones de los cuerpos, dando a conocer su número durante una revolución del cilindro. Pero este método no podía consignar las vibraciones de los tubos sonoros, del canto, o de un ruido cualquiera, como por ejemplo, el del estampido del cañón.

Felizmente M. Leon Scott ha generalizado y perfeccionado el método gráfico por medio de un aparato que denomina *fonautógrafo*, para expresar que los sonidos se consignan por sí propios. Este aparato, construido por Koenig, fabricante de instrumentos acústicos en París, consta de un elipsoide hueco AB ([fig. 167](#)) que cuenta aproximadamente 10 centímetros de longitud y 30 en su diámetro mayor. Como este aparato reconoce por objeto, el conducir y concentrar las ondas sonoras, debe construirse dicho elipsoide de una sustancia poco vibrante, porque si no amortiguaría notablemente el sonido, por cuya razón el Sr. Koenig lo construye de yeso. Su extremidad A se halla abierta, y la otra cerrada por una tapa sólida a cuyo centro se adapta un tubo acodillado de cobre *a*, y que termina un anillo sobre el cual se encuentra fija una membrana flexible animal, o bien de cautchouc muy delgado. Un segundo anillo, que por medio de una rosca puede apretarse más o menos sobre el primero, sirve para mantener la rigidez de la membrana, que además no vibra al unísono, sino en el caso de hallarse algo tensa. El tubo *a* puede girar sobre un eje, de suerte que acepte la membrana todas las inclinaciones que pueden desearse. Sobre esta última, y próxima a su centro, se encuentra fija con lacre una aguja muy delgada que participa de todos los movimientos de la membrana. A fin de que esta aguja no corresponda a un nodo de la vibración, ha dispuesto M. Scott, sobre el anillo que determina la tensión de la membrana, una pieza móvil *i*, que denomina *subdivisor*, y que al tocarla según se quiera en un punto u otro, según la voluntad del que actúe con el instrumento, modifica la posición de los nodos, de suerte que corresponde la aguja a un vientre, vibrando por lo tanto con la membrana. Vemos, por consiguiente, que construido según acabamos de indicar el fonautógrafo, ofrece una gran analogía con el órgano del oído, correspondiendo el elipsoide al canal auditivo, la membrana al tímpano, y el subdivisor, a los huesecillos de la oreja interna.

De lo que hemos expuesto se deduce, que siempre que surja cerca del aparato un sonido, el aire contenido en el elipsoide, la membrana y la aguja, vibrarán al unísono, quedando tan sólo por trazar y fijar sobre una superficie sensible las vibraciones de la aguja. A este fin, en la parte anterior de la membrana se sitúa un cilindro de cobre C, que por medio de un manubrio *m*, gira alrededor de un eje horizontal; además de este movimiento el cilindro avanza al girar en el sentido de su eje, para lo cual cuenta este con una rosca ajustada en una tuerca. Se cubre la superficie del cilindro con una hoja de papel, sobre la cual se depone una ligera capa de negro de humo, poniendo en acción en su parte inferior, mientras gira, una lámpara en la cual arde un líquido fuliginoso.

Dispuesto de esta suerte el aparato, se pone en contacto la superficie dada de negro de humo con la aguja y se imprime al cilindro un movimiento de rotación más o menos rápido. Mientras que no surge ningún sonido, permanece en reposo la aguja, y por efecto de su roce, lo único que hace, es desprender del papel la capa de negro de humo, descubriendo la superficie del papel sobre la cual traza una hélice; pero desde el momento que surge un sonido cualquiera, la membrana y la aguja vibran al unísono, y el trazo de aquélla sobre el papel deja de ser rectilíneo, para convertirse en ondulado, correspondiendo cada una de sus oscilaciones a una vibración doble de la aguja; de suerte que las figuras que así se obtienen, marcan con exactitud el número, la amplitud y el isocronismo de las vibraciones. Estas figuras aumentan de magnitud, cuando el sonido es intenso; son microscópicas, si es aquél muy débil; se presentan separadas, cuando es grave, y muy aproximadas, si es agudo el sonido; son finalmente de un dibujo regular y desembarazado, si el timbre es puro; desiguales y como temblonas, si es malo o sordo. A pesar de esto, ¿son estas curvas el trazado simple de las vibraciones de la membrana? ¿No expresan antes el movimiento que resulta del de la membrana y del que acepta la aguja en el sentido lateral?

La [figura 168](#) ofrece el trazado de un tono simple de canto, reforzado por su octava superior, representado por la curva de amplitud mínima.

La [figura 169](#), indica el sonido de dos tubos sonoros a la octava.

La [figura 170](#) representa en su línea inferior, los sonidos que se emiten al tartamudear la letra R, y la [figura 171](#), también respecto a su línea inferior, corresponde al ruido que emite una plancha de hoja de lata al golpearse con el dedo.

Por lo que hace a las líneas superiores de las [figuras 170](#) y [171](#), son idénticas, y representan las vibraciones perfectamente isócronas, trazadas por un diapasón situado cerca del elipsoide. Este diapasón, en una de cuyas ramas existía una aguja muy delgada, efectuaba 500 vibraciones dobles por segundo; de suerte que cada una de las ondulaciones de la línea sinuosa superior corresponde a  $\frac{1}{500}$  de segundo. De este hecho se deduce que la curva sinuosa trazada por el diapasón, viene a ser un cronómetro que mide con grande exactitud, intervalos de tiempo sumamente pequeño. Por ejemplo, en la figura 170, cada uno de los choques aislados, produciendo la articulación del tartamudeo de la letra R, corresponde a 18 vibraciones dobles del diapasón, y por consiguiente, a una duración de  $\frac{18}{500}$  de segundo, o sea aproximadamente  $\frac{1}{28}$ .

Trazadas ya las diversas curvas, sólo resta fijarlas sobre el papel preparado con negro de humo: para conseguirlo, M. Scott baña los papeles que contienen las indicaciones, primero en un baño de alcohol puro, y después, en un segundo baño de alcohol, que mantenga en disolución una resina, como por ejemplo, la sandaraca: después de estos procedimientos, el negro de humo se encuentra perfectamente fijado.

## Libro sexto

Del calórico

▽△

### Capítulo primero

▽△

#### Nociones preliminares: termómetros

240. Calórico; hipótesis acerca de su naturaleza. -Se da el nombre de *calórico* al agente que causa en nosotros la sensación del calor; pero este agente obra también sobre los cuerpos inertes, pues es el que funde al hielo, hace hervir al agua y enrojece al hierro.

Muchísimas son las opiniones que se han emitido acerca del origen del calor; pero dos son las únicas que reinan actualmente en la ciencia: *el sistema de la emisión y el de las ondulaciones*.

En el primero se admite que la causa del calor es un fluido material e imponderable, que puede pasar de un punto a otro, y cuyas moléculas se hallan en un estado continuo de repulsión. Este fluido existiría en todos los cuerpos en estado de combinación con las últimas partículas, oponiéndose a su contacto inmediato.

En el sistema de las ondulaciones se supone, que depende el calor de un movimiento vibratorio de las moléculas de los cuerpos calientes, un movimiento que se trasmite a las moléculas de los demás cuerpos por el intermedio de un fluido eminentemente sutil y elástico, llamado *éter*, y en el cual se propaga a la manera que las ondas sonoras en el aire. Los cuerpos más calientes son, en tal caso, aquéllos cuyas vibraciones tienen mayor amplitud y mayor rapidez, de suerte que la intensidad del calor no vendría a ser otra cosa más, que la resultante de las vibraciones de las moléculas. En la primera hipótesis pierden calórico las moléculas de los cuerpos que se enfrían, y en la segunda sólo pierden movimiento.

La teoría de las ondulaciones parece la única admisible, atendidos los progresos de la física moderna; pero con todo, como la de la emisión si simplifica las demostraciones, se la prefiere, en general, para la explicación de los fenómenos del calor.

241. Efectos generales del calórico. -La acción general del calórico sobre los cuerpos consiste en desarrollar entre sus moléculas una fuerza repulsiva que lucha sin cesar contra la atracción molecular; resultando de aquí que, por la influencia de este agente, tienden los cuerpos a *dilatarse* primero, es decir, a adquirir mayor volumen, y a *cambiar de estado* en seguida, esto es, a pasar de sólidos a líquidos, y de líquidos al de fluidos aeriformes.

Todos los cuerpos se dilatan por efecto del calórico, siendo los más dilatables los gases, luego los líquidos, y por último, los sólidos. En estos últimos se distinguen la *dilatación lineal*, según una sola dimensión y la *cúbica* o en volumen; si bien, a decir verdad, jamás tiene lugar la una sin que también se ve verifique la otra. En los líquidos y gases sólo se consideran las dilataciones respecto al volumen.

Para demostrar la dilatación lineal de los metales se emplea un aparato ([fig. 172](#)) que consta de una barra metálica A fija por uno de sus extremos mediante un tornillo de presión B; encontrándose el otro que se halla libre, en contacto con el brazo menor de una aguja K, móvil sobre un cuadrante. Debajo de la barra existe un depósito cilíndrico, en el que se quema alcohol. La aguja K marca en un principio el punto cero, pero a medida que se calienta la barra A, asciende aquélla, patentizando así la prolongación de la barra.

La dilatación cúbica de los sólidos se demuestra por medio del *anillo de S'Gravesande*, denominándose así un pequeño anillo metálico *m* ([figura 173](#)), por el cual pasa libremente, a la temperatura ordinaria, una esferita de cobre *a*, que tiene casi el mismo diámetro; pero luego que se la calienta a la llama de una lámpara de alcohol, no puede pasar ya al través del anillo, quedando demostrado de esta suerte el aumento de volumen.

Para cerciorarse de la dilatación de los líquidos, se suelda a un globo de vidrio un tubo capilar, y llenando aquél y parte de éste de un líquido cualquiera, se nota que al calentarle sube el líquido en el tubo. La dilatación que así se observa, es siempre mucho mayor que en los sólidos.

El mismo aparato puede utilizarse para demostrar la dilatación de los gases. Al efecto se llena el globo de aire o de cualquier otro gas, y se introduce en el tubo un índice de mercurio de dos o tres centímetros de longitud. Cuando se calienta el globo, o al aproximar simplemente la mano, es repelido el índice hacia la extremidad del tubo, lista que por fin es expulsado. Esto nos prueba claramente que los gases son muy dilatables, aun bajo la influencia de un débil aumento de calor.

En los experimentos que hemos descrito, luego que se enfrían los cuerpos, se contraen y recobran exactamente su volumen primitivo, cuando el calórico llega a adquirir su primera intensidad.

## Medida de las temperaturas

242. Temperatura. -La temperatura de un cuerpo es el estado actual de su calórico sensible, sin aumento ni disminución. Si la cantidad de calor sensible aumenta o disminuye, se dice que sube o baja la temperatura.

243. Termómetros. -Los *termómetros* son unos instrumentos que sirven para medir las temperaturas y apreciar sus variaciones.

La imperfección de nuestros sentidos no nos permite medir la temperatura de los cuerpos, por las sensaciones más o menos vivas de calor o de frío que en nosotros causan, y por lo tanto ha sido preciso recurrir a los efectos físicos que produce el calórico en los cuerpos. Pero como son muy variados estos efectos, se ha dado la preferencia a las dilataciones y a las contracciones, porque son las más fáciles de observar. Pero el calor da origen también, en los cuerpos, a fenómenos eléctricos, por medio de los cuales se pueden medir las temperaturas. A su tiempo describiremos un termómetro sumamente sensible fundado en este principio.

De todos los cuerpos, los líquidos son los que merecen la preferencia para la construcción del termómetro, porque los sólidos se dilatan poco, y los gases demasiado. Los líquidos exclusivamente adoptados son el mercurio y el alcohol, pues el primero no entra en ebullición hasta una temperatura muy elevada, y el segundo no se solidifica por los mayores fríos conocidos.

La invención de los termómetros data de fines del siglo XVI, atribuyéndose por unos a Galileo, por otros a Drebbel, médico holandés, o bien a Santorius, médico veneciano.

El termómetro de mercurio es el más vulgarizado. Compónese de un tubo capilar de vidrio o de cristal, soldado a un receptáculo cilíndrico o esférico de la propia sustancia: tanto éste como parte del tubo están llenos de mercurio, y una escala graduada da a conocer la dilatación del líquido.

Además de la soldadura del tubo con el receptáculo, que se verifica por medio de la lámpara de esmaltar, comprende tres operaciones la construcción de un termómetro que son: la división del tubo en partes de igual capacidad, la introducción del mercurio en el depósito y la graduación.

244. División del tubo en partes de igual capacidad. -Como las indicaciones del termómetro sólo son exactas cuando las divisiones de la escala corresponden a dilataciones iguales del mercurio, conviene que esté aquella graduada de tal manera que indique capacidades iguales en el interior del tubo. Si fuese éste perfectamente cilíndrico y de un diámetro constante, bastaría, para obtener estas capacidades iguales, que se dividiera en partes también iguales la longitud del tubo; pero como en general suele ser su diámetro mayor en una extremidad que en la otra, resulta que capacidades iguales del tubo están representadas en la escala por longitudes diferentes. Éstas últimas son las que se trata de determinar.

Al efecto, antes de soldar el tubo, se introduce en él una columna de mercurio de 2 a 3 centímetros, cuidando de que se mantenga a la misma temperatura, y de que recorra el tubo de tal suerte, que a cada movimiento avance la columna una cantidad exactamente a su longitud, es decir, que una de las extremidades de la columna reemplace sucesivamente a la otra. Una regla, dividida en milímetros y aplicada al tubo permite evaluar, con una aproximación de menos de un décimo de milímetro, la longitud ocupada por la columna de mercurio. Si permanece ésta invariable, es indicio de que la capacidad del tubo es igual en todos sus puntos; pero si varía y va, por ejemplo, decreciendo, revela que aumenta el diámetro interno del tubo. Si se nota que de esta manera sufre la columna de mercurio variaciones de longitud de muchos milímetros, se desecha el tubo y se busca otro más regular. Pero si estas variaciones son poco considerables, se pega a lo largo del tubo una tira de papel, y con lápiz se van marcando rayitas enfrente de los puntos que sucesivamente ocupan las extremidades de la columna de mercurio.

Las divisiones así obtenidas indican necesariamente capacidades iguales, porque corresponden a un mismo volumen de mercurio; y como los intervalos de estas divisiones están suficientemente aproximados, para que podamos considerar el diámetro del tubo como constante en cada una de ellas, se pasa a divisiones más pequeñas, dividiendo las primeras en cierto número de partes iguales, lo cual se obtiene, conforme sabemos ya, por medio de la máquina de dividir (13).

Pronto veremos cómo, mediante estas divisiones, se obtiene una graduación exacta de la escala.

245. Modo de llenar el termómetro. -Para introducir el mercurio en el termómetro, se suelda en la extremidad superior de la varilla un embudo C ([fig. 174](#)), que se llena de mercurio; y luego inclinando un poco el tubo, se dilata el aire del depósito por medio de una lámpara de alcohol, o bien sirviéndose de una rejilla inclinada y rodeada de carbones incandescentes. El aire dilatado sale en parte por el embudo C; y si se deja que se enfríe el depósito colocándole en una posición vertical, vuelve a contraerse el aire que quedó, y la presión atmosférica obliga al mercurio a pasar al depósito D, por capilar que sea el tubo. Pero muy pronto cesa la entrada de dicho líquido, porque el aire, merced a la disminución de volumen, recobra una tensión capaz de equilibrarse con el peso de la atmósfera y el de la columna de mercurio que penetró en el tubo. Calentando entonces de nuevo y dejándole enfriar, entra una nueva cantidad de mercurio, y así sucesivamente, hasta que no queda ya en el depósito D más que un volumen muy reducido de aire. Para expulsarle, se calienta el mercurio del depósito hasta que entre en ebullición, y entonces los vapores que se desprenden arrastran consigo el aire y la humedad que todavía existiese en el tubo y en el depósito.

Lleno así el instrumento de mercurio seco y puro, se quita el embudo C, y se suelda su extremidad a la lámpara, pero cuidando antes de calentar el depósito D, con objeto de expulsar la mitad o los dos tercios del mercurio que contiene el tubo; pues de lo contrario se rompería el termómetro por la dilatación de dicho líquido. La cantidad de mercurio que ha de expelerse del tubo es tanto mayor, cuanto más altas hayan de ser las temperaturas que tengan que medirse. Procúrase además, en el momento de la soldadura, calentar el depósito D de tal suerte, que el líquido dilatado llegue al vértice del tubo. Así no queda aire en el termómetro, o debe acontecer, porque, de lo contrario comprimiéndose el aire al subir el mercurio, podría hacer estallar al tubo.

246. Graduación del termómetro, puntos fijos de su escala. -Una vez lleno el termómetro, falta graduarle, es decir, trazar sobre el tubo una escala que permita apreciar las variaciones de temperatura. Preciso es para esto tomar en él dos puntos fijos que representen temperaturas fáciles de reproducir y siempre idénticas.

La experiencia ha demostrado que la temperatura de fusión del hielo es siempre constante sea cual fuere el foco calorífico, y que el agua destilada, bajo una misma presión y en una vasija de la propia materia, entra constantemente en ebullición a la misma temperatura. Por lo tanto, sirve de primer punto fijo, es decir, de cero de la escala, la temperatura del hielo fundente; y de segundo, o sea de 100 grados, la temperatura de ebullición del agua destilada, en una vasija metálica y a la presión de  $0^m,76$ .

La graduación del termómetro comprende, pues, tres operaciones, que consisten en la determinación del cero, en la del punto 100, y por último, en el trazado de la escala.

247. Determinación del cero. -Para fijar el cero, se llena de hielo machacado o de nieve, una vasija que tenga en el fondo un agujero para dar paso al agua que origine la fusión del hielo ([fig. 175](#)), y en ella se introduce, como cosa de un cuarto de hora, el depósito del termómetro y parte del tubo. La columna de mercurio baja en un principio rápidamente, permaneciendo luego estacionaria; y entonces, en el punto que corresponde al nivel del mercurio, se marca con lápiz una señal en una tirita de papel, previamente pegada al tubo. Este punto es el cero.

248. Determinación del punto 100. -El segundo punto fijo se determina por medio del aparato representado en las [fig. 176](#) y [177](#), de las cuales la segunda es su sección vertical, y la primera su conjunto, en el acto de estar funcionando. En ambas figuras, las mismas letras designan piezas iguales. Todo el aparato es de cobre. Un tubo central A, abierto por sus dos extremidades, se fija en una vasija cilíndrica M, que contiene el agua, y otro tubo B, concéntrico al primero y envolviéndole por completo, se fija en el mismo recipiente M. Esta segunda cubierta, cerrada en sus dos extremidades, posee tres tubuladuras a E, D, viéndose en la primera un tapón, por el cual, pasa el tubo *t* del termómetro cuyo punto 100 se va a buscar; en la segunda se adapta un tubito de vidrio *m*, que contiene mercurio, y que sirve de manómetro para medir la tensión del vapor en el interior del aparato; y por fin, la tercera tubuladura D tiene por objeto, el dar paso al vapor y al agua que resulta de la condensación.

Esto sentado, y puesto el aparato en una hornilla para calentarlo hasta la ebullición, el vapor que se forma en la vasija M sube por el tubo A, dirigiéndose por entre las dos cubiertas hasta D, desde donde pasa a la atmósfera. Envuelto así el termómetro *t* por el vapor, se dilata el mercurio que contiene, y luego que queda estacionario, se hace en el punto *a*, en que se detiene, una señalita, es el punto 100 que se buscaba. La segunda cubierta B se ha añadido al aparato por Regnault para evitar el enfriamiento del tubo central por su contacto con el aire.

La determinación del punto 100 de la escala termométrica exige, al parecer, que la altura del barómetro sea  $0^m,76$ , durante el experimento, pues pronto se verá que, cuando esta altura es mayor o más débil que  $0^m,76$ , entra el agua en ebullición a una temperatura superior o inferior a 100 grados. Con todo, puede obtenerse exactamente el punto 100, sea cual fuere la presión atmosférica, haciendo la corrección que indica M.

Biot, quien comprobó que, cuando en el barómetro sube o baja el mercurio 27 milímetros, la temperatura de ebullición sube o baja un grado. De consiguiente, si es, por ejemplo, de 778 milímetros la altura del barómetro, es decir, 18 milímetros o sean dos tercios de 27, sobre los 760, el agua hierve a 100 grados, más dos tercios; y por lo tanto, deberá marcarse  $100 \frac{2}{3}$  en el punto en que se detenga el mercurio.

Habiendo observado Gay-Lussac que el agua entra en ebullición a una temperatura algo más elevada en una vasija de vidrio que en una de metal, y además, que asciende también la temperatura de la ebullición, por efecto de las sales que contiene disueltas el agua, admitió hasta hace poco que, para determinar el punto 100 de los termómetros, había que servirse de una vasija metálica y de agua destilada. Pero estas dos últimas condiciones son inútiles, desde que el físico sueco Rudberg descubrió que efectivamente influyen la naturaleza de la vasija y las sales disueltas en la temperatura de ebullición el agua, pero *no en la del vapor que se produce*. Es decir, que, aunque marque más de 100 grados el agua por efecto de las causas que acabamos de exponer el vapor que se desprende no pasa de 100, si la presión es  $0^m,76$ .

Resulta de lo expuesto que, para obtener el segundo punto fijo del termómetro, no es necesario servirse del agua destilada, ni de una vasija metálica, bastando que sea la presión  $0^m,76$ , o que se haga la corrección conforme hemos indicado, y que se introduzca por completo el termómetro en el vapor y no en el agua caliente.

Por lo demás, aunque se emplee el agua destilada, no debe introducirse el receptáculo del termómetro en el agua hirviendo, porque sólo su superficie marca en realidad 100 grados, puesto que crece la temperatura de capa en capa hacia el fondo a causa del exceso de presión.

249. Construcción de la escala. -Obtenidos ya los dos puntos fijos, se divide el intervalo que los separa en 100 partes de igual capacidad, llamadas *grados*, prolongando estas divisiones en toda la longitud de la escala ([fig. 178](#)). Bastaría, para trazar los grados, dividir el intervalo de cero a 100 en cien partes iguales, si tuviese el mismo diámetro en todos sus puntos el tubo del termómetro; pero como casi nunca queda satisfecha de un modo riguroso esta condición, es menester recurrir a las divisiones en partes de igual capacidad, que primero se trazaron en el tubo. Al efecto, se cuenta el número de estas divisiones comprendidas entre los puntos fijos, y dividiendo dicho número por 100, se tiene el número de divisiones, o la fracción que equivale a un grado. Deduciéndose así sucesivamente a contar desde cero, la posición de cada uno de ellos. El instrumento graduado de esta suerte es el *termómetro centígrado*.

Los grados se representan por medio de un cero pequeño colocado a la derecha y en la parte superior del número que marca la temperatura. En fin, para distinguir las temperaturas inferiores a cero de las superiores a éste, se las hace preceder el signo - (menos): así es que 15 grados bajo cero, se indican del modo siguiente: -150.

En los termómetros de precisión se halla graduada la escala en el mismo cristal del tubo; así, no puede variar, permaneciendo sensiblemente constante su longitud, pues el vidrio es muy poco dilatado.

Para obtener en el vidrio señales permanentes, se le da en caliente una ligera capa de barniz, y luego con una punta de acero, se marcan en éste las rayas de la escala, como

igualmente los números que les correspondan. Después se expone el tubo durante unos diez minutos a los vapores del ácido fluorhídrico que posee la propiedad de atacar al cristal, grabando en bajo relieve las señales, en los puntos en los cuales falte el barniz.

250. Diferentes escalas termométricas. -En la graduación de los termómetros se distinguen tres escalas, que son; la centígrada, la de Réaumur y la de Fahrenheit.

La escala centígrada es la que antes hemos construido, y la que generalmente sirve en Francia. Ideola el físico sueco Celsius, muerto en 1744.

En la segunda escala, adoptada en 1731 por el físico francés Réaumur, los dos puntos fijos corresponden también a la temperatura del hielo fundente y a la del agua en ebullición, pero se divide en 80 grados su intervalo. Es decir, que 80 grados Réaumur equivalen a 100 centígrados, y por lo mismo, uno de aquéllos es igual a  $\frac{100}{80}$  o  $\frac{5}{4}$  de grado c; y recíprocamente, un grado c. vale  $\frac{80}{100}$  o  $\frac{4}{5}$  de grado R. De consiguiente, para convertir un número de grados R. en c., 20 por ejemplo, se multiplica este número por  $\frac{5}{4}$ , pues si un grado R, es igual a  $\frac{5}{4}$  de grado c., 20 R. valdrán en c. 20 veces  $\frac{5}{4}$ , o 25. De igual manera, para transformar los c. en R., se multiplican por  $\frac{4}{5}$ .

Fahrenheit, de Dantzick, adoptó en 1714, una escala termométrica muy generalizada en Holanda, en Inglaterra y en la América del Norte. El punto fijo superior de esta escala también corresponde a la temperatura del agua en ebullición; pero el cero expresa el grado de frío que se obtiene mezclando pesos iguales de sal amoníaco machacada y de nieve, encontrándose dividido el intervalo en 212 grados. El termómetro de Fahrenheit, colocado en el hielo fundente, marca 32 grados; y de consiguiente, 100 centígrados equivalen en F. a 212 menos 32, o sean 180; 1 c. valdrá, pues,  $\frac{180}{100}$  o  $\frac{9}{5}$  de grado F., y recíprocamente, 1 grado F. es igual a  $\frac{100}{180}$  o sean  $\frac{5}{9}$  de grado c.

Supongamos ahora que se desea saber a cuántos grados c. equivalen un cierto número de los F., 95, por ejemplo. Princiábase por restar 32 del número dado, a fin de contar las dos especies de grados desde un mismo punto del tubo. La resta de 63, y como 1 grado F vale  $\frac{5}{9}$  de grado c., 63 grados F tienen por valor  $\frac{5}{9} \times 63$ , o 35 grados c.

Representando por  $t_f$  la temperatura dada en grados de Fahrenheit y por  $t_c$ , la temperatura correspondiente en grados centígrados, se tiene la fórmula:

$$t_c = (t_f - 32) \frac{5}{9} \quad [1]$$

a cual indica los cálculos que han de efectuarse para operar la conversión; y como de esta igualdad se deduce

$$t_f = t_c \times \frac{9}{5} + 32 \quad [2],$$

obtenemos una segunda fórmula, propia para convertir los grados centígrados en los de la escala de Fahrenheit.

Las fórmulas expuestas, de carácter general, se aplican a todas las temperaturas superiores e inferiores a los ceros de las escalas que quieren compararse, pero no deben olvidarse los signos  $t_f$  y  $t_c$ .

Propongámonos por ejemplo determinar cuál es la temperatura en grados centígrados cuando marca el termómetro Fahrenheit 5°; tenemos según la fórmula [1]:  $t_c = (5 - 32) \frac{5}{9} = -27 \times \frac{5}{9} = -15$ .

De igual manera cuando el termómetro centígrado marque -15°, nos da la fórmula [2]

$$t_f = -15 \times 9/5 + 32 = -27 + 32 = 5^\circ.$$

251. Cambio de posición del cero. -Aun cuando se construyan los termómetros con el mayor esmero posible, se hallan sujetos a una causa de error que conviene recordar. Trascurrido algún tiempo, tiende el cero a subir, hasta tal punto, que llega a ascender a dos grados en su movimiento, o en otros términos, introducido el termómetro en el hielo fundente, no desciende ya el mercurio al cero de la escala.

Diversas explicaciones, pero ninguna completamente satisfactoria, se han dado de este fenómeno. Supúsose que dependía de la disminución de volumen del receptáculo, por efecto de la presión exterior, al efectuarse el vacío en el termómetro; pero es el caso que se verifica el mismo fenómeno en los termómetros que contienen aire.

También se manifestó que al construirse la esfera, recobraba el vidrio muy lentamente su primitivo estado de agregación, fundándose en que se había notado al parecer, que pasados dos o tres años, ya no subía más el cero; pero de los experimentos de M. Despretz se deduce, que continúa el movimiento con una duración indefinida según todas las apariencias.

Además de este pausado movimiento que acabamos de mencionar, se notan bruscas variaciones en la posición del cero, siempre que ha tenido que marcar el termómetro altas temperaturas. En efecto, si se le introduce entonces en el hielo fundente, tarda bastante tiempo el mercurio en volver a marcar el cero de la escala.

Interesa, pues, cuando se trata de medir con precisión una temperatura, cerciorarse primero de la posición del cero en el termómetro que va a emplearse.

Obsérvese también que M. Regnault ha encontrado, que varios termómetros de mercurio, acordes a cero y a 100 grados, no lo están entre estos dos puntos, diferenciándose a veces en muchos grados sus indicaciones. M. Regnault atribuye esta diferencia a la desigual dilatación de los vidrios con que están fabricados los instrumentos.

Dedúcese de las observaciones que acabamos de presentar cuántas causas de error ofrece, y cuántos cuidados exige, la determinación de las temperaturas.

252. Límites respecto al uso del termómetro de mercurio. -Entre todos los termómetros fundados en la dilatación de los líquidos, merece la preferencia el de mercurio, porque este líquido es el que se dilata con más regularidad, y porque se ha observado también que su aumento de volumen entre -36 y 100 grados, es proporcional a la intensidad del calor. No obstante, si es inferior a -36 la temperatura, se debe recurrir al termómetro de alcohol, pues se congela el mercurio a -40 grados, y al acercarse a este punto es *irregular* su dilatación, es decir, que deja de ser proporcional a la intensidad del calor.

Las indicaciones de los termómetros de mercurio no pueden exceder la temperatura de 350 grados, que es la de la ebullición del mercurio.

253. Termómetro de alcohol. -El *termómetro de alcohol* sólo difiere del de mercurio, en hallarse lleno de espíritu de vino teñido de rojo con orchilla. Pero como la dilatación de los líquidos es tanto menos regular, cuanto más se aproximan a su punto de ebullición,

resulta que el alcohol se dilata muy irregularmente entre cero y 100 grados, porque hierve a 78. De suerte que si después de haber tomado los dos puntos fijos, como en el termómetro de mercurio, se dividiese su intervalo en 100 grados, se poseería un termómetro acorde con el de mercurio, sólo a cero y a 100 grados, retrasándose cada vez más entre estos dos puntos de muchos grados, puesto que sólo señala 44 grados, cuando el de mercurio marca 50.

Véase por qué la graduación del termómetro de alcohol debe hacerse comparándola con uno de mercurio que sirva de tipo, calentándolos juntos gradualmente en un baño, y señalando así sucesivamente en el termómetro de alcohol las temperaturas que marque el de mercurio. Graduado de esta suerte, puede *compararse* con este último, es decir, que en igualdad de condiciones, marca las mismas temperaturas. Sirve sobre todo el termómetro de alcohol para medir temperaturas muy bajas, porque los fríos más rigurosos, conocidos hasta ahora, no llegan a congelarle.

254. Termómetro diferencial de Leslie. -El físico escocés Leslie, muerto en 1832, construyó un termómetro de aire que da a conocer la diferencia de temperatura de dos lugares inmediatos, proviniendo de este uso su nombre de *termómetro diferencial*. Compónese este instrumento de dos esferas de vidrio llenas de aire y reunidas por un tubo encorvado de corto diámetro y fijo en una placa ([fig. 179](#)). Se introduce en el aparato antes de cerrarle, un líquido colorado que llene la rama horizontal del tubo y la mitad de las verticales. Sirve al intento, en general, el ácido sulfúrico colorado de rojo, porque debe elegirse un líquido que no origine vapores a la temperatura ordinaria. Cerrado luego el aparato, se hace pasar aire de una esfera a la otra, calentándolas desigualmente hasta que después de algunos tanteos, poseyendo la misma temperatura, sea igual el nivel en ambas ramas verticales; y entonces se escribe el cero en cada extremidad de la columna líquida. Se termina la graduación dando a una de las esferas una temperatura 10 grados más alta que la de la otra, en cuyo caso se dilata el aire de la primera, repeliendo la columna líquida, que sube, de consiguiente, en la otra rama. Luego que queda estacionaria, se marca 10 a cada lado, en el punto en que se para el nivel del líquido; se dividen los intervalos de cero a 10 en diez partes iguales, y se continúan estas divisiones por la parte superior e inferior del cero, a lo largo de cada rama.

255. Termóscopo de Rumford. -Al propio tiempo que inventaba Leslie el termómetro diferencial, adoptaba otro análogo el conde americano, Rumford, muerto en Auteuil, cerca de París, en 1814, y que se denomina *termóscopo de Rumford*. Este instrumento difiere muy poco del que hemos descrito antes pues sólo son algo mayores las esferas y más larga la rama horizontal que posee la graduación. El índice E ([fig. 180](#)) no tiene más que unos dos centímetros de longitud, marcándose un cero en cada una de sus extremidades, cuando, encontrándose a igual temperatura las dos esferas, ocupa el índice la parte media de la rama horizontal. El resto de la graduación se efectúa enteramente como en el termómetro de Leslie. El apéndice D regula el aparato; pues si hay demasiado aire en una de las esferas, se introduce el índice en el apéndice, pudiendo entonces el aire pasar a la otra esfera. Basta en seguida inclinar el termómetro para que salga el índice y recobre la posición que debe ocupar, circunstancia que no se obtiene sino después de algunos ensayos. Existe todavía otra especie de termómetro de aire, que daremos a conocer al hablar de la dilatación de los gases.

256. Termómetro metálico de Bréguet. -Un relojero de París, llamado Abraham Bréguet, muerto en 1823, ideó un termómetro fundado en la desigual dilatación de los metales, y notable por su extraordinaria sensibilidad. Se compone este instrumento de tres láminas superpuestas, de platino, de oro y de plata, soldadas entre sí en toda su longitud, y pasadas en seguida por el laminador hasta que no formen más que una cinta metálica muy delgada. Ésta se enrolla en forma de hélice ([fig. 181](#)), y fijándola por su extremidad superior a un montante, se suspende de la otra una ligera aguja que se mueve libremente sobre un cuadrante horizontal que posee una escala centígrada.

La plata, que es de los tres metales el que más se dilata, forma la cara interna de la hélice, y la externa el platino, que es el menos dilatante, encontrándose entre los dos el oro. Cuando aumenta la temperatura, se desenvuelve la hélice de izquierda a derecha, porque la plata se dilata más que el platino y el oro; pero si aquella baja, se verifica el efecto contrario. Se halla colocado el oro entre los otros dos metales, porque su dilatación es un término medio entre la de la plata y la del platino; y porque, si se emplearan tan sólo estos dos últimos metales, sería muy posible que su diferencia de dilatación ocasionase una rotura. El termómetro de Bréguet se gradúa por comparación con otro de mercurio que sirve de tipo.

257. Termómetro de máxima y mínima de Rutherford. -Es preciso conocer en las observaciones meteorológicas, la temperatura más alta del día y la más baja de la noche. Los termómetros ordinarios no sirven para el intento, a no mediar una observación incesante, lo cual es poco menos que impracticable. Por lo tanto se han ideado al efecto una multitud de instrumentos, entre los cuales es el más sencillo el de Rutherford. Consiste en dos termómetros, uno de mercurio, A, y de alcohol el otro, B, fijos en una lámina rectangular de vidrio ([fig. 182](#)), y con tubos encorvados horizontalmente. En el termómetro de mercurio se ve un pequeño cilindro de hierro A que puede resbalar libremente en el tubo. Este pequeño cilindro, que sirve de índice, se halla en contacto con la extremidad de la columna de mercurio, con tal que conserve su horizontalidad el tubo; y así es que, cuando aumenta la temperatura, se dilata el mercurio del tubo, empujando delante de él al índice. Éste se para luego que el mercurio cesa de dilatarse; pero se queda en el mismo punto del tubo cuando el mercurio se contrae, pues no hay adherencia entre este líquido y el hierro.

El punto donde se detiene el índice, marca por lo tanto la temperatura más elevada que se ha producido. En la [figura 182](#) señala el índice cerca de 31 grados.

El termómetro inferior es de mínima, y el líquido que contiene es alcohol, en el cual se halla enteramente introducido un cilindrito de esmalte B, que sirve de índice. Si desciende la temperatura, estando el cilindro en el remate de la columna líquida, le arrastra ésta consigo al contraerse por un efecto de adhesión, y el índice avanza así hasta el punto en que tiene lugar el máximo de contracción del líquido. Si aumenta, la temperatura, se dilata el alcohol y pasa entre la pared del tubo y el índice sin que éste se mueva. De consiguiente, la extremidad del índice opuesta al depósito marca la temperatura más baja experimentada, es decir,  $9\frac{1}{2}$  grados bajo cero, en la figura a la cual nos contraemos.

258. Termómetro de máxima de Negretti y Zambra. -El termómetro de máxima de Rutherford ha sido modificado recientemente con feliz acierto por MM. Negretti y Zambra. En efecto, ofrece aquel aparato el inconveniente de no ser portátil y de exigir

grandes precauciones en su manejo, porque, si se le vuelve demasiado bruscamente, se introduce el índice de hierro en el mercurio, en cuyo caso, al dilatarse el líquido, no le lleva ya delante de sí, sino que pasa por el intervalo que media entre el vidrio y el índice. Queda éste, pues, completamente inmóvil, dejando por lo mismo de funcionar el termómetro.

Salvaron este inconveniente los señores Negretti y Zambra, introduciendo en el tubo del termómetro un pequeño índice de vidrio *ad* (fig. 183). En seguida calientan el tubo a la lámpara, y le encorvan en el punto mismo que ocupa el índice de suerte que quede fijo sin obstruir por eso al tubo ni oponerse a la dilatación del mercurio del depósito.

Dispuesto horizontalmente el termómetro, si aumenta la temperatura, se dilata el mercurio, pasa por entre el índice y las paredes del tubo, y avanza, por ejemplo, hasta *c*; pero cuando desciende la temperatura y se contrae el mercurio, supera la resistencia que encuentra éste, para pasar de nuevo entre el índice y el tubo, a la cohesión de las moléculas del líquido entre sí, no se mueve la columna *cd*, y se hace el vacío de *b* a *a*. Se tiene, pues, exactamente en *c* la temperatura máxima que ha sufrido el instrumento. Para que pase luego el mercurio a la parte inferior del índice, basta poner vertical el tubo, pues así cae aquél en virtud de su propio peso.

Este instrumentito, que construyen los señores Lerebours y Secretan, es muy portátil y de uso mucho más expedito que el de Rutherford.

En cuanto al error que puede resultar del enfriamiento de la columna de mercurio *cd*, al momento de consultar el termómetro, es completamente despreciable, porque, aplicando las fórmulas de dilatación, se verá que, para un enfriamiento de 25 grados, este error no puede exceder de una décima de grado.

259. Termómetro de máxima de M. Walferdin. -El termómetro de máxima de M. Walferdin es de *derrame*, y tiene la misma forma que el ordinario de mercurio, sin más diferencia que la de terminar en su parte superior según un pequeño depósito o *panza*, en el cual penetra el tubo que termina una punta afilada y abierta (fig. 184). En dicha panza se encuentra mercurio que llena completamente el instrumento a cada observación. Calientase al efecto el depósito inferior hasta que, dilatándose el mercurio, principie a salir por la punta afilada en que remata el tubo. Invirtiendo entonces el aparato, desciende el mercurio de la panza hacia la punta, la cual queda completamente sumergida en aquél. Conservando el instrumento en esta posición invertida, se le deja que se enfríe lentamente, para que al contraerse el mercurio del depósito, pase cierta cantidad, por un efecto de cohesión, de la panza al tubo, y se encuentre éste completamente lleno.

Antes de hacer uso de este instrumento, se le llena a una temperatura inferior a la que va a observarse, colocándole en seguida en el sitio cuyo máximo de temperatura se desea conocer. Si principia por enfriarse el termómetro, no resulta inconveniente alguno, porque ni entra ni sale mercurio; pero si aumenta la temperatura, se dilata el mercurio y parte se derrama en la panza, sin poder salir de ella, porque entonces tiene el aparato la posición que representa la fig. 184. Para determinar en seguida la temperatura más alta a que llegó el instrumento, basta compararle con un termómetro tipo, calentándolos ambos gradualmente hasta que el mercurio, en el termómetro de derrame, ascienda hasta

el vértice del tubo y se halle a punto de salir. Consultando entonces el termómetro tipo, la temperatura que indica, es la más alta que experimentó el de máxima.

También construyó M. Walferdin un termómetro de mínima, de derrame igualmente, pero con dos líquidos, y de un empleo menos fácil que el anterior. Utilízanse sobre todo estos termómetros, en la investigación de las temperaturas máximas y mínimas de los fondos de los lagos, de los mares y de los pozos. Sin embargo, hay que encerrarlos en tal caso en un tubo de vidrio, que se suelda en seguida a la lámpara, a fin de sustraerlos de la presión exterior que disminuiría el volumen del depósito, originando la salida de un exceso de mercurio

260. Pirómetro de Wedgwood. -Se denominan *pirómetros* los instrumentos que han de medir altas temperaturas, y para las cuales es inútil el termómetro de mercurio, porque se evaporaría éste, fundiéndose además el vidrio. Carecemos de buenos pirómetros, pues los construidos hasta ahora no indican con exactitud la medida de las temperaturas.

Wedgwood, fabricante de loza en Inglaterra, adoptó un pirómetro fundado en la disminución de volumen que experimenta la arcilla por efecto del calor. Consta este instrumento de una plancha de cobre, en la cual se fijan otras tres del mismo metal ([fig. 185](#)), cada una de las cuales tiene medio pie inglés de longitud. Las dos primeras, que en su mayor abertura distan 6 líneas, cierran después una línea desde un extremo al otro; y la segunda y tercera plancha, cuya separación mayor es continuación de la de aquellas, convergen o cierran también de una línea. De suerte que la longitud total del calibre es de un pie, y de dos líneas la convergencia de uno a otro extremo.

Cada pulgada del calibre está dividida en 20 grados, es decir, que la longitud comprende 240 grados. Para emplear este instrumento se echa mano de cilindritos de arcilla secados en una estufa a 100 grados, y de un diámetro tal, que a la temperatura ordinaria entren en la canal o calibre exactamente, hasta el cero de la escala. Si se someten estos cilindros a una temperatura muy alta, como la de un horno, por ejemplo, sufren los cilindros una disminución de volumen, originada por su vitrificación; y así es que, cuando se enfrían y se les introduce en el calibre, pasan más allá del cero, y el punto donde se detienen, indica en grados del pirómetro la temperatura del horno. En nuestro grabado marea 32 grados el cilindro *a*.

Wedgwood evaluó aproximadamente, admitiendo que el cero de su parámetro corresponde ya a 500 grados centígrados, que cada grado del instrumento equivale a 72 de estos últimos. Es decir, que para convertir en grados centígrados una temperatura dada en grados del pirómetro, es preciso multiplicar estos por 72 y añadir 500 al producto. Pero además de que no son exactas estas evaluaciones por cuanto los cilindros no están formados de igual arcilla, no es idéntica su contracción, y por lo tanto, no pueden compararse sus indicaciones.

261. Pirómetro de Brongniart. -Brongniart había mandado construir, para los hornos de la fábrica de Sévres, un pirómetro muy parecido al aparato que representa la [figura 172](#). Consiste en una barra de hierro o de platino situada en una ranura hecha en una placa de porcelana. Por uno de sus extremos se apoya la barra en el fondo de la ranura, y por el otro se halla en contacto con una varilla de porcelana que sale fuera del horno en que está colocado el aparato. Por último, se apoya esta varilla en la rama menor de una aguja, cuyo brazo más largo recorre un arco de círculo graduado; de suerte que, a

medida que se alarga por la elevación de temperatura la barra metálica que se encuentra en el horno, empuja a la varilla de porcelana, la cual hace andar la aguja. Este pirómetro, que ya en vida de su autor se había abandonado en Sévres, no determina con precisión las temperaturas, sin embargo de que es más exacto que el de Wedgwood.

262. Termómetrografo. -Los termómetros de máxima y mínima no dan a conocer, en cada observación, más que las temperaturas extremas, sin dejar indicio alguno respecto a las intermedias. El termómetro de hélice de Bréguet ([fig. 181](#)) ha sido modificado por el sobrino de dicho constructor, con objeto de que indique de hora en hora las temperaturas. Al efecto, sostiene la aguja un pequeño estilete lleno de tinta, existiendo en su parte inferior una lámina móvil con 24 arcos iguales y equidistantes, sobre la cual se traza la misma graduación centígrada que en el cuadrante del termómetro. A cada hora un aparato de relojería hace avanzar la lámina una cantidad igual al intervalo de dos arcos, y al mismo tiempo da un golpecito sobre el estilete de la aguja, la cual marca un punto negro sobre el arco. El número del arco indica la hora, y la posición del punto negro, manifiesta la temperatura correspondiente.

▽△

## Capítulo II

▽△

### Dilatación de los sólidos

263. Dilatación lineal y dilatación cúbica; coeficiente de dilatación. -Ya hemos visto (241) que se distinguen en los cuerpos sólidos dos especies de dilatación, a saber: la *lineal* o de una sola dimensión, y la *cúbica* o sea en volumen.

Dase el nombre de *coeficiente de dilatación lineal* a la prolongación que adquiere la unidad de longitud de un cuerpo cuando aumenta su temperatura de cero a un grado; y *coeficiente de dilatación cúbica* al aumento que adquiere, en el mismo caso, la unidad de volumen.

Varían estos coeficientes, según los cuerpos; pero en un mismo cuerpo existe la relación sencilla de ser el *coeficiente de dilatación cúbica*, triple del de la *lineal*. Podemos, pues, multiplicando o dividiendo por 3, encontrar uno de estos coeficientes, cuando se conozca el otro.

Para demostrar que el coeficiente de dilatación cúbica es tres veces mayor que el de dilatación lineal, supongamos un cubo cuyo lado valga 1 a cero grados. Si se representa por  $k$  la prolongación que adquiere este lado pasando de cero a 1 grado, su longitud será entonces  $1+k$ , y el volumen del cubo que era 1 a cero, será actualmente  $(1+k)^3$ , es decir,  $1+3k+3k^2+k^3$ . Como la prolongación  $k$  es siempre una fracción muy pequeña (página 201, tabla), su cuadrado  $k^2$  y su cubo  $k^3$  son fracciones harto pequeñas para que influyan en el último decimal de los números que representan los coeficientes de dilatación cúbica. Podemos, pues, desprestigiar las cantidades  $k^2$  y  $k^3$ , en cuyo caso el volumen a 1 grado viene a ser muy aproximadamente  $1+3k$ . El aumento de volumen es por lo tanto  $3k$ , esto es el triple del coeficiente de dilatación lineal.

264. Medida de los coeficientes de dilatación lineal. -Se han inventado por diferentes físicos varios aparatos para determinar los coeficientes de dilatación lineal de los metales: pasaremos a describir desde luego el que emplearon Lavoisier y Laplace en 1782 y que hemos representado en la [figura 186](#). Consta de una cuba de cobre colocada en un hornillo entre cuatro prismas de piedra. Los dos de la derecha sostienen un eje horizontal en cuya extremidad existe un anteojo, y en el centro una regla de vidrio que gira con él, lo mismo que el anteojo. En los otros dos prismas se hallan afianzados dos travesaños de hierro que sostienen una segunda regla, de vidrio. Finalmente contiene la cuba agua o aceite, en la cual se mete la barra cuyo coeficiente de dilatación quiere medirse.

La [figura 187](#) representa un corte del aparato: G es el anteojo, KH la barra, cuyas dos extremidades se apoyan en las dos reglas de vidrio F y D. Como está fija la regla F, no puede alargarse la barra sino en la dirección KH, y a fin de que goce de entera libertad en sus movimientos, descansa sobre dos cilindros de cristal. Finalmente hay en el anteojo un hilo micrométrico horizontal que cuando gira de cierto ángulo aquel, recorre varias divisiones trazadas sobre una escala vertical AB, situada a una distancia de 200 metros.

Sentado esto, se introduce en la cuba el hielo, y al adquirir la barra la temperatura cero se mira a qué división corresponde el hilo del anteojo en la escala vertical AB; después se saca el hielo y se llena la cuba de agua o de aceite, puesto que este último líquido puede elevarse a una temperatura mayor, exponiéndose en seguida la cuba a la acción del fuego. La barra se dilata y al permanecer estacionaria la temperatura, por una parte, se anotaba la del baño, por medio de los termómetros que en el mismo se introducían, y por otra la división de la escala a la cual correspondía el hilo micrométrico del anteojo.

Fácil es calcular con estos datos la prolongación de la barra. En efecto, al alargarse ésta de una cantidad GH, al inclinarse el eje óptico del anteojo según la dirección GB, los dos triángulos GHC y ABC son semejantes, por tener respectivamente perpendiculares sus lados; de manera que se tiene la igualdad,  $HC/AB=HG/AG$ . Asimismo, si representamos por HC' otra prolongación, y por AB' la desviación correspondiente, se tendrá también  $HC'/AB'=HG/AG$ ; lo cual nos manifiesta que la relación de la prolongación de la barra con la desviación del anteojo es constante, puesto que siempre es igual a  $GH/AG'$ , cuyo valor se había encontrado, que era de  $1/744$ , por medio de una experiencia preliminar. Por lo tanto, se obtuvo  $HC/AB=1/744$ ; de donde se dedujo  $HC=AB/744$ ; es decir, que la prolongación total de la barra se obtenía dividiendo por 744 la distancia recorrida por el hilo micrométrico del anteojo. Determinada dicha prolongación y dividida por la longitud de la barra a la temperatura cero, y por la del baño, se obtenía la dilatación por una sola unidad de longitud y respecto a un solo grado, es decir, el coeficiente de dilatación lineal.

265. Método de Roy y Ramsden. -En 1787, Roy empleó el aparato que representa la [figura 188](#), para medir los coeficientes de la dilatación lineal Este aparato construido por Ramsden, consta de tres cubas metálicas de situación paralela y de una longitud aproximada de dos metros. En la del centro existe, bajo la forma de una barra prismática, el cuerpo cuyo coeficiente de dilatación quiere determinarse, y en las dos cubas restantes, barras de hierro fundido de una longitud exactamente igual a la de la primera. En los extremos de las tres barras existen vástagos verticales, y en los que corresponden a las cubas A y B, poseen dichos vástagos, pequeños discos con orificios

circulares por los cuales pasan, formando una cruz, hilos micrométricos, como los de los anteojos. En los vástagos de la cuba C, se adaptan unos tubos que contienen el objetivo y el ocular de un microscopio, provistos también de sus hilos correspondientes.

Llenas las cubas de hielo, y siendo cero la temperatura de las tres barras, los puntos de cruzamiento de los hilos en los discos y en los tubos, se encuentran exactamente en línea recta en cada extremo. Sentado esto, si se saca tan sólo el hielo de la cuba central, y se vierte agua elevando su temperatura a 100 grados, por medio de lámparas de alcohol, situadas debajo de la cuba, se dilatará la barra contenida en ésta; pero como se ha cuidado con anterioridad de ponerla en contacto con el extremo de un tornillo *a* fijo en su pared, la prolongación total se origina en el sentido *nm*, de suerte que los hilos del disco del vástago *n* permanecen invariables en su antigua posición, desviándose únicamente hacia B, el vástago *m*, de una cantidad igual precisamente a la dilatación de la barra. Pero como ya hemos dicho que el tornillo *a* forma parte de ésta, es evidente que tirándolo con lentitud de la derecha hacia la izquierda, se determinará el transporte de la barra en el sentido *mn*, volviendo el vástago *m* a su posición primitiva; de suerte que en el transcurso de esta operación, ha caminado el tornillo una longitud igual exactamente al alargamiento de la barra. Conocido el número de vueltas dadas por el tornillo y su paso, se deduce rigurosamente la longitud recorrida por el mismo, y de este dato se obtiene en seguida su coeficiente de dilatación, dividiéndolo por la temperatura del baño y por la longitud de la barra a la temperatura cero.

*Coefficientes de dilatación lineal entre cero y 100 grados, de los cuerpos empleados generalmente en las artes.*

Vidrio blanco.	0	Cobre.	0
Platino.	0,000008842	Bronce.	0
Acero sin templar.	0	Latón.	0
Hierro fundido.	0	Plata copelada.	0
Hierro dulce forjado.	0	Estaño.	0
Acero templado.	0	Plomo.	0,000028575
Oro refinado.	0	Zinc.	0

266. Los coeficientes de la dilatación aumentan con la temperatura. -La experiencia ha demostrado que los coeficientes de la dilatación lineal de los metales, son sensiblemente constantes entre cero y 100 grados; es decir, que para un mismo número de grados, puede admitirse sin que esto origine ningún error sensible, que aumenta constantemente la longitud de la misma fracción, al compararse con su longitud a cero. Pero según las investigaciones de Dulong y Petit, el coeficiente llega a ser mayor entre 100 y 200 grados, aumentando de nuevo entre 200 y 300, y así sucesivamente hasta llegar al punto de fusión. El acero templado es la excepción a esta regla, puesto que decrece su coeficiente, cuando pasa su temperatura de cierto límite.

Respecto a la determinación de los coeficientes de la dilatación cúbica, según la relación que media entre ellos y los de la dilatación lineal (263), pueden deducirse de los números que anteceden, multiplicándolos por 3. Sin embargo, al ocuparnos en breve, del *termómetro de peso*, expondremos un método practicado por Dulong y Petit, para determinar directamente los coeficientes de la dilatación cúbica.

267. Fórmulas relativas a las dilataciones de los sólidos. -Sean *l* la longitud de un cuerpo a cero, *l'* su longitud a la temperatura *t*, y *k* su coeficiente de dilatación lineal. La relación entre estas diversas cantidades se expresa por las fórmulas siguientes:

La prolongación que corresponde a  $t$  grados es  $t$  veces  $k$  o  $kt$ , para una sola unidad de longitud, y por lo tanto,  $l$  veces  $tl$ , o  $ktl$  para  $l$  unidades. La longitud de la barra, que era  $l$  a cero, es, pues,  $l+ktl$  a  $t$  grados, de donde

$$l' = l + ktl \quad [1].$$

Poniendo  $l$  por factor común en el segundo miembro, se transforma dicha fórmula en  $l' = l(1+kt)$  [2].

La fórmula [2] sirve para encontrar la longitud  $l'$  a  $t^\circ$ , cuando se conoce la longitud  $l$  a cero. Dividiendo los dos miembros por  $(1+kt)$ , se deduce

$$l = l' / (1+kt) \quad [3].$$

Esta última fórmula se emplea para determinar la longitud a cero, cuando se conoce la longitud  $l'$  a  $t$ .

Por fin, si en la igualdad [1] se pasa  $t$  al primer miembro, y se divide éste y el segundo por  $tl$ , resulta  $k = (l' - l) / tl$ .

Esta última ecuación sirve para calcular el coeficiente de dilatación  $k$ .

Si, en vez de considerar las dilataciones lineales, se toman en cuenta las cúbicas, resultan fórmulas análogas a las que preceden. Sean, al efecto,  $V$  el volumen de un cuerpo a cero,  $V'$  su volumen a  $t^\circ$ , y  $D$  su coeficiente de dilatación cúbica, el cual, según sabemos, (263) es tres veces mayor que  $k$ ; y, haciendo el mismo razonamiento que antes, se encontrará  $V' = V(1+Dt)$  [5], y  $V = V' / (1+Dt)$  [6], fórmulas que sirven para pasar del volumen a cero al volumen a  $t^\circ$ , y recíprocamente.

El binomio  $1+Dt$  se designa algunas veces con el nombre de *binomio de dilatación*. Si se acepta esta calificación, las fórmulas [5] y [6] nos manifiestan que al calentarse un cuerpo o bien al enfriarse, varía en el primer caso su volumen en razón directa del binomio de dilatación, y en el segundo, en razón inversa de dicha expresión.

268. Problemas sobre las dilataciones. -I. Una barra de hierro tiene 2m,6 de longitud a cero, ¿cuál será ésta a 80 grados, en el supuesto de que el coeficiente de dilatación del hierro vale 0,0000122?

Este problema se resuelve por la fórmula [2], haciendo en ella

$$l = 2\text{m},6, \quad t = 80; \quad k = 0,0000122.$$

Así se obtiene

$$l' = 2\text{m},6 (1 + 0,0000122 \times 80) = 2\text{m},6 \times 1,000976 = 2\text{m},6025.$$

Es decir, que la longitud buscada es 2m,6025, la cual da dos milímetros y medio de prolongación.

II. A 90 grados tiene una barra de cobre 3m,4 de longitud, ¿cuál adquirirá a cero siendo 0,0000172 el coeficiente de dilatación del cobre?

Tiene que recurrirse aquí a la fórmula [3], haciendo en ella  $l' = 3\text{m},4$ ,  $t = 90$ ,  $k = 0,0000172$ , de todo lo cual se deduce

$$l = 3,4 / (1 + 0,0000172 \times 90) = 3,4 / 1,001548 = 3\text{m},395.$$

III. Una barra metálica tiene una longitud  $l$  a  $t$  grados, ¿cuál será la longitud  $L$  a  $t'$  grados?

Se resuelve este problema buscando la longitud de la barra a cero, la cual es  $l'/1+kt'$  según la fórmula [3]; luego de la longitud a cero se pasa a la longitud a  $t'$  por medio de la fórmula [2], es decir, multiplicando por  $1+kt'$ , obteniéndose así al fin la longitud buscada  $L=l(1+kt')/1+kt'$ .

IV. Siendo  $d$  la densidad de un cuerpo a cero, calcúlese su densidad  $d'$  a  $i$  grados.

Si se representa por  $1$  el volumen del cuerpo a cero, y por  $D$  su coeficiente de dilatación cúbica, el volumen a  $t$  será  $1+Dt$ ; y como la densidad de un cuerpo se halla evidentemente en razón inversa del volumen que adquiere el cuerpo al dilatarse, se tiene la proporción inversa.

$d'/d=1/1+Dt$ , de donde  $d'=d/1+Dt$ .

Deduciéndose por lo tanto, que cuando un cuerpo se calienta de  $0$  a  $t$  grados, su densidad y por consiguiente su peso, varían en razón inversa del binomio de dilatación  $1+Dt$ .

268. Aplicaciones de la dilatación de los sólidos. -Numerosísimas son las aplicaciones que en las artes ofrece la dilatación de los sólidos. Las rejillas de los hornos, por ejemplo, no deben ajustarse con demasiada exactitud por sus dos extremos en aquéllos, y sí hallarse libre por lo menos en uno de ellos, pues de lo contrario quebrantarían, al dilatarse, las piedras del horno. Si en los caminos de hierro se tocasen los raíles, los encorvaría de trecho en trecho la fuerza de dilatación, o bien rompería sus cojinetes. Cuando se calienta o se enfría bruscamente un vaso de vidrio, estalla con la mayor facilidad; porque, como el vidrio es mal conductor del calórico, se calientan con demasiada desigualdad sus paredes, y por lo tanto es también desigual la dilatación, lo cual determina su rotura.

270. Péndulo compensador. -La dilatación desigual de los metales ha originado una importantísima aplicación en el *péndulo compensador*. Tal es el nombre que se da a un péndulo en el cual la prolongación de la varilla, cuando aumenta la temperatura, está compensada de manera que permanezca constante la distancia entre el centro de suspensión y el de oscilación (60), circunstancia que es necesaria, según las leyes del péndulo (59, 3°), a fin de que persista el isocronismo, y pueda servir de regulador el péndulo en los relojes (62). Muchísimos son los sistemas que se han propuesto para compensar los péndulos, pero el más general es el que se ve representado en la [figura 189](#).

En este sistema, la lenteja  $L$  no se halla sostenida por una sola varilla, sino por una serie de marcos cuyos lados verticales son alternadamente de acero y de latón. En el dibujo están figuradas con trazos más negros las varillas de acero en número de seis, incluso una lámina de acero  $b$ , que sostiene todo el péndulo y que se encorva a cada oscilación. Las demás, que sólo llegan a 4, son de latón. La varilla  $i$ , que sostiene a la lenteja  $L$ , se fija por su parte superior a un travesaño horizontal, mas por la inferior está libre, pasando por dos agujeros cilíndricos que se encuentran en los travesaños horizontales inferiores.

En vista de esta descripción se deduce fácilmente, por el sistema según el cual las varillas verticales se hallan enlazadas entre sí por los travesaños horizontales, que no puede efectuarse más que de arriba hacia abajo la prolongación de las varillas de acero. De consiguiente, para que permanezca invariable la longitud del péndulo, basta que la prolongación de las varillas de cobre levante constantemente la lenteja una cantidad idéntica a la que tiende a hacerla bajar las de acero; resultado que se obtiene dando a todas las varillas longitudes que estén en razón inversa de los coeficientes de dilatación de los respectivos metales.

Fácilmente se determina, por medio del cálculo, la longitud de cada sistema de varillas de acero y de cobre, a fin de obtener la debida compensación. En efecto, sean  $a, a', a'', a'''$  las longitudes respectivas de las varillas de acero  $b, d, e, i$ , que son las únicas que evidentemente debemos tomar en consideración: sean al mismo tiempo  $c, c'$  las longitudes de las de cobre  $c, n$ ; y  $L$  la longitud del péndulo, es decir, la distancia  $SO$  del punto de suspensión al centro de oscilación, se tiene  $L=(a+a'+a''+a''')-(c+c')$  [1].

Mas si representamos por  $K$  y  $K'$  los coeficientes de dilatación del acero y del cobre, debe resultar  $(a+a'+a''+a''') K=(c+c') K'$  [2] Reemplazando en esta última igualdad la cantidad  $(a+a'+a''+a''')$  por su valor tomado de la igualdad [1], resulta  $(L+c+c') K=(c+c') K'$ , de donde se obtiene  $c+c'=L/K'/K-1$ .

Para el latón y el acero, la razón  $K'/K$ , viene a ser sensiblemente igual a  $7/4$  de manera que así se obtiene  $c+c'=4/3L$ , y  $a+a'+a''+a'''=7/3L$ .

Como de ordinario no suelen batir más que segundos los péndulos de los relojes, resulta en París (60),  $L=0m,993866$ ; de donde  $c+c'=1m,325155$ , y  $a+a'+a''+a'''=2m,319021$ .

El cálculo demuestra que sería imposible la compensación, si se emplearan menos varillas de acero y de cobre que las que antes indicamos.

Se consigue también compensar la prolongación de la varilla de los péndulos por medio de *láminas compensadoras*. Tal es el nombre que se da a dos láminas de cobre y de hierro soldadas entre sí, y dispuestas en el eje del péndulo ([fig. 190](#)), de manera que la de cobre, que es la más dilatante, se encuentre debajo de la de hierro. Esto supuesto, si baja la temperatura, se acorta la varilla del péndulo y sube la lenteja, pero entonces se encorvan las láminas compensadoras, conforme indica la [figura 191](#), por contraerse más el cobre que el hierro. De esta suerte bajan dos esferas metálicas, situadas en la extremidad de las láminas, y si poseen una masa adecuada se establece una compensación entre los puntos que se aproximan al centro de suspensión y los que se alejan del mismo, con lo cual se consigue que no varíe el centro de oscilación. Si sube la temperatura, desciende la lenteja, pero ascienden las esferas ([fig. 192](#)) y hay también compensación.

▽△

## Capítulo III

▽△

### Dilatación de los líquidos

271. Dilatación aparente y dilatación absoluta. -En los líquidos no se consideran más que dilataciones cúbicas, que se dividen en absolutas y aparentes. La *dilatación aparente* es el aumento de volumen que adquiere un líquido encerrado en una vasija que se dilata menos que él. Tal es en los termómetros la dilatación del mercurio y la del alcohol. La *dilatación absoluta* es el aumento real que adquiere el volumen de un líquido, prescindiendo de la dilatación de la vasija.

La dilatación aparente es menor que la absoluta en una cantidad igual a la dilatación de la vasija. Se hace sensible esta última introduciendo en agua hirviendo un termómetro de gran receptáculo lleno de alcohol colorado, hasta la mitad del tubo. En el momento en que entra el receptáculo en el agua caliente, baja el alcohol en el tubo, lo cual proviene sin duda alguna de la dilatación de las paredes del vaso; pero si el receptáculo continúa sumergido, se calienta el alcohol y sube en el tubo una cantidad igual a su dilatación absoluta, menos la del vaso que encierra el líquido.

Lo mismo que en los sólidos, se llama *coeficiente de dilatación* de un líquido el aumento que adquiere la unidad de volumen cuando aumenta la temperatura de cero a un grado; pero en tal caso hay que establecer una diferencia entre el *coeficiente de dilatación aparente* y el de *dilatación absoluta*. Muchos son los procedimientos que se han usado para determinar estos dos coeficientes de dilatación; pero nosotros nos limitaremos a dar a conocer los de Dulong y Petit.

272. Coeficientes de dilatación absoluta del mercurio. -Para determinar el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio, era preciso evitar la influencia de la dilatación del vaso que lo contenía, que es lo que han conseguido Dulong y Petit, apoyándose en el principio de hidrostática que dice, que en dos vasijas comunicantes, las alturas de los dos líquidos se hallan en razón inversa de sus densidades (90), principio que es independiente del diámetro de las vasijas, y por lo tanto de su dilatación.

Componiase el aparato de estos físicos, de dos tubos de vidrio A y B ([fig. 193](#)), mantenidos verticalmente por un pie de hierro, y reunidos por medio de un tubo capilar. Hallábase envuelto cada uno de los dos

tubos por un cilindro hueco de metal, el menor de los cuales D estaba lleno de hielo machacado, y el otro E de aceite que se iba calentando gradualmente por medio de una hornilla pequeña que el grabado representa abierta con objeto de que se vea el cilindro. Por último, los dos tubos A y B se encontraban llenos de mercurio, que se ponía al nivel cuando estaban a igual temperatura los tubos, si bien subía en el tubo B a medida que iba calentándose.

Sean ahora  $a$  y  $d$ , la altura y la densidad del mercurio en la rama A, a la temperatura de cero, y  $a'$  y  $d'$  las mismas cantidades para la rama B, a la temperatura de principio de hidrostática que antes hemos recordado, se obtiene  $a'd' = ad$ . Por otra parte sabemos que  $d' = d/1 + Dt$  (268, prob. 4), siendo D el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio; y reemplazando  $d'$ , por su valor en la igualdad anterior, resulta  $a'd/1 + Dt$ , de donde se deduce  $D = a' - a/at$ .

Esta última fórmula da el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio, después de medidas las alturas  $a$  y  $a'$  de este líquido en ambos tubos, y de conocer la temperatura  $t$  del baño en que se introduce el tubo B. En el experimento de Dulong y Petit medía esta temperatura un termómetro de peso P (274), cuyo mercurio se vertía en una cápsula C; y un catetómetro K (69) daba las alturas  $a$  y  $a'$ .

Valiéndose de este procedimiento encontraron Dulong y Petit que el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio entre cero y 100 grados, es  $1/5550$ , y observaron además que crece con la temperatura. Entre 100 y 200 grados, el coeficiente medio es  $1/5425$ ; y entre 200 y 300, es igual a  $1/5300$ . Igual fenómeno se observa en los demás líquidos, lo cual quiere decir que no se dilatan con regularidad estos cuerpos. Se ha comprobado que su dilatación es tanto más irregular, cuanto más se acercan a la temperatura de congelación o de ebullición. Por lo que hace al mercurio, se cercioraron Dulong y Petit de que desde  $-36$  a 100 grados era muy sensiblemente regular su dilatación.

273. Coeficiente de dilatación aparente del mercurio. -El coeficiente de dilatación aparente de un líquido varía con la naturaleza del receptáculo. El del mercurio en el vidrio, se ha determinado por Dulong y Petit por medio del aparato representado en la [fig. 194](#). Se compone de un receptáculo cilíndrico de vidrio al cual se suelda un tubo capilar encorvado en ángulo recto y abierto por su extremidad.

Para hacer la experiencia, se pesa vacío el instrumento, y después lleno de mercurio a cero, de suerte que la diferencia entre las dos pesadas da el peso P del mercurio contenido en el aparato. Comunicándole en seguida una temperatura conocida  $t$ , se dilata el mercurio, vertiéndose cierta cantidad de este líquido, que se recoge en una capsulita y se pesa. Si representamos por  $p$  el peso del mercurio vertido, claro está que el del que queda en el aparato es  $P-p$ .

Al recobrar el instrumento la temperatura cero, por el enfriamiento del mercurio, se origina en el receptáculo un vacío que representa la contracción del peso del mercurio  $P-p$ , de  $t$  a  $0$ , o lo que es lo mismo la dilatación de este mismo peso de  $0$  a  $t$ ; es decir, que el peso  $p$  representa la dilatación por  $t$  grados del peso  $P-p$ . Pero, si el peso  $p-p$  tomado a cero, se dilata en el vidrio de una cantidad  $p$  hasta  $t$  grados, una sola unidad de peso se dilatará en las mismas condiciones de  $p/P-p$ , respecto a  $t$  grados y de  $p/(P-p)t$ , con relación a un solo grado; por consiguiente,  $p/(P-p)t$  representará el coeficiente de dilatación aparente del mercurio en el vidrio. Así pues, representando este coeficiente por  $D'$ , tenemos  $D' = p/(P-p)t$ .

Dulong y Petit encontraron así, que el coeficiente de dilatación aparente del mercurio en el vidrio es  $1/6480$ .

274. Termómetro de peso. -El aparato representado en la [fig. 194](#) ha recibido el nombre de *termómetro de peso*, porque del peso del mercurio vertido se puede deducir la temperatura alcanzada por el instrumento. En efecto, habiéndonos conducido el experimento, poco ha mencionado, a la fórmula  $p/(P-p) = 1/6480$ , se encuentra, haciendo desaparecer los denominadores,  $p \times 6480 = (P-p)t$ , de donde  $t = p \times 6480 / (P-p)$ ; de cuya fórmula se deduce  $t$ , una vez conocidas P y p.

275. Coeficiente de dilatación del vidrio. -Como la dilatación absoluta de un líquido es igual a la aparente, más la dilatación del receptáculo, se ha obtenido el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio, tomando la diferencia entre el coeficiente de la dilatación absoluta del mercurio y el de la aparente del mismo: es decir, que el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio es igual a  $1/5550 - 1/6480 = 1/38700 = 0,00002584$ .

M. Regnault ha comprobado que el coeficiente de dilatación varía con las diferentes especies de vidrio, como también con la forma de los receptáculos. Este sabio encontró que el coeficiente del vidrio ordinario de los tubos de química es 0,0000254.

276. Coeficiente de dilatación de los diversos líquidos. -El coeficiente de dilatación aparente de todos los líquidos se puede determinar por el procedimiento del termómetro de peso (274); y si se desea luego determinar el coeficiente de dilatación absoluta, se añade a aquél el coeficiente de dilatación del vidrio, según se deduce claramente de la relación que media entre estos tres coeficientes (275).

*Dilatación aparente de algunos líquidos, desde cero a 100 grados.*

Mercurio.	0,01543	Esencia de trementina.	0,07
Agua destilada.	0,0466	Éter sulfúrico.	0,07
Agua saturada de sal común.	0,05	Aceites fijos.	0,08
Ácido sulfúrico.	0,06	Alcohol.	0,11
Ácido clorhídrico.	0,06	Ácido nítrico.	0,11

Representando estos números la dilatación total de 0 a 100 grados, sería necesario dividirlos por 100 para obtener la dilatación para un solo grado, o el coeficiente de dilatación; pero los resultados así obtenidos no representarían más que el coeficiente de dilatación media de los líquidos, porque éstos, dilatándose muy irregularmente, su coeficiente va siempre creciendo, a contar desde cero; el mercurio debe exceptuarse, pues su dilatación es sensiblemente regular desde 0 a 100 grados, y también el agua, que se contrae al principio y se dilata en seguida, según luego veremos (279).

277. Aplicación del termómetro de peso para la medida de las dilataciones cúbicas. -Dulong y Petit han aplicado el método del termómetro de peso a la investigación de los coeficientes de la dilatación cúbica. Para esto, eligieron un tubo de vidrio bastante grueso, en el cual introdujeron, en forma de prisma prolongado, la sustancia cuyo coeficiente de dilatación era objeto de sus investigaciones, después de haber determinado su peso y densidad, y por consiguiente, su volumen. Hecho esto, por medio del soplete alargaban y daban una curva al extremo del tubo, para prestarle la forma exacta de un termómetro de peso (fig. 195), llenando por último con mercurio el espacio que había quedado vacío en el tubo, no sin determinar el peso P de aquel líquido a 0° y contenido en el aparato.

El experimento era después absolutamente idéntico al efectuado con el termómetro de peso: el aparato se elevaba a una temperatura conocida  $t$ ; el mercurio y el cuerpo contenidos en el tubo dilatándose más que el vidrio, originaban la salida de un peso  $p$  de mercurio, el cual se averiguaba, quedando tan sólo por formular, una ecuación, fácil de expresar, que manifestase que el volumen del mercurio vertido era igual a la dilatación del cuerpo, sumada con la del mercurio, menos la del vidrio, y como son conocidas las dilataciones del mercurio y del vidrio, de ellas se dedujo la del cuerpo contenido en el tubo.

278. Corrección de la altura barométrica. -Se ha indicado ya en el artículo *Barómetro* (156), que si se quiere que las indicaciones de este instrumento sean comparables entre sí en diversos lugares y en diferentes estaciones, es preciso reducir siempre la columna de mercurio a una temperatura constante, que es la del hielo fundente. Esta corrección se hace por medio del cálculo que sigue.

Sean A la altura del barómetro a  $t$  grados, y  $a$  dicha altura a cero. Si representamos por  $d$  la densidad del mercurio a cero, y por  $d'$ , la misma a  $t$  grados, sabemos (150) que las alturas A y  $a$  se hallan en razón inversa de las densidades  $d$  y  $d'$ , es decir, que se tiene  $A/a = d/d'$  [1]. Mas si suponemos que vale 1 el volumen del mercurio a cero, el que tenga a  $t$  grados valdrá  $1+Dt$ , siendo D el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio. Hemos visto ya (261, prob. IV) que la relación de los volúmenes  $1+Dt$  y 1 es igual a la relación inversa de las densidades  $d$  y  $d'$ , es decir, que se tiene  $d/d' = 1/(1+Dt)$ , [2]. De las igualdades [1] y [2] resulta  $a/A = 1/(1+Dt)$ , de donde  $a = A/(1+Dt)$ , o reemplazando D por su valor  $1/5550$ , se tiene,  $a = A/(1+t/5550) = A \times 5550 / (5550 + t)$ .

En este cálculo se debe tomar el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio, y no el aparente, porque el valor de A es el mismo que si no se dilatase el vidrio, por ser la altura del barómetro independiente del diámetro del tubo (83), y por lo tanto, de su dilatación.

Como aplicación de la fórmula indicada, supongamos que siendo 25 grados la temperatura, y 0m,75 la altura del barómetro, se pide que se calcule la altura a cero.

$$a = 5550 \times 0,75 / 5550 + 25 = 4162,1 / 5550 = 0,746.$$

En la fórmula que hemos consignado antes, despreciamos la dilatación de la escala del barómetro: si quiere apreciarse, representando por  $k$  el coeficiente de dilatación de esta escala cuando la temperatura descienda de  $t$  grados a cero, la escala se contraerá en la relación de 1 a  $1+kt$ , por consiguiente, el valor de  $h$  obtenido antes, debe multiplicarse por  $1+kt$  lo que da para su exacto valor

$$a = A(1+kt) / 1 + Dt, \text{ o } a = A \times 5550(1+kt) / 5550 + t$$

279. Máximum de densidad del agua. -El agua ofrece el notable fenómeno de que, cuando baja su temperatura, sólo se contrae hasta 4 grados; pues aun cuando continúe el enfriamiento, no sólo cesa la contracción, sino que el líquido aumenta de volumen hasta el punto de la congelación, que se verifica a cero, de suerte que a 4 grados presenta el agua el máximum de condensación.

Muchos son los procedimientos que han empleado para determinar la temperatura del máximum de densidad del agua. Hope, físico escocés efectuó el siguiente experimento: tomó un vaso profundo con dos tubuluras laterales puestas en comunicación con su parte interior, en las cuales fijó dos termómetros; es decir, uno en la superior y otro en la inferior (fig. 179), y después de haber llenado el vaso de agua a 0°, lo situó en una atmósfera de 15°. Al calentarse la masa de agua, el termómetro inferior fue el primero que marcó 4°, mientras que el superior se sostenía a 0°. Después invirtió el experimento: es decir, que llenó el vaso de agua a 15°, lo situó en una atmósfera de 0°. En este caso el termómetro inferior al llegar a 4°, permaneció estacionario durante muchas horas, mientras que el superior se enfriaba hasta 0°. Estas dos experiencias prueban de una manera evidente que a 4° el agua es más densa que a 0°, puesto que en las dos el agua a 4°, ocupa la parte inferior del vaso.

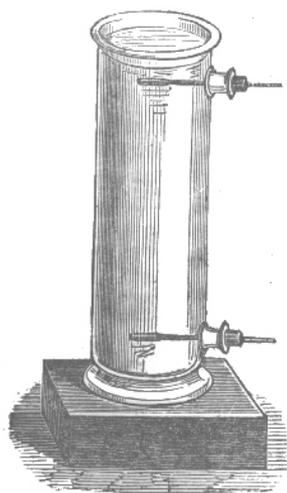


Fig. 106.

Mucho después, Hallström pesó en el agua elevada a diferentes temperaturas una esfera de vidrio lastrada de arena, y apreciando la dilatación del vidrio, encontró que en el agua a 4°, la pérdida de peso de la esfera era más notable, de cuyo hecho dedujo que a dicha temperatura se verificaba el máximum de densidad.

Pero M. Despretz se cercioró por otro método, que dicho fenómeno se verifica a 4 grados. Sirviose al efecto de un termómetro de agua, es decir, que contenía agua en vez de mercurio. Enfriándole gradualmente en un baño cuya temperatura daba a conocer un termómetro de mercurio, se convenció de que realmente tenía lugar a 4 grados, en el termómetro de agua, el máximum de contracción.

▽△

## Capítulo IV

▽△

## Dilatación y densidad de los gases

280. Método de Gay-Lussac; sus leyes. -Los gases son los cuerpos más dilatables, y al mismo tiempo, los de dilatación más regular. Por otra parte, tomando como coeficiente de dilatación de los gases, de igual manera que para los sólidos y los líquidos, el aumento de la unidad de volumen de cero a 1 grado, se halla que los coeficientes de dilatación de los diversos gases no difieren entre sí más que en calidades muy pequeñas, y por último, que sólo puede considerarse en estos cuerpos la dilatación cúbica.

Gay-Lussac fue el primero que midió el coeficiente de dilatación de los gases por medio de un aparato (fig. 197), que se compone de una caja rectangular, de hoja de lata, de unos 40 centímetros de longitud, y llena de agua, cuya temperatura puede variar. En medio del agua se ve un termómetro de aire formado por un receptáculo esférico A, y un tubo capilar AB. Este último se halla dividido de antemano en partes de igual capacidad (244), y se determina cuántas partes de éstas contiene el receptáculo A, lo cual se consigue pesando el aparato lleno de mercurio a cero, y calentándolo luego ligeramente para hacer salir un poco de mercurio. Una nueva pesada dará el peso del mercurio que se ha vertido. Enfriando hasta cero el que queda, se produce, en el tubo AB, un vacío que da a conocer el volumen correspondiente al peso derramado. Dedúcese de él en seguida el volumen del mercurio que no salió del aparato, y de consiguiente, el volumen del receptáculo, mediante el mismo cálculo que empleamos para determinar el volumen del piezómetro (pág. 58).

Faltaba aún llenar de aire seco la esfera y el tubo. Consegúase esto llenándolos primero de mercurio (245), que se hacía hervir en la misma esfera para secarle, y colocando luego en la extremidad del vástago, por medio de un tapón, un tubo C lleno de sustancias secantes, como, por ejemplo, de cloruro de calcio. Introducíase entonces en el vástago AB, al través del tubo C, un alambrito de platino, con objeto de que, agitándole en el tubo, o inclinándolo al mismo tiempo este último, saliera gota a gota el mercurio, al dar ligeras sacudidas al aparato, con lo cual se conseguía que entrase el aire entonces de burbuja en burbuja, pero después de haberse secado previamente en el cloruro de calcio. Finalmente, se tenía la precaución de conservar en el vástago AB un pequeño índice de mercurio.

Dispuesto todo de esta suerte, se colocaba el termómetro en la caja rectangular de hoja de lata, la cual, estando primero llena de hielo fundente, determinaba la contracción del aire, y el índice B avanzaba hacia el receptáculo A. En el punto en que se quedaba estacionario se ponía una señal, con objeto de determinar el volumen de aire a cero, supuesto que era conocida la capacidad de aquél. Quitábase entonces el hielo para poner de nuevo agua o aceite, y se exponía al fuego la cuba, con lo cual se dilataba el aire de la caja, y corría el índice de A hacia B. Puesta otra señal en el punto en donde se estacionaba, e indicados al mismo tiempo los grados de calor por medio de dos termómetros D y E, se conocía el volumen del aire y su temperatura.

Si suponemos en primer lugar que no haya variado la presión atmosférica durante el experimento, y si despreciamos la dilatación del vidrio, que es muy pequeña, queda conocida la dilatación total del aire en el aparato, restando del volumen que tomó al fin del experimento el que tenía a cero. Dividiendo entonces por la temperatura final, se obtiene la dilatación respecto a 1 grado; y últimamente, dividiendo por el número de unidades contenidas en el volumen a cero, resultará la dilatación correspondiente a un solo grado, es decir, el coeficiente de dilatación.

Ya se verá, en los problemas que siguen (281), de qué manera se hacen las correcciones de presión y de temperatura, cuando no se desprecian las variaciones de la presión atmosférica y la dilatación del vidrio durante el experimento.

Sirviéndose Gay-Lussac del aparato que acabamos de describir, había encontrado que el coeficiente de dilatación del aire era 0,00375, pero después se averiguó, empleando métodos más exactos, que era exagerado dicho número, y que el verdadero valor del coeficiente de dilatación del aire es el de 0,00366.

Además Gay-Lussac había sentado, acerca de la dilatación de los gases, las dos leyes siguientes, notables por su sencillez:

1.<sup>a</sup> *Todos los gases poseen el mismo coeficiente de dilatación que el aire;*

2.<sup>a</sup> Este coeficiente conserva el mismo valor, sea cual fuere la presión que experimentan los gases.

Pero pronto veremos (282) que no pueden admitirse de un modo riguroso estas leyes, y que sólo expresan aproximadamente el fenómeno de la dilatación de los gases.

281. Problemas acerca de la dilatación de los gases. -I. El volumen de un gas a cero, es  $V$ ; ¿cuál será el que tenga a  $t$  grados, siendo  $a$  el coeficiente de dilatación y permaneciendo constante la presión?

Sea  $V'$  el volumen buscado. Si repetimos ahora el mismo raciocinio que en la dilatación lineal (267), se obtiene fácilmente  $V' = V + aVt$ , o  $V' = V(1 + at)$  [1].

II. El volumen de un gas es  $V'$  a  $t$  grados; ¿cuál será su volumen  $V$  a cero, permaneciendo invariable la presión, y siendo  $a$  el coeficiente de dilatación?

Esta cuestión se resuelve por medio de la fórmula anterior [1], pues dividiendo sus dos miembros por  $(1 + at)$  resulta

$$V = V' / (1 + at) \text{ [2].}$$

III. Conociendo el volumen  $V'$  de un gas a  $t$  grados, calcúlese su volumen  $V''$  a  $t'$  grados bajo el supuesto de que no varía la presión.

Primero se reduce a cero el volumen por medio de la fórmula [2], obteniéndose así  $V / (1 + at)$ ; y luego se le calcula de cero a  $t'$  grados, haciendo uso de la fórmula [1], de manera que el resultado final es

$$V'' = V' (1 + at') / (1 + at) \text{ [3].}$$

IV. El volumen de un gas a  $t$  grados y a la presión  $A$ , es  $V'$ ; ¿cuál será el volumen  $V$  de la misma masa de gas a cero, y a la presión de  $0,76$ ?

Dos son en este problema las correcciones que deben hacerse, relativa la una a la temperatura, y la otra a la presión, si bien es indiferente comenzar por ésta o por aquélla. Si se principia por la corrección de temperatura, será el volumen a cero, en virtud de la fórmula [2]  $V = V' / (1 + at)$  [2], pero todavía a la presión  $A$ . Se reduce ésta a la de  $0,76$ , sentando, según la ley de Mariotte (162),  $V \times 0,76 = V' / (1 + at) \times A$ , de donde  $V = V' A / (1 + at) 0,76$  [4].

Vamos a resolver, como aplicación numérica, la cuestión siguiente: Dados 8 litros de aire a 25 grados y a la presión de  $0,74$ ; ¿cuál será el volumen a cero y a la presión de  $0,76$ ?

Procediendo primero a la corrección de presión, se obtiene  $x/8 = 74/76$ ; de donde  $x = 74 \times 8 / 76 = 7 \text{ lit., } 789$ .

El volumen que así se obtiene, es a la presión de  $0,76$ , pero todavía a 25 grados; de manera que hay que reducirle a cero. Al efecto, sirve la fórmula [2], que da, para el volumen buscado,  $V = 7,789 / (1 + 0,00366 \times 25) = 7,789 / 1,0913 = 7 \text{ lit., } 136$ .

También se podría usar directamente la fórmula [4], reemplazando  $A$ ,  $V'$ ,  $a$  y  $t$  por sus valores.

V. El volumen de un globo de vidrio es  $V'$  a  $t$  grados; ¿cuál será su volumen  $V$  a cero?

Para resolver esta cuestión, se supone que un globo de vidrio se dilata por efecto de una determinada variación de temperatura, una cantidad igual a la que se dilataría una masa llena de vidrio del mismo volumen. Representando en tal caso por  $d$  el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio, y por  $V$  el volumen del globo a cero, se tendrá, como en el problema I,  $V' = V + dVt = V(1 + dt)$ , de donde  $V = V' / (1 + dt)$ .

VI. Cierta volumen de gas a  $t$  grados pesa  $P'$ ; ¿cuál será su peso a cero?

Sea  $P$  el peso que se busca, a el coeficiente de dilatación del gas,  $d'$ , su densidad a  $t$  grados, y  $d$  su densidad a cero. Como los pesos son proporcionales a las densidades, se obtiene la igualdad  $P'/P=d'/d$ . Si se representa por  $V$  un cierto volumen de gas dado a cero, el que tenga a  $t$  grados será  $V(1+at)$ ; y estando las densidades en razón inversa de los volúmenes (41), resulta  $d'/d=1/(1+at)$ . Como estas dos igualdades tienen un miembro común, se deduce de ellas  $P'/P=1/(1+at)$ , de donde  $P=P'(1+at)$ .

De esta última igualdad resulta también  $P'=P/(1+at)$ , que es la fórmula que da el peso a  $t$  grados cuando se conoce el peso a cero y que manifiesta que el peso  $P'$  se halla en razón inversa del binomio de dilatación  $1+at$ .

VII. Calcúlese el peso  $P$  de nitrógeno que cogería, a  $32^\circ$ , en un globo de vidrio, cuyo volumen, a cero, es 12lit.,4; el coeficiente de dilatación del nitrógeno es 0,003668, el lineal del vidrio 0,00000861, el peso específico del nitrógeno 0,9714, y la presión atmosférica 0m,76.

Sean  $k$  el coeficiente de dilatación lineal del vidrio, y  $V$  el volumen del globo a cero, su volumen a  $t$  grados será  $V(1+2kt)$  (263 y 267). Para encontrar el peso de nitrógeno contenido en el globo, hay que tener presente que un litro de aire a cero y a la presión de 0m,76, pesa 1gr,3 y que otro de nitrógeno a la misma presión y temperatura pesará  $1gr,3 \times 0,9714$ , puesto que 0,9714 es el peso específico del nitrógeno con relación al aire. De consiguiente, un litro de nitrógeno pesa a  $t$  grados  $1gr,3 \times 0,9714/(1+at)$  (probl. VI), siendo  $a$  el coeficiente de dilatación del nitrógeno. Por lo tanto, el peso pedido es  $1gr,3 \times 0,9714/(1+at) \times V(1+2kt)$ . Sustituyendo en vez de  $V$ ,  $k$ ,  $t$  y  $a$ , sus valores, resulta  $P=14gr,025$ .  
282. Método de M. Regnault. -Cuatro son los procedimientos de que sucesivamente se ha valido M. Regnault para determinar el coeficiente de dilatación de los gases. En unos era constante la presión y variable el volumen del gas, como en el procedimiento de Gay-Lussac; y en otros no se alteraba el volumen, pero podía variar la presión. Sólo describiremos el primer procedimiento que puso en practica M. Regnault, si bien ya le habían dado a conocer Dulong y M. Rudberg, en el cual es constante la presión. Mas lo que sobre todo caracteriza los experimentos de M. Regnault, es el esmero con que se evitan las causas de error. Consta su aparato de un receptáculo cilíndrico B (fig. 198) bastante capaz, y con un tubo capilar encorvado; dispónese, para llenarle de aire seco, según se ve en la figura, en una vasija de hoja de lata análoga o igual a la que sirve para fijar el punto 100 de los termómetros; y luego por medio de una tira de goma elástica, se enlaza el tubo capilar con una serie de tubos en forma de U llenos de sustancias desecantes. Terminan estos tubos en una pequeña bomba de aire, que sirve para hacer el vacío en ellos y en el depósito, el cual se halla rodeado de vapor de agua a 100 grados. En seguida se deja entrar lentamente el aire, se hace de nuevo el vacío, y así va repitiéndose sucesivamente esta operación. Consíguese de esta suerte, desecar por completo el aire del receptáculo B, pues la humedad adherida a las paredes se desprende en forma de vapor a la temperatura de  $100^\circ$ ; y además, el aire que entra cada vez que se hace el vacío, se seca al pasar por los tubos en forma de U.

Hecho esto, se deja transcurrir una media hora con objeto de que adquiera el aire la temperatura del vapor de agua, quitando luego los tubos en U, y cerrando a la lámpara la extremidad del tubito. Al mismo tiempo se anota la altura  $A$  del barómetro. Cuando se halla frío el depósito B, se le coloca en el aparato que representa la [figura 198](#), y se le rodea por completo de hielo, a fin de que baje a cero el aire que contiene, introduciendo la punta del tubo capilar en una cubeta C llena de mercurio. Cuando llega a cero el depósito B, se rompe con unas pequeñas pinzas la extremidad  $b$ , y como está enrarecido el aire interior, penetra en aquél el mercurio de la cubeta por el efecto de la presión atmosférica, y sube a una altura  $oG$  tal que, sumada con la fuerza elástica del aire que queda en el aparato, equilibra dicha presión. A fin de medir la altura de la columna  $Go$ , que representaremos por  $a$ , se hace descender una varilla móvil  $go$ , hasta que la punta  $o$  enrase con la superficie del mercurio en la cubeta, midiéndose luego con un catetómetro la diferencia de altura entre la punta  $g$  y el nivel del mercurio en G. Si a esta diferencia se añade la longitud de la varilla  $go$ , que es conocida, se tendrá la altura  $a$  de la columna  $Go$ . Finalmente, se cierra con un poco de cera la extremidad  $b$ , por medio de la pieza  $a$ , y se anota la presión  $A'$  indicada por el barómetro, de manera que la que experimenta el depósito B, es  $A'-a$ .

Tomadas estas medidas, se retira del hielo el instrumento, y se le pesa para obtener el peso  $P$  del mercurio que en él se introdujo. En seguida se llena este depósito de mercurio a cero, y se determina el peso  $P'$ , de este líquido, que se halla contenido, así en el depósito, como en el tubo.

Designando entonces por  $k$  el coeficiente de dilatación del vidrio, por  $a$  el del aire, y por  $D$  la densidad del mercurio a cero, se determina a por medio del cálculo siguiente. El volumen del depósito y del tubo a cero

es  $P'/D$ , en virtud de la fórmula  $P=VD$  (107); y por lo tanto, a  $t$  grados este volumen es  $P'/D(1+kt)$  (281, problema V), a la presión  $A$ , que es la que existía al tiempo de cerrar a la lámpara. Claro está, pues, que a la presión de 76, es  $P'(1+kt)A/D.76$  [1], según la ley de Mariotte. Atendiendo a la fórmula  $P=VD$ , el volumen del aire que queda en el depósito está representado  $P'-P/D$ , a cero y a la presión  $A'-a$ . A la misma presión, pero a  $t$  grados, será su volumen  $(P'-P/D)(1+at)$ , convirtiéndose a la presión de 76 en

$$(P'-P)(1+at)(A'-a)/D.76 [2].$$

Los volúmenes representados por las fórmulas [1] y [2], no son otra cosa más que el volumen del receptáculo y el del tubo a  $t$  grados y a la presión de 76, de manera que son iguales. Suprimiendo, por lo tanto el denominador común, resultan la ecuación  $P'(1+kt)A=(P'-P)(1+at)(A'-a)$  [3], de la cual se deduce el valor de  $a$ .

Operando de esta suerte, encontró M. Regnault de cero a cien grados y para presiones comprendidas entre 0m,30 y 0m,50, los coeficientes siguientes para variaciones de temperatura de un grado:

Aire.	0,00367	Ácido clorhídrico.	0,0036812
Hidrógeno.	0,0036678	Cianógeno	0,00368
Nitrógeno.	0,0036682	Ácido carbónico.	0,0036896
Ácido sulfuroso.	0,00367		

Estos números demuestran que los coeficientes de los gases no difieren más que en cantidades muy pequeñas. M. Regnault encontró además que, a una misma temperatura, la dilatación de un gas cualquiera, es tanto más considerable, cuanto mayor es la presión a que se halla sometido. Por fin, el mismo sabio observó que los coeficientes de dilatación de los gases difieren de una manera tanto más notable, cuanto más altas son las presiones a que éstos se encuentran sometidos.

283. Termómetro de aire. -*El termómetro de aire* está fundado, según su nombre lo indica, en la dilatación del aire. Cuando sólo debe medir cortas variaciones de temperatura, se le da la misma forma que al tubo de que se sirvió Gay-Lussac en la investigación del coeficiente de dilatación de los gases ([fig 197](#)); es decir, que se compone de un receptáculo de vidrio, que lleva soldado un largo tubo capilar. Una vez lleno de aire perfectamente seco el receptáculo, se hace pasar al tubo un índice de ácido sulfúrico teñido de rojo, graduándose luego el instrumento en grados centígrados, sin más que comparar la marcha del índice con la de un termómetro de mercurio. Pero es menester que permanezca abierta la extremidad del tubo, pues de lo contrario, como se condensaría o se dilataría el aire que se halla encima del índice al mismo tiempo que el del receptáculo, quedaría estacionario el índice. Resulta de lo expuesto, que la presión atmosférica ejerce su influencia en las indicaciones del termómetro de aire, de suerte que se requiere una corrección para cada una de sus observaciones.

Al querer medir variaciones de temperatura algo considerables, como ya entonces es muy importante el aumento de volumen, se adopta para termómetro de aire un tubo semejante al que ha servido para medir el coeficiente de dilatación de los gases en el aparato de M. Regnault ([fig. 198](#) y [199](#)). Operando con este tubo, como en el experimento del párrafo 282, se determinan las cantidades  $P$ ,  $P'$ ,  $A$ ,  $A'$  y  $a$ , que entran en la ecuación [3], y como  $a$  y  $k$  son datos conocidos, se deduce de dicha ecuación la temperatura  $t$  que ha de darse al tubo.

De las observaciones de M. Regnault resulta, que el termómetro de aire y el de mercurio van sensiblemente acordes hasta 260°, pero que en pasando de este término, se dilata el mercurio con mayor velocidad que el aire.

284. Densidad de los gases. -La *densidad* de un gas, o su *peso específico*, es la relación del peso de un volumen dado del gas con el peso de un volumen igual de aire, siempre que, tanto éste, como aquél, se hallen a cero y a la presión de 0m,76.

En virtud de esta definición, para conocer la densidad de un gas, debe buscarse el peso de un volumen determinado del mismo a cero y a la presión de 0m,76; luego el peso de un volumen idéntico de aire a

igual presión e igual temperatura; y finalmente, dividir el primer peso por el segundo. Sirve al efecto un globo de vidrio de 8 a 10 litros de capacidad, con una llave en el cuello que pueda atornillarse en la máquina neumática. Se pesa este globo sucesivamente, vacío, lleno de aire y, por fin, lleno del gas cuya densidad se busca. El aire y el gas se secan siguiendo el mismo procedimiento que en el aparato que representa la [figura 198](#). Restando el peso del globo vacío del que se obtuvo en las dos últimas pesadas, se obtiene el peso del aire y el del gas bajo un mismo volumen. Si durante estas diversas pesadas estuviese constantemente a cero la temperatura y a 0m,76 la presión, sólo habría que dividir el peso del gas por el del aire, y el cociente sería la densidad buscada. Pero el procedimiento que acabamos de dar a conocer, exige, en general, muchísimas correcciones para reducir los dos gases a cero, y a la presión de 0m,76, así como también para referir a cero el volumen del globo.

Para efectuar estas correcciones, debe operarse desde luego con gases secos, lo cual se obtiene haciéndolos pasar al través de varias materias desecantes antes de introducirlos en el globo; además, para despojar al aire del ácido carbónico que contiene, debe cruzar cierta cantidad de potasa cáustica. Por otra parte, como jamás, por mucha que sea su perfección, efectúan un vacío perfecto las máquinas neumáticas, para no tener en cuenta en las pesadas el gas que queda en el globo, se efectuará el vacío cada vez, hasta que la probeta marque la misma tensión  $e$ .

Hecho esto, se efectúa el vacío en el globo, dejando después entrar el aire seco, operando de esta suerte repetidas veces, hasta que el globo se encuentre perfectamente despojado de humedad. En este caso, verificando el vacío por última vez, hasta que la probeta marque la tensión  $e$ , se pesa, y se obtiene el peso del globo vacío. En seguida se deja introducir lentamente el aire, cruzando éste los tubos que contienen cloruro de calcio y potasa, y se pesa nuevamente el globo, obteniéndose, por lo tanto, que su peso lleno es  $P$ . Representando por  $A$  la altura barométrica y por  $t$  la temperatura en el momento que se efectúa la pesada,  $P-p$  será, por consiguiente, el peso del aire contenido en el globo a la temperatura  $t$  y a la presión  $A$ .

Para relacionar este peso con la presión 760 y con la temperatura 0, sean  $x$  el coeficiente de dilatación del aire, y  $k$  el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio. Según la ley de Mariotte, el peso, que es  $P-p$  a la presión  $A-e$ , será a la presión 760,  $(P-p) 760/A-e$ , suponiendo constante la temperatura  $t$ . Pero si ésta se reduce a 0, la capacidad del globo disminuirá según la relación de 1 a  $(1+at)$ , como se deduce de los problemas V y VI (278). Por consiguiente, el peso del aire contenido en el globo a 0 y a la presión 760, es

$$(P-p) 760/A-e 1+at/1+kt [1].$$

Sean igualmente  $a'$ , el coeficiente de la dilatación del gas, cuya densidad se busca,  $P'$  el peso del globo lleno de dicho gas, a la temperatura  $t'$  y a la presión barométrica  $A'$ , y finalmente,  $p'$  el peso del globo vacío, cuando se ha extraído el gas hasta la presión  $e$ ; el peso del gas contenido en el globo, a la presión 760 y a la temperatura 0, se representará por

$$(P'-p')760/A'-e 1+a't'/1+kt' [2].$$

Dividiendo la fórmula [2], por la [1], tendremos para la densidad que se buscaba

$$D=(P'-p')(A-e)(1+a't')(1+kt)/(P-p)(A'-e)(1+at)(1+kt').$$

Si durante el experimento no varían ni la temperatura, ni la presión, se tendrá:

$$D=(P'-p')(1+a't)/(P-p)(1+at);$$

y finalmente, si suponemos  $a=a'$ , se reducirá a  $D=P'-p'/P-p$ .

285. Método de M. Regnault para encontrar la densidad de los gases. -M. Regnault ha modificado algún tanto el anterior procedimiento, consiguiendo así el poder prescindir de una parte de las correcciones. Se equilibra al efecto el globo que sirve para pesar los gases, y que está suspendido del platillo de una balanza, con un segundo globo de igual volumen y herméticamente cerrado, que se deja pendiente del otro platillo. Como estos globos se dilatan a la par, desalojan siempre la misma cantidad de aire, en términos de no ejercer influencia alguna en las pesadas las variaciones atmosféricas de presión y de

temperatura. Por último, cuando el primer globo se llena de aire y del gas cuya densidad se busca, se le coloca en una vasija de zinc rodeada de hielo, pues así se encuentra a la temperatura del hielo fundente, bastando no cerrar la llave hasta tanto que el mismo gas introducido se encuentre a cero, para evitar las correcciones de temperatura. Practicado todo esto, sólo falta ya reducir los pesos de ambos gases a la misma presión de 0m,76, fundándose en que dichos pesos son proporcionales a las presiones.

286. Densidad de los gases que atacan al cobre. -Para los gases que atacan al cobre, como, por ejemplo, el cloro, no pueden usarse los globos con llave, sino que es preciso recurrir a un frasco de tapón esmerilado, al cual se hace llegar el gas por medio de un tubo encorvado que se introduce hasta su fondo, cuidando de mantener al frasco en su posición natural o invertido, según sea el gas más o menos pesado que el aire. Luego que se juzga que se ha expulsado todo el aire, se quita el tubo y se cierra el frasco, pesándolo en seguida. El peso que así se obtiene comprende el del frasco, más el del gas, menos el del aire desalojado (273). Fácil es determinar el peso del frasco, y si se le mide, buscando el volumen de agua que contiene, se deduce su volumen, y de consiguiente, el peso del aire que desaloja. Por lo tanto, si del peso obtenido al pesar el frasco lleno de gas, restamos el del frasco y añadimos el del aire desalojado, resulta el peso que se buscaba. Ya no falta, pues, más que dividir el peso del gas por el del aire, cuidando, sin embargo, de hacer las correcciones de temperatura y de presión necesarias para reducir los dos pesos al mismo volumen, a la misma presión y a una temperatura igual.

*Densidades de los gases a cero y a la presión de 0m,76, sirviendo de unidad la del aire.*

Aire.	1	Ácido sulfhídrico.	1,1912
Hidrógeno.	0,0692	Ácido clorhídrico.	1,254
Hidrógeno protocarbonado.	0,559	Protóxido de nitrógeno.	1,527
Amoniaco.	0,5367	Ácido carbónico	1,529
Óxido de carbono.	0,967	Cianógeno.	1,86
Nitrógeno	0,9714	Ácido sulfuroso	2,2474
Bióxido de nitrógeno.	1,039	Cloro.	3,44
Oxígeno.	1,1056	Ácido iodhídrico.	4,443

▽△

## Capítulo V

▽△

### Cambios de estado, vapores

Fusión, sus leyes. -Varios son los fenómenos que presentan los cuerpos que se hallan bajo la influencia del calórico, pero hasta ahora sólo hemos tratado de su dilatación. Principiando por los sólidos, es fácil reconocer que tiene ésta un límite; pues, efectivamente, a medida que absorbe un cuerpo mayor cantidad de calórico, aumenta la fuerza repulsiva que ejerce este entre las moléculas, llegando al fin un momento en que es insuficiente la atracción molecular para mantener al cuerpo en estado sólido. Prodúcese en tal caso un nuevo fenómeno, que es la *fusión*, es decir, el tránsito del estado sólido al líquido por a influencia del calor.

Sin embargo, hay muchas sustancias, como el papel, la madera, la lana y ciertas sales, que no se funden por la acción de una alta temperatura, sino que se descomponen. Entre todos los cuerpos simples, sólo se conoce uno, que es el carbono, que no haya sido fundido hasta ahora, ni siquiera en los más intensos focos de calor. Con todo, M. Despretz consiguió, sometiéndolo a la acción de una corriente eléctrica muy poderosa, reblandecer este cuerpo hasta volverlo flexible, lo cual indica un estado próximo a la fusión.

La experiencia demuestra que la fusión de los cuerpos obedece constantemente a las dos leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> Todo cuerpo entra en fusión a una determinada temperatura, invariable para cada sustancia, si la presión es constante.

2.<sup>a</sup> Sea cual fuere la intensidad de un manantial de calor, cesa de subir la temperatura, permaneciendo constante desde el momento en que principia la fusión hasta que termina por completo.

*Temperaturas de fusión de diversas sustancias.*

Mercurio	-40°	Aleación de d'Arcet (1 de plomo, 1 de estaño y	
Hielo.	0	4 de bismuto).	91°
Sebo.	33	Azufre.	111
Fósforo.	44	Estaño.	228
Esperma de ballena.	49	Bismuto.	264
Potasio.	55	Plomo.	335
Ácido margárico.	57	Antimonio.	450
Estearina.	60	Zinc.	422
Cera blanca.	65	Plata.	1000
Ácido esteárico.	70	Oro.	1250
Sodio.	90	Hierro.	1500

M. Hopkins, en Inglaterra, se ha cerciorado hace poco experimentalmente de que la temperatura de fusión aumenta de un modo sensible a medida que aumenta la presión. Los cuerpos sobre los cuales ha experimentado son el azufre, la cera, la estearina y la esperma de ballena. M. W. Thomson ha observado lo contrario respecto al hielo; es decir, que desciende su punto de fusión, cuando aumenta la presión. Vemos pues, que la temperatura de fusión, para un mismo cuerpo, no es fija, como se había admitido, y que varía con la presión.

288. Calórico latente. -Como durante el tránsito de un cuerpo de sólido al estado líquido permanece fija la temperatura (287, 2.<sup>a</sup>), sea cual fuere la intensidad del foco, debemos deducir de aquí que, para cambiar de estado, absorben los cuerpos una considerable cantidad de calor, cuyo único objeto es mantenerlos en el estado líquido. Esta cantidad de calor, que no actúa sobre el termómetro, y que se combina en cierto modo con las moléculas de los cuerpos, se designa con el nombre de *calórico latente* o *calórico de fusión*.

El experimento que sigue es muy adecuado para dar una idea exacta de lo que debe, entenderse por calórico latente. Si mezclamos primero 1 Kilogramo de agua a cero con el mismo peso de agua a 79 grados, se obtienen inmediatamente 2 kilogramos de agua a 39½, es decir, a una temperatura media entre la de los dos líquidos mezclados, conforme podía preverse fácilmente, supuesto que ambos eran de igual naturaleza, e igual también su cantidad. Pero si mezclamos 1 kilogramo de hielo machacado con un peso idéntico de agua a 79 grados, al instante se funde el hielo, obteniéndose 2 kilogramos de agua a cero. Vemos, pues, sin cambiar de temperatura, y únicamente para fundirse, absorbe 1 kilogramo de hielo la cantidad de calor necesaria para elevar de cero a 79 grados 1 kilogramo de agua. Esta cantidad de calor representa, pues, el calórico de fusión o el calórico latente de hielo.

Cada líquido posee distinto calor latente, el cual se determina por medio del cálculo, según veremos en breve.

289. Disolución. -Un cuerpo se *disuelve* cuando se liquida por efecto de la afinidad que se ejerce entre sus moléculas y las de un líquido. La goma arábiga, el azúcar y la mayor parte de las sales se disuelven en el agua.

Durante la disolución, lo mismo que mientras se efectúa la fusión, es absorbida una cantidad más o menos considerable de calórico latente, circunstancia que explica, en general, por qué determinan las disoluciones de las sales un descenso de temperatura. Con todo, se nota en ciertas disoluciones que, no

sólo baja, sino que sube la temperatura, dependiendo esto de que se producen dos efectos simultáneos y contrarios. Es el primero el paso de sólido a líquido que ocasiona un descenso de temperatura; y el segundo la combinación del cuerpo disuelto con el líquido, que, como toda combinación química determina un desprendimiento de calor. Por lo tanto, según domine alguno de estos dos efectos, o según se compensen, se dejará sentir frío o calor, o bien permanecerá constante la temperatura.

290. Solidificación, sus leyes. -La *solidificación* o *congelación* es el paso del estado líquido o sólido. Este fenómeno se halla siempre sometido a las dos leyes siguientes que son las recíprocas de las de la fusión, y que se comprueban por medio de la experiencia.

1.º *La solidificación se efectúa en cada cuerpo a una temperatura fija, que es precisamente la de su fusión.*

2.ª *Desde el momento en que principia hasta que termina la solidificación, no varía la temperatura del líquido.*

Depende esta segunda ley de que el calórico latente absorbido durante la fusión queja libre al efectuarse la solidificación.

Muchos líquidos, como el alcohol y el éter, no se solidifican, aunque se les someta a los mayores fríos que pueden originarse.

Sin embargo, por un descenso de temperatura obtenido con una mezcla de óxido nitroso líquido, ácido carbónico y éter, M. Despretz consiguió dar al alcohol tal consistencia, que pudo volver la vasija que lo contenía sin que se vertiese.

291. Cristalización. -Por punto general, los cuerpos que pasan lentamente del estado líquido al sólido, afectan determinadas formas geométricas, llamadas *cristales*, como tetraedros, cubos, prismas, romboedros, etc. Si se solidifica un cuerpo en fusión, como el azufre o el bismuto, se dice que se efectúa la cristalización por *vía seca*; mas si se halla aquél disuelto en un líquido, se dice que tiene lugar por *vía húmeda*. Dejando que se evaporen lentamente los líquidos que tienen sales en disolución, se consigue que éstas cristalicen. La nieve, el hielo naciente y las sales, nos ofrecen ejemplos de cristalización.

292. Formación del hielo. -El agua destilada se solidifica a cero, tomando entonces el nombre de *hielo*; pero la congelación se opera con mucha lentitud, porque la parte que se solidifica cede su calórico latente al resto de la masa líquida.

El hielo presenta el singular fenómeno de ser menos denso que el agua; pues, en efecto, hemos, visto ya que, por el enfriamiento, no se contrae el agua sino hasta 4 grados (279), aumentando después de volumen a contar desde dicho punto hasta cero. Este aumento de volumen persiste y crece aun en el acto de la congelación, de manera que el volumen del hielo es 1,075 veces el del agua a 4 grados. Por efecto de esta expansión la densidad del hielo no es más que 0,930 de la del agua, y así es que flota en la superficie de este líquido.

El aumento de volumen que adquiere el hielo al formarse, va acompañado de una gran fuerza expansiva, que hace estallar las vasijas que lo contienen. Las piedras que se resquebrajan o parten después de una helada, lo efectúan a causa del agua que después de penetrar en sus poros se congela en ellos.

Para demostrar el físico inglés Williams la fuerza expansiva del hielo, colocó, en una atmósfera a muchos grados bajo cero, una bomba llena de agua, después de haber cerrado sólidamente su orificio con un tapón de madera. En el momento de la congelación fue lanzado el tapón con fuerza a gran distancia, formándose un reborde de hielo alrededor del orificio.

El agua no es la única sustancia que al solidificarse aumenta de volumen, y que es, por consiguiente; más densa en el estado líquido que en el estado sólido; puesto que el hierro fundido, el bismuto y antimonio presentan el mismo fenómeno.

Otras sustancias, por el contrario, tales como el mercurio, el fósforo, el azufre y la estearina, se contraen al solidificarse.

293. Retraso de la congelación del agua. -Las sales y otras sustancias disueltas en el agua, retardan la temperatura de la congelación de este líquido. Por ejemplo, el agua de mar no se solidifica hasta  $-2^{\circ},5$ .

Se puede retrasar muchos grados el punto de solidificación del agua pura, privándola del aire que ordinariamente lleva disuelto, y cuidando de que no se agite en lo más mínimo. En efecto, en una vasija rodeada de una mezcla frigorífica y situada debajo del recipiente de la máquina neumática, a fin de que se desprenda el aire, puede descender el agua a  $-12$  grados, y hasta una temperatura más baja sin solidificarse; pero basta imprimir entonces el más leve movimiento para que en seguida se congele parte del líquido, observándose el singular fenómeno de que la masa que queda líquida, sube en el momento a cero. Proviene esta elevación de temperatura, del calórico latente que deja en libertad la formación del hielo.

Una agitación demasiado rápida puede oponerse también a la congelación de los líquidos. Lo mismo sucede por cualquiera otra acción que trastornando las moléculas en su movimiento, no las permita agruparse según las condiciones que requiere el estado sólido. Así es que M. Despretz ha podido enfriar el agua en tubos muy capilares hasta  $-20^{\circ}$  sin congelarse. Esta experiencia puede servir para explicar cómo las plantas, en ciertos límites, resisten a las heladas supuesto que los vasos que contienen la savia son muy capilares. Finalmente, M. Monson, en Alemania, ha hallado que una presión muy enérgica puede, no tan sólo retardar la congelación del agua, sino impedir su completa realización.

294. Mezclas frigoríficas. -Se ha utilizado para producir fríos artificiales, más o menos intensos, la absorción del calórico en el estado latente por los cuerpos que pasan de sólidos a líquidos. Se consigue este resultado mezclando sustancias que tengan entre sí afinidad, y que una de ellas por lo menos sea sólida, tales como el agua y una sal, el hielo y una sal, o bien un ácido y una sal. Como la afinidad química acelera entonces la fusión, la parte que se funde quita al resto de la mezcla una gran cantidad de calórico que se hace latente, resultando de aquí un descenso de temperatura a veces muy considerable.

El cuadro siguiente indica las proporciones y la naturaleza de las sustancias que pueden emplearse para obtener un descenso determinado de temperatura.

SUSTANCIAS.	PARTES en peso	ENFRIAMIENTO.
Sulfato de sosa.	8	$+10^{\circ}$ a $-17^{\circ}$
Ácido clorhídrico.	5	$+10^{\circ}$ a $-17^{\circ}$
Hielo machacado o nieve.	2	$+10^{\circ}$ a $-18^{\circ}$
Sal marina o común.	1	$+10^{\circ}$ a $-18^{\circ}$
Sulfato de sosa.	3	$+10^{\circ}$ a $-19^{\circ}$
Ácido nítrico diluido.	2	$+10^{\circ}$ a $-19^{\circ}$
Sulfato de sosa.	6	$+10^{\circ}$ a $-26^{\circ}$
Nitrato de amoníaco.	5	$+10^{\circ}$ a $-26^{\circ}$
Ácido nítrico diluido.	4	$+10^{\circ}$ a $-26^{\circ}$
Fosfato de sosa.	9	$+10^{\circ}$ a $-29^{\circ}$
Ácido nítrico diluido.	4	$+10^{\circ}$ a $-29^{\circ}$

De frecuente uso son las mezclas frigoríficas en química, en física en la industria y en la economía doméstica. Hace ya algunos años que se fabrica, con el nombre de *garapiñera de familia*, un aparatito para obtener hielo en todas las estaciones, por medio de una disolución de sulfato de sosa en ácido clorhídrico, pues en una hora se forman de 5 a 6 kilogramos de hielo con 6 kilogramos de sal y 5 de ácido. Consiste el aparato en un cilindro metálico dividido en cuatro compartimientos concéntricos. En el centro se halla el agua que debe congelarse; sigue luego la mezcla frigorífica; a continuación una nueva cantidad de agua, y por último, en el compartimiento exterior se encuentra un cuerpo poco conductor, el

algodón, por ejemplo, que se opone a la absorción del calórico exterior. El medio más adecuado para utilizar una mezcla frigorífica consiste en formarla sucesivamente.

▽△

## Vapores; medida de su tensión

295. Vapores. -Hemos visto ya (138) que se da el nombre de vapores a los fluidos aeriformes en que por la absorción del calórico se trasforman muchos líquidos tales como el éter, el alcohol, el agua y el mercurio. Denominanse líquidos *volátiles* los que poseen la propiedad de poder pasar al estado aeriforme, y líquidos *fixos* los que no emiten vapor a ninguna temperatura, como los aceites grasos. Cuerpos sólidos hay, tales como el hielo, el arsénico, el alcanfor, y en general, las materias odoríferas, que emiten inmediatamente vapores, sin pasar por el estado líquido.

Los vapores son transparentes como los gases, y carecen, en general, de color; y sólo un corto número de líquidos colorados dan vapores, que son también colorados.

296. Vaporización. -El paso de un cuerpo del estado líquido al de vapor, se designa bajo el nombre general de *vaporización*; pero se entiende especialmente por *evaporación* toda producción lenta de vapor en la superficie de un líquido, y por *ebullición* una formación rápida de vapor en su misma masa. Pronto veremos que, bajo la presión ordinaria de la atmósfera, no se produce la ebullición, lo mismo que la fusión, sino a una temperatura determinada. No sucede otro tanto con la evaporación, que se opera para un mismo líquido a temperaturas muy diversas, si bien cesa, al parecer, toda vaporización al pasar de cierto enfriamiento. El mercurio, por ejemplo, deja de emitir vapores a una temperatura inferior a  $-10^{\circ}$ , y el ácido sulfúrico a la que sea inferior a 30.

297. Fuerza elástica de los vapores. -Los vapores, lo mismo que los gases, poseen una fuerza elástica, en virtud de la cual ejercen en las paredes de las vasijas que los contienen una presión más o menos considerable. Para demostrar la tensión de los vapores, y al mismo tiempo hacerla sensible a la vista, se llena de mercurio hasta su mitad un tubo de vidrio encorvado en forma de sifón ([fig. 200](#)); y haciendo pasar luego una gota de éter en la rama corta que está cerrada, se introduce el tubo en un baño de agua que tenga unos 45 grados. Entonces baja lentamente el mercurio en la rama menor, y el espacio AB se llena de un gas en un todo parecido al aire, y con una fuerza elástica que equilibra evidentemente la columna de mercurio CD, a la par que la presión atmosférica que se ejerce en D. El gas en cuestión no es más que el vapor de éter. Si se enfría el agua de la vasija, o lo que es igual, si se saca del baño el tubo, se nota que apareciendo rápidamente el vapor que llena el espacio AB, volviéndose a formar la gota de éter. Si, por el contrario, se calienta más el agua del baño, desciende el nivel del mercurio más allá del punto B, lo cual indica un aumento de tensión.

298. Formación de los vapores en el vacío. -En el experimento anterior se efectúa con lentitud el paso al estado de vapor, sucediendo también otro tanto cuando se expone al aire libre un líquido volátil, porque en ambas circunstancias es la presión, atmosférica un obstáculo para la vaporización. Pero si se ponen los líquidos en el vacío, entonces surgen de diverso modo los fenómenos, porque no encontrando ya resistencia alguna la fuerza elástica de los vapores es instantánea su formación. Demuéstrase esto introduciendo muchos tubos barométricos en una misma cubeta ([fig. 201](#)). Como todos están llenos de mercurio, se deja uno, el A, por ejemplo, para que sirva de barómetro, y luego se introducen respectivamente algunas gotas de agua, de alcohol y de éter, en los tubos B, D, E. Nótase que en el instante mismo en que penetra en cada uno de los tubos el líquido en el vacío barométrico, baja el nivel del mercurio, conforme se ve en la figura. No es el peso del líquido la causa de la depresión, porque no representa aquél más que una pequeñísima fracción del peso del mercurio desalojado: de suerte que debe admitirse para cada líquido una producción instantánea de vapor, cuya fuerza elástica ha repelido la columna mercurial.

Demuestra además dicho experimento que no es igual la depresión en los tres tubos, sino que es mayor en el tubo que contiene el alcohol que en el del agua, y mayor en el tubo con éter, que en los otros dos. Desde ahora pues, podemos sentar las dos leyes siguientes sobre la formación de los vapores:

1.<sup>a</sup> *En el vacío se evaporizan instantáneamente todos los líquidos volátiles.*

2.<sup>a</sup> *A igualdad de temperatura, los vapores de líquidos diferentes, no poseen la misma fuerza elástica.*

Por ejemplo, a 20 grados, la tensión del vapor de éter es casi 25 veces mayor que la del agua.

299. Vapores saturados, *máximo de tensión.* -Siempre que se introduce en el tubo de un barómetro un líquido volátil, tal como el éter, si es muy corta su cantidad, se evapora instantáneamente de un modo completo, de manera que la columna de mercurio no se deprime toda la cantidad de que es susceptible; porque si se hace penetrar una nueva cantidad de éter muy pequeña, se nota que aumenta la depresión. Continuando así, llega un momento en que el éter que entra en el tubo deja de vaporizarse, permaneciendo en el estado líquido. Esto nos indica que para una temperatura determinada hay un límite respecto a la cantidad de vapor que puede formarse en un espacio dado, circunstancia que se expresa diciendo que se halla *saturado* entonces dicho espacio.

Obsérvese además, que desde el momento en que cesa la vaporización del éter, se contiene la depresión del mercurio; de suerte que existe también un límite para la tensión del vapor, límite que, según demostraremos en breve, *varía con la temperatura, pero que para una temperatura dada es independiente de la presión.*

Para evidenciar que en un espacio cerrado saturado de vapor y que contiene líquido *en exceso*, siendo constante la temperatura, hay un *máximo de tensión*, del cual no puede pasar el vapor, sea cual fuere la presión, se hace uso de un tubo barométrico introducido en una cubeta profunda ([fig. 201](#)). Después de haber hecho pasar en dicho tubo, lleno en un principio de mercurio, una cantidad de éter suficiente para que no sólo se sature la cámara barométrica, sino que quede líquido en exceso, se observa la altura del mercurio en el tubo por medio de una escala fija en la cubeta. Ora se introduzca más el tubo, lo cual tiende a comprimir el vapor, ora se eleve, procediendo así a enrarecer este último, siempre permanece constante la altura de la columna mercurial. Es, por lo tanto, igual en ambos casos la tensión del vapor, supuesto que ni aumenta ni disminuye la depresión. Dedúcese de este hecho que, cuando está comprimido el vapor de un espacio saturado, vuelve parte al estado líquido; y que si, por el contrario, disminuye la presión, se vaporiza parte del líquido que quedó en exceso, saturándose de nuevo el espacio ocupado por el vapor; pero en muchos casos permanecen invariables la tensión y la densidad de este último.

300. Vapores no saturados. -Se deduce en vista de lo expuesto, que los vapores se presentan en dos estados bien distintos según se hallen o no saturados. En el primer estado, es decir, en el de su saturación, que es cuando se encuentran en contacto con el líquido que los origina, difieren completamente de los gases, puesto que respecto a una temperatura dada, no pueden ni comprimirse, ni dilatarse, permaneciendo constante su fuerza elástica y su densidad.

En el segundo estado, por el contrario, los vapores no saturados, que no se encuentran en contacto con el líquido que los origina, pueden compararse completamente con los gases, de los cuales poseen todas sus propiedades. En efecto, si repetimos la experiencia que anteriormente hemos descrito ([fig. 202](#)), introduciendo tan sólo en el tubo una pequeña cantidad de éter, de suerte que el vapor que origine no alcance el estado de saturación; y si hecho esto se levanta ligeramente el tubo, se nota que asciende el nivel del mercurio, lo cual indica que ha disminuido la fuerza elástica del vapor. Por el contrario, si se aumenta la inmersión del tubo, descendiendo el nivel del mercurio. Vemos pues, que el vapor en este caso actúa por completo como un gas, disminuyendo su tensión cuando aumenta el volumen, y creciendo aquélla cuando éste disminuye; y como sucede en los dos casos que hemos considerado, que el volumen que adquiere el vapor se halla en razón inversa de la presión, se deduce de aquí, que los *vapores no saturados se hallan sujetos a la ley de Mariotte.*

Finalmente, si se calienta un vapor no saturado, se nota en su aumento de volumen, el mismo orden que en el de los gases, y que el número 0,00366 que representa el coeficiente de dilatación del aire, puede tornarse sensiblemente como el que corresponde a los vapores.

Resumiendo, diremos, en vista de lo que antecede, que los vapores no saturados, son completamente semejantes a los gases, y que pueden aplicárseles todas las fórmulas relativas a la compresibilidad y a la dilatación de estos últimos. Pero no debe ponerse en olvido, que existe siempre un límite de presión o de

enfriamiento, respecto a los cuales los vapores no saturados pasan al estado de saturación, y que entonces aceptan un máximo de tensión y de densidad, el cual no puede excederse sino cuando hallándose los vapores en contacto con los líquidos que los originan, asciende su temperatura.

301. Tensión del vapor de agua bajo cero. -Para medir la fuerza elástica del vapor del agua a una temperatura inferior a cero, se sirvió Gay-Lussac de dos tubos barométricos llenos de mercurio e introducidos en una misma cubeta (fig. 203). Uno de ellos, recto y perfectamente purgado de aire y de humedad, mide la presión atmosférica, y el otro se halla encorvado de manera que parte de la cámara barométrica se introduzca en una mezcla frigorífica (294). Si se hace pasar un poco de agua al tubo encorvado, se nota que el nivel del mercurio en el mismo es más bajo que en el tubo A, según una cantidad que varía con la temperatura de la mezcla frigorífica.

A 0° la depresión es, en milímetros.	4,60
-10.	1,96
-20.	0,84
-30.	0,36

Estas depresiones, que dependen necesariamente de la tensión del vapor en la cámara barométrica BC, demuestran que, a temperaturas muy bajas, hay todavía vapor de agua en el aire.

Verdad es que, en el experimento que acabamos de citar, las partes B y C de la cámara barométrica en donde está el vapor, no participan ambas de la temperatura de la mezcla refrigerante; pero pronto veremos (305) que, cuando dos vasijas que comunican entre sí, ofrecen temperaturas desiguales, la tensión del vapor es igual en ambas, y corresponde siempre a la temperatura más baja de las dos que se consideran.

302. Tensión del vapor de agua entre cero y 100 grados. -*Procedimiento de Dalton.* -El físico inglés Dalton, que murió en 1844, midió la fuerza elástica del vapor de cero a 100 grados por medio del siguiente aparato: Dos tubos barométricos A y D (fig. 204) entran en una cápsula de hierro fundido, llena de mercurio y colocada en un hornillo. El barómetro B está completamente purgado de aire y de humedad, y en el A existe una corta cantidad de agua. Ambos barómetros se encuentran dentro de un cilindro de vidrio lleno de agua, y en el centro del mismo se ve un termómetro T, que mide la temperatura del líquido. Calentando gradualmente la cápsula, y por lo mismo el agua del cilindro, se vaporiza la que se halla en el tubo A, y a medida que aumenta la tensión del vapor desciende el mercurio. Anotando de grado en grado en una escala E la depresión que se observa en el tubo A, construyó por vez primera Dalton una tabla de las fuerzas elásticas del vapor de agua hasta 100 grados.

2.º *Procedimiento de M. Regnault.* -Poca es la precisión del aparato de Dalton, porque no puede darse exactamente la misma temperatura al líquido del cilindro en toda su longitud, de suerte que ya no es exacta la temperatura del vapor. M. Regnault modificó dicho aparato reemplazando el cilindro por una caja de palastro con dos tubos en el fondo para recibir las extremidades superiores de los barómetros A y B, sostenidas por láminas de goma elástica. Se echa en la caja agua caliente, de modo que cubra el vértice de los tubos, y según una temperatura, que varió en el experimento de M. Regnault, de cero a 50 grados. Por medio de un agitador se mezclan constantemente las diversas capas del líquido, a fin de obtener una temperatura uniforme en todas las partes del baño en que se hallan sumergidos los dos tubos barométricos. Por último, un cristal, entallado en las paredes de la caja, permite observar la diferencia de nivel del mercurio en los dos tubos. Por medio de este aparato se ha podido medir con precisión la fuerza elástica del vapor de agua desde cero a 50 grados; pero no hubiera sido posible aplicarlo a más altas temperaturas por razón de la corta profundidad del baño.

303. Tensión del vapor de agua a más de 100 grados, según Dulong y Arago. -Dos son los procedimientos que se usan para medir la fuerza elástica del vapor de agua a temperaturas superiores a 100 grados, debidos a Dulong y Arago el uno, en 1830, y a M. Regnault el otro, en 1844.

La figura 205 representa un corte vertical del aparato que utilizaron Dulong y Arago, en 1830, para medir la fuerza elástica del vapor de agua a temperaturas superiores a 100 grados. Consistía dicho aparatito en una caldera *k* de cobre, de 80 litros de capacidad y de paredes muy gruesas. Dos cañones de fusil *a*, de los que uno solo es visible en nuestro dibujo, se sumergían en el agua de la caldera, en cuyas paredes estaban

sólidamente asegurados. Dichos cañones, cerrados por su extremidad inferior, se encontraban llenos de mercurio, en el cual se colocaban termómetros  $t$  que daban a conocer la temperatura del agua y del vapor en la caldera. Mediase la tensión del vapor por medio de un manómetro de aire comprimido  $m$ , graduado experimentalmente de antemano y adaptado a una cubeta de hierro fundido  $d$  llena de mercurio. Para conocer la altura de este líquido en la cubeta, se hallaba ésta en comunicación, por su vértice y por su base, con un tubo de cristal  $n$ , en el cual el nivel era siempre igual al de la cubeta. Por último, un tubo de cobre  $i$  hacía comunicar la parte superior de la cubeta  $d$  con un tubo vertical  $c$  que partía directamente de la caldera, dando salida al vapor. El tubo  $i$  y la parte superior de la cubeta  $d$  estaban llenos de agua, que se conservaba constantemente a una temperatura baja, haciendo circular alrededor del tubo una corriente de agua fría, que fluía de un depósito representado a la derecha del dibujo.

Al desprenderse el vapor del tubo  $c$ , ejercía su presión sobre el agua del tubo  $i$ ; transmitíala, al agua y al mercurio de la cubeta  $d$ , y subía el mercurio en el manómetro. Observando de grado en grado el termómetro y el manómetro, midieron así directamente Dulong y Arago la tensión del vapor de agua hasta 24 atmósferas, evaluándola luego por el cálculo hasta 50.

304. Tensión del vapor de agua según una temperatura superior inferior a 100 grados, por M. Regnault. - El procedimiento de M. Regnault permite medir la tensión del vapor, cuando su temperatura es superior o inferior a 100 grados. Consiste en hacer hervir agua en una vasija, según una presión conocida, y en medir la temperatura a que entra en ebullición. Apoyándose luego en el principio de que, en el momento de efectuarse ésta, la fuerza elástica del vapor que se desprende es precisamente, igual a la presión que sufre el líquido, quedan conocidas la tensión del vapor y la temperatura correspondiente, que es el problema que se deseaba resolver.

Consta el aparato de una vasija de cobre C ([fig. 206](#)), herméticamente cerrada y llena de agua como cosa de un tercio. Cuatro termómetros atraviesan la tapadera, introduciéndose dos en las primeras capas del líquido y los otros dos en las inferiores. Del receptáculo C parte un tubo AB, que va a adaptarse a la boca de un globo de vidrio M, de 24 litros de capacidad y lleno de aire. Rodea al tubo AB un cilindro D, en el cual circula una corriente de agua fría que sale de un depósito E. De la parte superior del globo M parten dos tubos que comunican, el uno con un manómetro de aire libre O, próximo al aparato, y el otro HH', que es de plomo, con una máquina neumática o con una bomba impelente, según se quiera enrarecer o comprimir el aire del globo. Por último, la vasija K, que contiene al globo, se halla llena de agua a la temperatura del ambiente.

Supongamos que se trata primero de medir la fuerza elástica del vapor de agua a una temperatura inferior a 100 grados. Se fija la extremidad H' del tubo de plomo en la platina de una máquina neumática, para enrarecer el aire del globo M, y por lo tanto, del receptáculo C. En seguida se calienta éste suavemente, entra en ebullición el agua que contiene, a una temperatura tanto más inferior a 100 grados, cuanto más se ha enrarecido el aire, es decir, cuanto más débil es la presión que se ejerce sobre el líquido. Por otra parte, al condensarse los vapores en el tubo AB, que se enfría de una manera constante, no crece la presión que primitivamente indicó el manómetro, lo cual demuestra que la tensión del vapor durante la ebullición es igual a la presión le ejerce sobre el líquido.

Consultando entonces por un lado el manómetro, y por otro los termómetros, se determina, la tensión del vapor a una temperatura conocida. Dejando luego que entre un poco de aire en los tubos y en la caldera, a fin de aumentar la presión, se efectúa una nueva observación, y así se prosigue hasta 100 grados.

Si se trata de medir la fuerza elástica del vapor a una temperatura superior a 100 grados, se pone el orificio H' en comunicación con una bomba impelente, por medio de la cual se somete el aire del globo y de la caldera a presiones sucesivamente superiores a la de la atmósfera. Retárdase entonces la ebullición, bastando observar simultáneamente el manómetro y los termómetros, para conocer la tensión del vapor a una temperatura superior a 100 grados.

Las dos tablas siguientes dan a conocer la tensión del vapor de agua, según M. Regnault, de -30 grados hasta 100, y después desde 100 hasta 250. Los números de la primera tabla se han obtenido por medio del aparato que acabamos de describir.

La segunda se ha calculado por la fórmula de interpolación.

$$\log F = a + b a^t + c b^t,$$

en la cual F representa la fuerza elástica del vapor,  $t$  su temperatura y  $a, b, c, a, b$  constantes que se calculan principiando por determinar cinco fuerzas elásticas, es decir, cinco valores de F, correspondientes a temperaturas conocidas, lo cual da origen a tantas ecuaciones como incógnitas.

*Tensiones del vapor de agua, de -30 a 100 grados, según M. Regnault.*

TEMPERATURAS	TENSIONES	TEMPERAT.	TENSIONES	TEMPERAT.	TENSIONES	TEMPERAT.	TENSIONES
	en milímetros de mercurio a cero.		en milímetros de mercurio a cero.		en milímetros de mercurio a cero.		en milímetros de mercurio a cero.
-30	0,365	5	6,543	40	54,906	75	288,517
-25	0,553	10	9,165	45	71,391	80	354,643
-20	0,841	15	12,699	50	91,982	85	433,041
-15	1,284	20	17,391	55	117,478	90	525,45
-10	1,963	25	23,75	60	148,791	95	633,778
-5	3,001	30	31,548	65	186,945	100	700
0	4,6	35	41,827	70	233,093		

*Tensiones, en atmósferas, de 100° a 230°,9, según M. Regnault.*

TEMPERATURAS	NÚMERO	TEMPERAT.	NÚMERO	TEMPERAT.	NÚMERO	TEMPERAT.	NÚMERO
	de atmósferas.		de atmósferas.		de atmósferas.		de atmósferas.
100	1	170,8	8	198,8	15	217,9	22
120,6	2	175,8	9	201,9	16	220,3	23
133,9	3	180,3	10	204,9	17	222,5	24
144	4	184,5	11	207,7	18	224,7	25
152,2	5	188,4	12	210,4	19	226,8	26
159,2	6	192,1	13	213	20	228,9	27
165,3	7	195,5	14	215,5	21	230,9	28

Estas tablas demuestran que la fuerza elástica del vapor de agua crece siguiendo una ley mucho más rápida que la temperatura; pero hasta ahora se ignora cuál sea esta ley.

El agua es el único líquido cuyo valor, por la importancia de sus aplicaciones, ha fijado la atención de los físicos. La fuerza elástica de los vapores de los demás líquidos a diferentes temperaturas no se ha determinado aún, sabiéndose tan sólo que las sustancias en disolución, como las sales y los ácidos, disminuyen, en igualdad de temperatura, la fuerza elástica de los vapores, y tanto más, cuanto más concentrada es la disolución; porque entonces se efectúa la ebullición a una temperatura más elevada.

305. Tensión en dos vasijas comunicantes que se hallan a distintas temperaturas. -Cuando se ponen en comunicación dos vasijas cerradas, que contienen un mismo líquido a temperaturas desiguales, la tensión común de vapor que se establece en estas dos vasijas, no es, como pudiera creerse, la tensión media entre la que existía en cada vasija, por ejemplo, sean dos globos, el uno A ([fig. 207](#)) con agua que se mantiene a cero en hielo fundente; y el otro B con agua a 100 grados. Mientras no se comunican estos dos globos, la tensión es de 4,6 milímetros en el primero, y de 760 en el segundo, según las tablas anteriores; pero luego que se establece la comunicación, abriendo la llave C, el vapor de B se precipita en A, en virtud de su exceso de tensión; y como se va condensando inmediatamente, porque el último globo no pasa de cero, resulta que no puede adquirir el vapor, en el globo B, una tensión superior a la del globo A, es decir, a la que corresponde a cero, surgiendo tan sólo, por consiguiente, una destilación de B hacia A sin aumento de temperatura.

Podemos sentar, pues, el siguiente principio general: *Cuando dos recipientes, que contienen el mismo líquido en exceso y a temperaturas desiguales, comunican entre sí, la tensión del vapor es la misma en los dos, e igual a la tensión que corresponde a la temperatura más baja.* Pronto veremos cómo aplicó Watt este principio al condensador de las máquinas de vapor.

306. Evaporación; causas que la aceleran. -Se ha visto ya (296) que se entiende por *evaporación* una producción lenta de vapor en la superficie de un líquido. Por efecto de una evaporación espontánea se secan al aire libre las telas mojadas, y se consume por completo al cabo de cierto tiempo una vasija destapada y llena de agua. A la evaporación que se efectúa en la superficie de los mares, de los lagos, de los ríos y del suelo, deben su origen los vapores que se encuentran en la atmósfera, condensándose en ella para constituir las nubes y resolverse luego en lluvia.

Cuatro son las causas que influyen en la rapidez de la evaporación de un líquido, a saber: 1.<sup>a</sup> la temperatura; 2.<sup>a</sup> la cantidad de vapor del mismo líquido contenido ya en la atmósfera ambiente; 3.<sup>a</sup> la renovación de esta atmósfera, y 4.<sup>a</sup> la extensión de la superficie de evaporación.

El aumento de temperatura acelera la evaporación, por el exceso de fuerza elástica que determina en los vapores.

Para comprender la influencia de la segunda causa, obsérvese que sería nula la evaporación de un líquido en un espacio saturado del vapor del mismo líquido, y que llegaría a su máximo en un aire completamente purgado de dicho vapor. Claro está que entre estos dos casos extremos varía la rapidez de la evaporación según se halle ya más o menos cargada de los mismos vapores la atmósfera ambiente.

En cuanto a la renovación de esta atmósfera, se explica del mismo modo su efecto, porque si no se renueva el aire o el gas que rodea el líquido, se satura muy pronto, cesando la evaporación.

La influencia de la causa cuarta, es de todo punto evidente.

307. Ebullición; sus leyes. -Llámase, *ebullición* una producción rápida de vapor, según burbujas mayores o menores, en la misma masa de un líquido.

Cuando se calienta un líquido por la parte inferior, el agua por ejemplo, las primeras burbujas que aparecen, no son más que aire que se hallaba disuelto y que se desprende; pero muy pronto suben varias burbujitas de vapor de todos los puntos calentados de las paredes; mas, al cruzar las capas superiores se condensan sin llegar a la superficie, por ser más baja su temperatura. La formación y la condensación sucesivas de estas primeras burbujas de vapor ocasionan el ruido que ordinariamente precede a la ebullición. Por último elévanse gruesas burbujas que estallan en la superficie constituyendo el fenómeno de la ebullición ([fig. 208](#)).

Todos los líquidos susceptibles de entrar en ebullición obedecen las tres leyes siguientes, que se comprueban por medio de la experiencia:

1.<sup>a</sup> *La temperatura de ebullición aumenta con la presión;*

2.<sup>a</sup> *Para una presión dada no principia la ebullición hasta cierta temperatura, que varía según los líquidos, pero que, a igualdad de presión, es siempre la misma para un mismo líquido;*

3.<sup>a</sup> *Sea cual fuere la intensidad del foco de calor, permanece estacionaria la temperatura, a contar desde el momento en que principia la ebullición.*

*Temperatura de ebullición a la presión de 0m,76.*

Ácido sulfuroso.	-10°	Esencia de trementina.	150°
Éter clorhídrico.	11	Fósforo.	290
Éter sulfúrico.	37	Ácido sulfúrico concentrado.	325

Alcohol.	79 Mercurio (al termómetro de aire).	350
Agua destilada.	100 Azufre.	440

Muchas son las causas que pueden variar la temperatura de ebullición de un líquido, a saber: las sustancias en disolución, la naturaleza de las vasijas y la presión. Demos a conocer sucesivamente los efectos de estas diferentes causas, en particular respecto al agua.

308. Influencia de las sustancias en disolución sobre la temperatura de ebullición. -Una sustancia disuelta en un líquido cuando aquélla no es volátil, o siquiera lo es menos que este último, retarda la ebullición tanto más, cuanto mayor es la cantidad de sustancia disuelta. El agua, que hierve a 100 grados cuando es pura, sólo lo verifica a las temperaturas siguientes, cuando se halla saturada de diversas sales:

El agua saturada de sal marina hierve a...	109 grados.
- - de nitrato de potasa a...	116
- - de carbonato de potasa a...	135
- - de cloruro de calcio a...	179

Resultados análogos presentan las disoluciones ácidas; pero las sustancias que se hallan puramente en suspensión, como las materias térreas, el aserrín, etc., no elevan la temperatura de ebullición.

El aire disuelto en el agua ejerce también una influencia muy marcada sobre la temperatura de ebullición del agua. En efecto, Deluc ha sido el primero que ha observado que el agua purgada de aire por la ebullición y encerrada en un matraz de cuello largo, podía sufrir la temperatura de 112 grados sin entrar en ebullición. El mismo hecho ha sido comprobado por M. Donny y M. Galy-Casalat. Éste último físico, habiendo recubierto de una capa de aceite el agua purgada de aire por la ebullición, la ha sometido a 123 grados sin que, el líquido principiase a hervir; pero no tardó en surgir una violenta explosión de vapor, la cual arrojó parcialmente el agua fuera del vaso que la contenía.

Conviene recordar ahora los experimentos de M. Rudberg (248), en los cuales se nota que, aun cuando la temperatura de ebullición del agua sea superior a 100 grados por efecto de las sustancias que lleve disueltas, el vapor que se desprende marca siempre, sin embargo, 100 grados, como con el agua pura, si la presión es de  $0^m,76$ .

309. Influencia de la naturaleza de las vasijas sobre la temperatura de ebullición. -Observó Gay -Lussac que, en una vasija de vidrio hierve el agua a una temperatura más alta que en una de metal, y atribuyó el fenómeno a la afinidad que con el agua tiene el vidrio. Suponiendo que valga 100 grados la temperatura de ebullición del agua destilada, en una vasija de cobre y a la presión de  $0^m,76$ , resulta que, en igualdad de presión, dicho líquido no entra en ebullición hasta 101 grados en un globo de vidrio; y si se ha limpiado perfectamente con ácido sulfúrico concentrado o con potasa puede llegar a subir la temperatura del agua hasta 105 y 106 grados. Con todo, basta poner un simple pedazo de metal en el fondo del globo, para que se presente de nuevo la ebullición a 100 grados, y al mismo tiempo para hacer cesar los violentos saltos que acompañan la ebullición de las disoluciones salinas o ácidas en las vasijas de vidrio.

La temperatura del vapor, en conformidad con lo que se observa en las sustancias en disolución, no experimenta influencia alguna por la que adquiere el agua en las vasijas de vidrio. A la presión de  $0^m,76$  es aun de 100 grados, lo mismo que en los vasos de cobre.

310. Influencia de la presión en la temperatura de ebullición. -Vese por las tablas de las fuerzas elásticas (304), que a 100 grados, que es la temperatura a que entra en ebullición el agua destilada, y a la presión de  $0^m,76$  tiene el vapor de este líquido una tensión precisa precisamente igual a dicha presión. Es general este principio, y puede enunciarse así: *Ningún líquido entra en ebullición hasta el momento en que la tensión de su vapor es igual a la presión que experimenta*. Claro está que cuando aumente o disminuya esta presión de crecer o decrecer la tensión del vapor, y de la temperatura necesaria para la ebullición.

Demuéstrase que baja la temperatura de ebullición cuando es más

débil la presión, colocando debajo del recipiente de la máquina neumática una cápsula que contenga agua a unos 30 grados, y haciendo después el vacío. Desde luego se nota que entra en ebullición el líquido con gran rapidez, aunque se halle en una vasija tapada, debido a que el vapor es aspirado por la máquina neumática a medida que se va formando.

Por efecto de la disminución de la presión atmosférica hierve el agua en las altas montañas a menos de 100 grados. En el Monte Blanco, por ejemplo, entra dicho líquido en ebullición a 84 grados.

Si, por el contrario, aumenta la presión, se retarda la ebullición; de manera que no se efectúa en el agua, por ejemplo, hasta 120,6 grados, cuando llega a dos atmósferas la presión.

311. Medición de la altura de las montañas, por medio de la temperatura de ebullición. -La relación que media entre la temperatura de ebullición y la presión, nos ofrece un medio para medir la altura de las montañas, en lugar de efectuarlo con el auxilio del barómetro que puede reemplazarse por el termómetro. En efecto, si observamos, por ejemplo, que el agua hierve en la cúspide de una montaña a 90 grados, siendo así que lo efectúa a 98 en su base, y si buscamos en las tablas de las fuerzas elásticas las tensiones correspondientes, encontraremos en las mismas, números de milímetros que representan la fuerza elástica del vapor en el momento en el cual se desprende en la base y en la cúspide de la montaña, y por consecuencia, la presión atmosférica experimentada por el agua en ebullición en los dos sitios que se consideran. Conociendo de esta suerte la altura del barómetro en la cúspide de la montaña y en su base, se aplican sin dificultad las fórmulas que ya hemos expuesto para medir la altura de las montañas por medio del barómetro (161).

Para la aplicación de este método se emplean únicamente termómetros muy sensibles, cuya graduación sólo se extiende de 80 a 100 grados aproximadamente, de suerte que cada grado, ocupa una gran extensión en la escala, pudiendo apreciarse los décimos y hasta los centésimos de grado.

312. Hervidero de Franklin. -Demuéstrase también la influencia de la presión en la temperatura de ebullición, por medio del *hervidero de Franklin*. Compónese este aparatito de una esfera *a* y de un tubo *b*, de vidrio, reunidos por otro tubo de pequeño diámetro ([fig. 209](#)). El tubo está aguzado en su extremidad superior, por la cual se introduce el agua que se hace pasar a la esfera *a*, y hervir en ella, calentándola con una lámpara de alcohol. Cuando se juzga que ya los vapores han arrastrado, al desprenderse, todo el aire del aparato, se cierra la extremidad del tubo *b*, fundiéndola a la lámpara. Hecho así el vacío, o cuando menos expulsado todo el aire, no sufre el agua más presión que la tensión de su vapor, tensión que es muy débil a la temperatura ordinaria. Resulta de ahí que, cogiendo con la mano la esfera *a*, basta el calor de aquella para dar al vapor una tensión que hace refluir el agua al tubo *b*, determinando en él una fuerte ebullición.

313. Producción del vapor en vasijas cerradas. -Hemos supuesto hasta ahora que se formaban los vapores en un espacio indefinido, por el cual podían difundirse libremente, sin cuya condición no es posible la ebullición; pues como en las vasijas cerradas no encuentran salida alguna los vapores, su tensión y densidad crecen con la temperatura, siendo imposible el rápido desprendimiento de los mismos que constituye la ebullición. Por lo tanto, mientras que en una vasija abierta no puede pasar la temperatura de un líquido de la de su ebullición, en una cerrada puede, al contrario, subir mucho más. En este caso reconoce un límite el estado líquido, porque si, en virtud de los experimentos de M. Cagniard-Latour, se introduce agua, alcohol o éter en gruesos tubos de vidrio, y se les da suelda a la lámpara después de haber expulsado el aire por medio de la ebullición, se observa que, sometiendo dichos tubos a un foco de calor bastante intenso, llega un momento en el cual desaparece de repente el líquido, transformándose en vapores, cuyo volumen difiere poco de el de aquél. De esta suerte encontró M. Cagniard-Latour que el éter sulfúrico se reduce totalmente a vapor a 200 grados en un espacio que sea menor que el doble de su volumen en el estado líquido, y que entonces equivale la tensión a 38 atmósferas.

314. Marmita de Papin. -El médico francés Papin, muerto en 1710, fue, al parecer, el primer físico que estudió los efectos de la producción del vapor en recipientes cerrados. El aparato, que conserva su nombre, es una vasija cilíndrica de bronce *D* ([figura 210](#)) con una tapadera que puede fijarse muy sólidamente por medio de un tornillo de presión *B*, que la mantiene oprimida contra la marmita, a pesar de la fuerza elástica del vapor, que tiende a levantarla. A fin de cerrar herméticamente el aparato, se procura, antes de apretar la tapadera, interponer algunas láminas de plomo entre sus dos bordes y los de la marmita. En la base de una cavidad cilíndrica que atraviesa el cilindro *S* y el tubo *o*, cuenta la tapadera un

pequeño orificio cubierto por un disco, en el cual se apoya un vástago  $n$ , que cruza al cilindro y al tubo, y se halla sujeto contra el disco obturador por medio de una palanca  $A$ , móvil en su extremidad  $a$ . Un peso  $p$ , que se mueve según la longitud de la palanca  $Aa$ , ejerce sobre la varilla  $n$  una presión tanto mayor, cuanto más cerca se encuentra dicho peso de la extremidad  $A$ , por efecto de una propiedad bien conocida de las palancas (45). Pudiendo variar de esta suerte la carga del disco, se la regula de manera que cuando el vapor adquiera en el interior de la marmita una tensión determinada, de 6 atmósferas, por ejemplo, se levante el disco y dé salida al vapor. Así puede evitarse que estalle el aparato, por cuyo motivo se denomina este mecanismo *válvula de seguridad*.

Calentando la marmita de Papin llena hasta los dos tercios de agua y tapada, puede sufrir el líquido mucho más de 100 grados, elevándose la tensión del vapor a bastantes atmósferas, según sea la carga que se haya dado a la válvula de seguridad.

Si se abre entonces la válvula, se escapa silbando a grande altura una columna de vapor, y el agua de la vasija que aún no había hervido, entra desde luego en ebullición bajando su temperatura a 100 grados.

Puede utilizarse la marmita de Papin para aumentar la acción disolvente de los líquidos, facilitando los medios de darles una temperatura superior a su punto de ebullición, por lo cual se la conoce también con el nombre de *digestor*.

315. Calórico latente de los vapores. -Como, según la tercera ley de la ebullición (307), permanece estacionaria la temperatura de los líquidos mientras dura el fenómeno, se deduce de este hecho que en la vaporización, lo mismo que en la fusión, se absorbe una cantidad considerable de calor, cuyo único efecto es hacer pasar los cuerpos de líquidos a aeriformes; porque esta cantidad de calor no actúa sobre el termómetro, supuesto que el vapor que se desprende está siempre a una temperatura igual, o bien algo inferior a la del líquido que lo origina. Debemos admitir, por lo mismo, en este fenómeno, *calórico latente*, así como en el de la fusión (288), designándolo con el nombre de *calórico de elasticidad*, o *calórico de vaporización*.

Sea cual fuere la temperatura a que se produzca un vapor, siempre hay absorción de calórico latente. Si se vierte en la mano un líquido volátil, éter, por ejemplo, se experimenta un frío muy vivo que proviene del calórico de elasticidad, absorbido por el líquido que se evapora. Watt estableció la ley de que, para calentar, a contar desde cero, y vaporizar un peso dado de agua, la cantidad total de calor era siempre la misma, y Southern, en 1803, expuso otra ley diciendo que el calor latente de vaporización es constante cualquiera que sea la presión. Pero según las numerosas observaciones de M. Regnault sobre la tensión de los vapores, estas dos leyes no pueden admitirse como exactas.

El calórico latente que absorben los vapores puede ser un germen de frío muy intenso, capaz de solidificar al mercurio (316) y hasta los gases, según se verá experimentalmente al hablar del aparato de Thilorier.

Pronto veremos cómo se determina, por medio del cálculo, la cantidad de calor latente absorbida por los diferentes líquidos, durante la vaporización.

316. Frío originado por la evaporación; congelación del mercurio. -Acabamos de ver que, cuando se vaporiza un líquido, es absorbida una considerable cantidad del calórico, en el estado latente, por el vapor que se desprende (315). Resulta de aquí que, si un líquido que se evapora no recibe una cantidad de calor equivalente a la que absorbe el vapor, baja su temperatura, siendo el enfriamiento tanto mayor, cuanto más rápida es la evaporación.

Leslie consiguió congelar el agua por el simple efecto de una rápida vaporización. Colócase al efecto debajo del recipiente de la máquina neumática una vasija de vidrio que contenga ácido sulfúrico concentrado, y encima una capsulita metálica  $A$  ([fig. 211](#)) con algunos gramos de agua. Al hacer el vacío, entra en ebullición el agua (310); pero como son absorbidos por el ácido sulfúrico los vapores a medida que se van formando, se produce una rápida vaporización que determina muy en breve la congelación del agua de la cápsula.

Si se opera con líquidos más volátiles que el agua, particularmente con el ácido sulfuroso que hierve a -10 grados, se produce un frío bastante intenso para congelar el mercurio. Se practica este experimento,

envolviendo con algodón una esfera de vidrio llena de mercurio, y luego, después de haberla mojado con ácido sulfuroso, se coloca debajo del recipiente de la máquina neumática, y se hace el vacío, con lo cual queda muy pronto solidificado el mercurio.

Thilorier dirigió un chorro de ácido carbónico líquido sobre la esfera de un termómetro de alcohol, y vio que bajaba éste a 100 grados bajo cero, sin que se congelase el alcohol; pero ya se ha visto (290) que con una mezcla de óxido nitroso líquido, ácido carbónico sólido y éter, M. Despretz ha llegado a producir un frío bastante intenso para reducir el alcohol al estado de un jarabe, espeso.

El frío que produce la evaporación se utiliza en los países cálidos para refrescar el agua por medio de *alcarrazas*; denominándose así unas vasijas de tierra bastante porosas para que el agua se filtre lentamente y vaya a evaporarse a su superficie, sobre todo si se colocan en una corriente de aire.



## Liquefacción de los vapores y de los gases

317. Liquefacción de los vapores -La liquefacción o *condensación* de los vapores, es su paso del estado aeriforme al de líquido. Tres son las causas que pueden determinar la condensación, a saber, el enfriamiento, la compresión y la afinidad química: las dos primeras exigen que se hallen los vapores en el estado de saturación (299); pero la última, produce la liquefacción por enrarecidos que estén. Véase por qué muchas sales absorben, condensándole, el vapor de agua de la atmósfera, aunque se encuentre en ella en proporción muy mínima.

En el momento en que se condensan los vapores, queda libre su calórico latente, es decir, se hace sensible al termómetro. Compruébase esto dirigiendo una corriente de vapor a 100 grados a un vaso de agua que se halle a la temperatura ordinaria; la cual se calienta con rapidez y llega muy pronto a los 100 grados. Se admite que la cantidad de calórico que restituyen así los vapores que se condensan, es precisamente igual a la que absorben al formarse, lo cual parece evidente.

318. Destilación; alambiques. -La *destilación* reconoce por objeto separar un líquido volátil de las sustancias fijas que tiene en disolución, o bien dos líquidos desigualmente volátiles. Fúndase esta operación en la transformación de los líquidos en vapor por efecto del calórico, y en la condensación de los vapores al enfriarse.

Los aparatos que sirven para la destilación se denominan *alambiques*. Su forma puede variar al infinito, pero siempre constan de tres piezas principales, que son: 1.º la *cucúrbita* A ([fig. 212](#)), o sea una caldera de cobre estañado, que contiene el líquido que se ha de destilar, y que entra por su parte inferior en un hornillo; 2.º el *capitel* B que se coloca sobre la cucúrbita para dar salida al vapor por un cuello lateral C; 3.º el *serpentín* S, que consiste en un largo tubo de estaño o de cobre arrollado en hélice y colocado en una cuba llena de agua fría y cuyo objeto es el de condensar el vapor enfriándolo.

Si queremos destilar agua de pozo o de río para purgarla de las sales que contiene en disolución, y que son, en particular el sulfato de cal, el carbonato de la misma base y el cloruro de sodio, se vierte en la cucúrbita de manera que llene sus dos tercios, y se calienta hasta que entre en ebullición. Los vapores que se desprenden van a condensarse en el serpentín, desde el cual pasa en seguida, al recipiente D, el agua que origina la condensación.

Como los vapores que se condensan calientan rápidamente el agua de la cuba (317), conviene renovarla constantemente, pues de lo contrario, no se efectuaría la condensación. Al efecto, un tubo *n*, alimentado sin cesar por una corriente de agua fría, conduce ésta a la parte inferior de la cuba, mientras que el agua caliente, que es menos densa, asciende siempre a la superior, vertiéndose por un tubo situado cerca del borde de la cuba.

Es necesario no apurar mucho la destilación; porque, si contuviese el agua materias orgánicas, se descompondrían éstas en las paredes; calientes de la cucúrbita, dando origen a productos volátiles.

El agua destilada es perfectamente clara, y no deja residuo alguno después de su evaporación, pero contiene siempre algo de ácido carbónico; porque, como se encuentra, este gas en todas las aguas naturales, sólo se separa de ellas de un modo incompleto por destilación. Podemos evitar la presencia de aquel gas, colocando en la cucúrbita cierta cantidad de cal que se combina con él y lo retiene.

Por destilación, y por medio de alambiques, análogos al descrito, se extrae de los vinos el alcohol que contienen.

319. Absorción; tubos de seguridad. -Se da el nombre de *absorción*, en química, a un accidente que surge en los aparatos que sirven para la preparación de los gases, y que consiste, en que después de recogidos en agua o en mercurio, penetran estos líquidos en los aparatos, echando a perder la operación.

Siempre reconoce por causa este accidente, exceso de la presión atmosférica sobre la tensión del gas contenido en el aparato. Sea, en efecto, un gas, el ácido sulfuroso, por ejemplo, que desprendiéndose de un matraz *m* (fig. 213), vaya a una probeta *A* llena de agua. Mientras se desprende activamente el gas, supera su tensión a la presión atmosférica y al peso de la columna de agua *on*; el líquido de la probeta no puede subir al tubo, y es imposible la absorción; pero si decrece la tensión del gas, sea por entorpecerse el desprendimiento, sea por enfriarse el matraz, predomina la presión exterior, y cuando el exceso de ésta sobre la interna es superior al peso de la columna de agua *co*, penetra el líquido en el matraz y se pierde la operación. Previénesse este accidente por medio de los *tubos de seguridad*.

Así se denominan unos tubos que precaven la absorción, permitiendo que entre el aire en los aparatos a medida que decrece la presión interior. El tubo de seguridad más sencillo consiste en un tubo recto *Co* (fig. 214), que atraviesa el tapón que cierra el matraz *M*, en el cual se produce el gas, y que se introduce algunos centímetros en el líquido contenido en dicho matraz. Cuando disminuye la tensión del gas en la vasija *M*, la presión atmosférica que se ejerce en el agua de la cuba *E*, la hace subir a cierta altura en el tubo *DA*; pero dicha presión, que actúa también en el tubo *Co*, tiende a deprimir igualmente el líquido que se halla en este tubo, suponiendo que dicho líquido tenga sensiblemente la misma densidad que el agua de la cuba *E*. Como la distancia *or* es menor que la altura *DA*, entra el aire por el orificio o antes que el agua de la cuba llegue a *A*, y de consiguiente, no hay absorción.

También sirve el tubo *Co* para precaver las explosiones. Cuando es muy rápida la producción del gas, y no basta el tubo para su desprendimiento, es repelido el líquido del matraz *M* hacia el exterior, escapándose por el tubo *C*, el cual se convierte a su vez en una salida para el gas apenas desciende el nivel del orificio *o*.

La [figura 215](#) representa otra especie de tubo de seguridad, conocido con el nombre de *tubo de S*, el cual posee una esfera *a* con cierta cantidad de líquido, contenido igualmente en la rama *id*. Si la tensión del gas en la retorta *M* es superior a la presión atmosférica, sube el nivel en la rama *id* a mayor altura que en la esfera *a*; si vale una atmósfera, es idéntico el nivel en el tubo y en la esfera; y por último, si es menor que la presión atmosférica, baja el nivel en la rama *di*; y como se procura que la altura *ia* sea menor que *bh*, apenas el aire que entra por la esfera *c* llega a la parte curva *i*, levanta la columna líquida *ia* y penetra en la retorta antes que se haya elevado hasta *b* el agua de la probeta, de suerte que así se equilibra la tensión interior con la presión exterior, siendo imposible la absorción.

320. Liquefacción de los gases. -Los gases vienen a ser vapores muy dilatados, y por lo mismo son, como éstos, susceptibles de liquidarse. Pero, distando mucho de su punto de liquefacción, sólo se consigue ésta, mediante una presión o un enfriamiento más o menos considerable: respecto a algunos basta la compresión simplemente, o bien el enfriamiento; pero la mayor parte exigen el uso simultáneo de estos dos medios. Pocos son los gases que resisten estas dos acciones combinadas, pues, hasta ahora, sólo el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno el bi-óxido de nitrógeno y el óxido de carbono se cuentan en este número, si bien se conseguiría su liquefacción en el caso de poderlos someter a enfriamientos y presiones bastante intensas.

Hemos visto ya (138) que M. Faraday liquidó muchos gases tenidos hasta entonces por permanentes. Consiste su procedimiento en encerrar dentro de un tubo de vidrio, encorvado a manera de sifón, varias sustancias que, por su reacción química, dan origen al gas que se trata de comprimir; de suerte que, ocupando dichas sustancias una de las ramas del sifón, el gas, a medida que va desprendiéndose, se comprime por sí propio en la otra rama, en la cual se efectúa su liquefacción. Pueden hallarse así

sometidos los gases a presiones de 40 a 50 atmósferas; se enfría además el tubo por medio de mezclas frigoríficas, y un pequeño manómetro de aire comprimido, encerrado en el aparato, indica la presión.

Merced a este procedimiento consiguió Faraday liquidar el ácido carbónico a cero y a la presión de 35 atmósferas.

321. Aparato para liquidar y solidificar el ácido carbónico. -Requiriéndose una gran presión para que pase el ácido carbónico al estado líquido se necesitan al efecto aparatos especiales sumamente sólidos. Thilorier construyó el primer aparato de este género. La [figura 216](#) representa uno para liquidar el ácido carbónico, recientemente construido por los señores Deleuil. Es una modificación del de Thilorier, pero muy importante por lo que hace a su solidez.

Consta el aparato de dos cilindros P y Q, en todo semejantes, ambos movibles en un plano vertical, alrededor de dos ejes sostenidos sobre dos montantes de hierro fundido VV. Dichos cilindros, que son de este mismo metal, y que vienen a tener unos seis litros de capacidad, cuentan tres centímetros de espesor; pero poseen en el sentido de su longitud cuatro nervios o aros que sobresalen un centímetro del resto de la pared, siendo su anchura de ocho centímetros. Con objeto de dar al aparato toda la resistencia necesaria, varias fajas de hierro dulce *m*, que principian en la parte superior de los cilindros, se encajan en el hueco formado por dos aros consecutivos, se arrollan en la región inferior de los cilindros, cuyo fondo es hemisférico, y luego pasan a la otra cara de los mismos para rematar en la extremidad de donde partieron. Por último, las fajas se hallan sólidamente retenidas por cuatro cercos *n*, *o*, *p*, *q*, también de hierro dulce. Antes de colocar estos aros, se les da la temperatura que corresponde al color rojo, de manera que, al enfriarse, ejercen por su contracción una inmensa presión, así sobre las fajas longitudinales, como sobre los cilindros.

Vese en la cabeza de cada cilindro una llave M, compuesta de muchas piezas: la manecilla *a* sirve para apretarla con fuerza contra una tuerca enroscada en la masa de fundición. En la llave existe un conducto vertical que se bifurca en *x* hacia *b* y *d*, poniendo de esta suerte en comunicación el interior del cilindro con dos orificios practicados en *b* y en *d*, de los cuales sólo se abre uno a la vez. Un tornillo *z*, que se aprieta por medio de una llave *c*, sirve para cerrar el conducto interior antes de su bifurcación en *x* para lo cual comprime una esfera de plomo que tapa herméticamente el orificio del conducto, interceptándose también de igual manera los orificios *b* y *d* por medio de tuercas de presión.

Como son idénticos los dos cilindros, cualquiera de ellos sirve de generador del ácido carbónico, y el otro de recipiente para su liquefacción. Supongamos que sea el cilindro P el elegido para generador. Se quita la llave M, y en seguida se introducen en el cilindro 1800 kilogramos de bicarbonato de sosa, 3 litros de agua a 39° y 1 kilogramo de ácido sulfúrico. A fin de que no descomponga éste desde luego el bicarbonato de sosa se le vierte en un largo tubo R ([fig. 217](#)), de cobre, que se coloca y deja abierto por la extremidad superior en el cilindro P.

Hecho esto, se coloca de nuevo la llave M apretándola enérgicamente, la cual se cierra por medio del tornillo *z*, y luego se inclina suavemente el cilindro, haciéndole oscilar sobre sus dos puntos de apoyo, de manera que se vierta una corta cantidad de ácido sulfúrico de la vasija R, y caiga sobre el bicarbonato. Inclínase así sucesivamente el cilindro, pero repetidas veces, hasta tanto que haya desaparecido el ácido.

Se calcula que siete minutos es el tiempo necesario para que termine la reacción química. El ácido carbónico que se formó se halla en parte liquidado y mezclado con el agua que sirvió para su preparación; pero si se le hace comunicar con el otro cilindro Q, por medio de un tubo de cobre *r*, de corto diámetro, aflojando el tornillo *z*, el ácido carbónico va destilándose en el recipiente, liquidándose en él nuevamente por efecto de su propia presión. Thilorier evaluó en 50 atmósferas la presión que se origina en el recipiente, marcando 15° la temperatura.

Repitiendo cinco o seis veces la misma operación, se condensan en el recipiente hasta dos litros de ácido carbónico líquido.

Para obtener el mismo ácido en el estado sólido, tiene la llave del recipiente, en su parte inferior, un tubo que se introduce en el ácido líquido, y por lo mismo, al abrir un orificio *g* situado junto a la llave, brota o salta con fuerza el ácido carbónico líquido por efecto de la presión que sufre, pasando al estado aeriforme.

Pero sólo se gasifica parte del líquido, porque es tan considerable el calórico latente absorbido que, cediendo el resto del líquido su calórico de liquefacción, se solidifica en copos blancos, cristalizados bajo una forma filamentosos.

El ácido carbónico sólido se evapora con mucha lentitud, pudiéndose comprobar entonces, por medio de un termómetro de alcohol, que su temperatura es próximamente de  $-90^{\circ}$ . Con todo, puesto sobre la mano, no causa una sensación de frío tan viva como pudiera creerse, porque no media contacto; mas si se lo mezcla con éter, es tan intenso el frío, que un copo de ácido carbónico sólido, puesto sobre la carne, desorganiza los tejidos lo mismo que el fuego. Esta mezcla solidifica en pocos segundos cuatro veces su peso de mercurio. Sumergiendo en ella un tubo lleno de ácido carbónico líquido, ha conseguido M. Faraday solidificar éste según una masa compacta presentando el aspecto de un pedazo de hielo bien transparente.

322. Aparato para liquidar el protóxido de nitrógeno. -En el aparato que acabamos de describir, el ácido carbónico se comprime por sí mismo, produciéndose en cantidad muy abundante. Pero no todos los gases se obtienen en condiciones convenientes para liquidarse en virtud de su propia presión. Entonces es preciso recurrir a una presión artificial, y así es como M. Natterer ha liquidado muchos gases comprimiéndolos en un cañón de fusil por medio de una bomba impelente.

M. Bianchi ha modificado el aparato de M. Natterer, y le ha dado la forma que representa en perspectiva la [fig. 218](#), y en corte según una escala mayor, en la [fig. 219](#). Este aparato se compone de un receptáculo A de hierro forjado, cuya capacidad es de 7 a 8 litros, y su resistencia es tal, que puede sufrir presiones que excedan de 600 atmósferas. En la parte inferior de dicho receptáculo hay atornillada una pequeña bomba impelente cuyo vástago  $t$  de su émbolo recibe el movimiento de vaivén por medio de una manivela E, articulada sobre un excéntrico movido por un engranaje y un manubrio M. Como la compresión del gas y el rozamiento del émbolo dan lugar a un gran desarrollo de calor, se rodea el receptáculo A de una cubeta B, en la cual se sitúa el hielo; ahora bien, el agua procedente de la fusión de este hielo marcha por un tubo  $m$  a una capacidad cilíndrica de cobre C, que envuelve a la bomba impelente, y de aquí se desprende por un segundo tubo  $n$  y una llave  $o$ . Finalmente, todo el aparato se encuentra montado sobre un armazón de hierro fundido PQ.

Supuesto esto, se recoge de antemano el gas que trata de liquidarse en bolsas impermeables R, de donde se le dirige a un vaso V lleno de cloruro de calcio o de otra sustancia desecante; luego pasa de allí a la bomba impelente por un tubo de goma elástica H. Cuando el aparato ha funcionado cierto tiempo, se desatornilla el receptáculo de encima de la bomba, lo cual se consigue sin que el gas líquido pueda escaparse, supuesto que el receptáculo A se encuentra herméticamente cerrado, en su parte inferior, por una válvula S ([fig. 219](#)). Para recoger luego el líquido contenido en el recipiente, se invierte éste y se desatornilla un botón  $r$ , que da salida al líquido por una pequeña tubuladura x.

La liquefacción más notable obtenida con este aparato, es la del protóxido de nitrógeno. Una vez liquidado este gas, no se evapora sino lentamente, aunque se halle contenido en una vasija abierta, y se mantiene, a una temperatura fija de 88 grados bajo cero. El mercurio, cuando se proyecta sobre el mismo en pequeña cantidad, se congela al momento. Lo mismo le sucede al agua; pero siendo mucho menor la cantidad de calórico latente que este líquido contiene con relación al mercurio (355), es menester echarla gota a gota, pues de lo contrario, el calórico, cedido al momento de la congelación del agua, podía ser capaz de hacer detonar al protóxido de nitrógeno.

Descomponiendo fácilmente el calor el protóxido de nitrógeno, posee la propiedad, como se sabe en química, de mantener la combustión casi tan vivamente como el oxígeno, cuya propiedad conserva igualmente, en el estado líquido, a pesar de su baja temperatura. En efecto, si se arroja en dicho líquido un pedacito de carbón incandescente, arde al momento con notable vivacidad.

▽△

## Mezclas de los gases y de los vapores

323. Leyes de las mezclas de los gases y de los vapores. -Las mezclas de un gas y de un vapor presentan las dos leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *La tensión, y por consiguiente, la cantidad de vapor que satura un espacio dado, son las mismas, en igualdad de temperatura, cuando dicho espacio contiene un gas, o bien cuando se encuentra vacío.*

2.<sup>a</sup> *La fuerza elástica de la mezcla es igual a la suma de las fuerzas elásticas del gas y del vapor mezclados, relacionando constantemente el gas a su volumen primitivo.*

Estas leyes, conocidas con el nombre de *leyes de Dalton*, que fue el primero que las publicó, se demuestran por medio de un aparato muy sencillo, del cual somos deudores a Gay-Lussac, y que hemos representado en la [figura 220](#). Consta de un tubo de vidrio A, masticado por sus extremidades a dos llaves de hierro *b* y *d*. La llave inferior posee un conducto que pone en comunicación el tubo A con otro B de menor diámetro. Una escala, situada entre los dos tubos, mide la altura de las columnas de mercurio contenidas en cada uno de ellos.

Lleno de mercurio el tubo A, y cerradas las llaves *b* y *d*, se enrosca sobre *b*, en vez del embudo C, un globo de vidrio M cerrado a su vez por otra llave, y lleno de aire seco o de cualquiera otro gas. Abriendo luego las tres llaves, se da paso por el tubo A a una parte del mercurio, que es reemplazado por el aire seco del globo. Ciérranse entonces las llaves; y como se enrareció el aire en el espacio A al salir del globo, se encuentra a una presión menor que la atmosférica: se restablece ésta echando mercurio en el tubo B, hasta que sea igual el nivel en ambos tubos. Por fin, se quita el globo y su llave, colocando en su lugar un embudo C, el cual tiene una llave *a* que difiere de las ordinarias. En efecto, su orificio no la cruza de parte a parte, poseyendo tan sólo una pequeña cavidad, conforme se ve en *n*, a la izquierda de la figura. Después de echar en el embudo C el líquido que se quiere vaporizar, de anotar el nivel *k* del mercurio, y de abrir la llave *b*, se da vuelta a la *a* de manera que se llene de líquido su cavidad, invirtiéndola luego a fin de que penetre éste en el espacio A y se evapore. De esta suerte se va proyectando gota a gota el líquido, hasta que el aire del tubo se halle saturado de vapor, lo cual se conoce, en que cesa de bajar el nivel *k* del mercurio (299).

Como la tensión del vapor que se origina en el espacio A, se agrega a la del aire que ya contenía, aumenta el volumen del gas, pero se le hace adquirir fácilmente el volumen primitivo, vertiendo de nuevo mercurio en el tubo B. Cuando el mercurio ha subido así, en el tubo mayor, al nivel *k* que tenía primero, se observa en los tubos B y A una diferencia de nivel  $B_0$ , que representa evidentemente la tensión del vapor formado, porque habiendo recobrado el aire su volumen primitivo, no varió su tensión. Si se hacen pasar al vacío de un tubo barométrico algunas gotas del mismo líquido introducido en el espacio A, se observa una depresión igual precisamente a  $B_0$ , lo cual demuestra de una manera evidente que, a igualdad de temperatura, es la tensión de un vapor en estado de saturación la misma en los gases que en el vacío, de donde se deduce que, permaneciendo constante la temperatura, la cantidad de vapor es también la misma.

Respecto a la segunda ley, queda demostrada con el experimento anterior que, cuando el mercurio ha recobrado su nivel *k*, resiste la mezcla la presión atmosférica que se ejerce en el vértice del tubo B, más el peso de la columna de mercurio  $B_0$ . Estas dos presiones representan precisamente, una la tensión del aire seco, y la otra la tensión del vapor. Por lo demás, podemos considerar la segunda ley como una consecuencia de la primera.

Con el aparato que acabamos de describir sólo pueden hacerse los experimentos a la temperatura ordinaria; pero M. Regnault, por medio de un aparato que puede aceptar diferentes temperaturas, comparó sucesivamente en el aire y en el vacío las tensiones de vapor de agua, de éter, de sulfuro, de carbono y de benzina, y siempre pudo convencerse de que la tensión en el aire es más débil que en el vacío. Con todo, son tan mínimas las diferencias, que no invalidan la ley de Dalton y de Gay-Lussac; así es que M. Regnault cree que puede continuarse admitiendo dicha ley como rigurosa teóricamente, atribuyendo las pequeñas diferencias comprobadas, a la afinidad higroscópica de las paredes de los tubos.

324. Problemas sobre las mezclas de los gases y de los vapores.

I. Dado un volumen de aire seco  $V$ , a la presión  $A$ , se pregunta cuál será su volumen  $V'$  cuando esté saturado, permaneciendo constantes la temperatura y la presión.

Si se representa por  $F$  la fuerza elástica del vapor que satura al aire, éste, en la mezcla, sólo está sometido a la presión  $A-F$  (323, 2.º). Pero, según la ley de Mariotte, los volúmenes  $V$  y  $V'$ , estando en razón inversa de las presiones que sufren, se tiene:

$$V/V' = A/A-F, \text{ de donde } V' = VA/A-F.$$

II. Dado un volumen de aire saturado  $V$ , a la presión  $A$  y a la temperatura  $t$ , ¿cuál será su volumen  $V'$ , también saturado, a la presión  $A'$  y a la temperatura  $t'$ ?

Si se representa por  $f$  la tensión máxima del vapor a  $t$  grados, y por  $f'$  también su tensión máxima a  $t'$  grados, el aire sólo en cada una de las mezclas  $V$  y  $V'$  estará sometido respectivamente a las presiones  $A-f$  y  $A'-f'$ . Suponiendo desde luego la temperatura constante, se tendrá, pues, según la ley de Mariotte,

$$V'/V = A-f/A'-f'.$$

Para tener en cuenta el cambio de temperatura, es menester observar que, variando ésta de  $t$  a  $t'$ , los volúmenes crecen en la relación de  $1+at'$  a  $1+at$  siendo  $a$  el coeficiente de dilatación del aire; luego la fórmula buscada es, por último,

$$V'/V = A-f/A'-f' \cdot 1+at'/1+at.$$

III. Se quiere saber el peso  $P$  de un volumen de aire  $V$  saturado de vapor de agua, a la temperatura  $t$  y a la presión  $A$ .

Tengamos en cuenta para resolver esta cuestión, que el volumen  $V$ , de aire saturado es en realidad una mezcla de  $V$  litros de aire seco a  $t$  grados a la presión  $A$ , menos la del vapor, y de  $V$  litros de vapor saturado a  $t$ .

Por lo tanto, si representamos por  $F$  la tensión del vapor, la presión del aire únicamente considerada será  $A-F$  y el problema se hallará reducido a investigar: 1.º el peso de  $V$  litros de aire seco a  $t$  grados y a la presión  $A-F$ ; 2.º el peso de  $V$  litros de aire saturado a  $t$  grados y a la presión  $F$ .

Para resolver la primera parte del problema, sabemos que 1 litro de aire seco a  $t$  grados y a la presión 76, pesa 1gr,3, y que a  $t$  grados y a la presión  $A-F$  pesa  $1gr,3(A-F)/(1+at)76$  (281, probl. VI); por lo tanto  $V$  litros de aire seco pesan

$$1gr,3 V(A-F)/(1+at)76 [1].$$

Finalmente, para obtener el peso del vapor, es preciso buscar desde luego el peso de un mismo volumen de aire seco, a la misma temperatura y a la misma presión el cual debe multiplicarse por la densidad de vapor (281, probl. VII). Y puesto que  $V$  litros de aire seco a  $t$  grados y a la presión  $F$  pesan  $1gr,3 V F/(1+at)76$ ,  $V$  litros de vapor cuya densidad sea  $5/8$  pesarán

$$1gr,3 V F \times 5/(1+at)76 \times 8 [2].$$

Por lo tanto el peso  $P$  que se busca se obtendrá igualando la suma de los pesos [1] y [2] por la fórmula

$$P = 1gr,3V(A-F)/(1+at)76 + 1gr,3VF \times 5/(1+at)76 \times 8 = 1gr,3V/(1+at)76(A-3/8F).$$

▽△

## Estado esferoidal

325. Experimentos de M. Boutigny. -Los líquidos vertidos sobre superficies metálicas incandescentes presentan fenómenos notables, observados por vez primera por M. Leidenfrost, hace cerca de un siglo, y estudiados luego por varios físicos; siendo M. Boutigny particularmente quien de algunos años a esta parte ha dado a conocer curiosos experimentos, de los cuales vamos a exponer los de mayor interés.

Si después de haber calentado hasta el rojo una cápsula de plata o de platino, de paredes gruesas, se vierten en ella algunos gramos de agua por medio de una pipeta, se nota que no se extiende el líquido mojando la cápsula, conforme lo verifica a la temperatura ordinaria, sino que acepta la forma de un globo aplanado, que es lo que M. Boutigny expresa diciendo que pasa el líquido al *estado esferoidal*. En tal estado, anima al agua un rápido movimiento giratorio sobre el fondo de la cápsula, y no sólo no entra en ebullición, sino que se evapora con una lentitud 50 veces menor que si estuviese en ebullición. Por último, si se enfría la cápsula, llega un momento en que no está bastante caliente para mantener el agua en estado esferoidal, y al mojar entonces el líquido sus paredes, surge repentinamente una violenta ebullición.

Todos los líquidos pueden aceptar el estado esferoidal; pero la temperatura necesaria para que se produzca el fenómeno es tanto más alta, cuanto mayor sea el punto de ebullición del líquido. Para el agua hay que calentar la cápsula por lo menos hasta 200 grados, y hasta 134 para el alcohol.

M. Boutigny ha observado que la temperatura de los líquidos en el estado esferoidal es constantemente inferior a la de su ebullición. El agua, por ejemplo, no pasa de  $95^{\circ},5$ ; el alcohol, de  $75^{\circ},5$ , el éter de 34, y el ácido sulfuroso, de  $-10^{\circ},5$ . Pero la temperatura del vapor que se desprende es igual a la de la cápsula, de lo cual debemos deducir, que no se forma en la masa del líquido.

Esta propiedad de los líquidos, en el estado esferoidal, de mantenerse a una temperatura inferior a la de su punto de ebullición, condujo a M. Boutigny al notable experimento de la congelación del agua en una cápsula incandescente. Calienta dicho físico al rojo-blanco una cápsula de platino, y vierte en ella algunos gramos de ácido sulfuroso anhidro. Este líquido que sólo hierve a  $-10$  grados, se comporta en la cápsula conforme acabamos de manifestar, es decir que su temperatura permanece inferior a  $-10$  grados. Añadiendo en seguida al ácido sulfuroso una corta cantidad de agua, se congela ésta inmediatamente, enfriada por el ácido, y como continúa roja la cápsula, se saca de ella, no sin grande asombro, un pedazo de hielo.

En el estado esferoidal, no hay contacto entre el líquido y el cuerpo caliente, conforme se convenció de ello M. Boutigny, haciendo enrojecer una lámina de plata perfectamente horizontal, y vertiendo encima un gramo de agua colorada de negro. Este líquido pasa al estado esferoidal, y colocando entonces la llama de una bujía a cierta distancia en la prolongación de la placa, se distingue con claridad y de un modo continuo dicha llama entre el esferoide de agua y la placa. De aquí se deduce que el líquido se mantiene a corta distancia de ésta, o que sus vibraciones son bastante rápidas para que la vista no las perciba.

Explícanse los fenómenos que presentan los líquidos en el estado esferoidal, admitiendo que el glóbulo líquido se halla sostenido a cierta distancia de la vasija por la tensión del vapor que se produce en su superficie; de suerte que, como no se calienta el líquido por contacto, sino tan sólo por radiación, se vaporiza muy lentamente, y sobre todo, si se tiene en cuenta que, siendo diatérmica el agua para los rayos emitidos por un foco intenso, la atraviesa sin calentarla la mayor parte del calor radiante. Cree M. Boutigny que la causa que se opone a que moje el líquido al metal es una fuerza repulsiva que se produce entre el cuerpo caliente y el líquido, repulsión que sería tanto más intensa, cuanto más alta fuese la temperatura. Está acorde dicha hipótesis con el siguiente experimento efectuado en Inglaterra por M. Perkins. Colocada una llave en un generador de vapor, debajo del nivel del agua, no manaba el líquido mientras tenían las paredes una temperatura muy alta, por considerable que fuese la presión interior; pero brotaba con fuerza el líquido, apenas bajaba la temperatura.

▽△

## Densidad de los vapores

326. Método de Gay-Lussac. -Denomínase *densidad de un vapor* la relación entre el peso de cierto volumen de este vapor y el de un mismo volumen de aire, siendo iguales la temperatura y la tensión.

Dos métodos se han seguido para determinar la densidad de los vapores: el primero, imaginado por Gay-Lussac, es aplicable a los líquidos que entran en ebullición a una temperatura inferior o muy poco superior a 100 grados; y el segundo, aceptado por M. Dumas, permite operar a temperaturas que pueden llegar hasta unos 360 grados.

La [figura 221](#) representa el aparato de Gay-Lussac. Consta de una vasija de hierro fundido llena de mercurio en la cual se introduce un cilindro de vidrio M que se halla lleno de agua o de aceite, cuya temperatura indica un termómetro T. En el interior del cilindro existe una campana graduada C, que en un principio está llena de mercurio.

Para trabajar con este aparato, se introduce el líquido que debe vaporizarse, en una ampollita de vidrio como la que se representa en A, a la izquierda de la figura; cerrando en seguida dicha ampollita a la lámpara, se la pesa, y restando del peso obtenido el de la ampollita vacía, se obtiene el del líquido que se introdujo. Se hace pasar entonces la ampollita a la campana C y se calienta gradualmente hasta que el agua del cilindro llegue a tener una temperatura superior en algunos grados a la que necesita para entrar en ebullición el líquido de la ampollita. Ésta por la dilatación del líquido que contiene se revienta, y al vaporizarse aquél, deprime al mercurio de la campana, conforme se ve en el grabado. La ampollita debe ser suficientemente pequeña para que todo su líquido se reduzca a vapor, según se verifica cuando llegado el baño a la temperatura de ebullición del líquido de la ampollita, permanece, sin embargo, el nivel del mercurio un poco más alto en el interior de la campana que en el exterior. Esto prueba, en efecto, que no queda líquido sin vaporizar, porque en tal caso el nivel interior sería sensiblemente el mismo que el exterior (302). No cabe duda, pues, de que el peso del líquido de la ampollita representa con exactitud el peso del vapor que se formó en la campana C. Respecto al volumen de este vapor, se averigua por medio de la escala graduada que existe en la campana; expresando su temperatura el termómetro T, y su presión es igual a la altura del barómetro menos la del mercurio que queda en la campana. Sólo falta, por lo tanto, calcular el peso de un volumen de aire que sea igual al del vapor, en las mismas condiciones de temperatura y de presión; y por último, dividiendo el peso del vapor por el del aire, el cociente será la densidad o el peso específico que se buscaba.

He aquí, por lo demás, la marcha que en estos cálculos debe seguirse. Representemos por  $p$  el peso del vapor en gramos, por  $v$  su volumen en litros, por  $t$  su temperatura, por  $A$  la altura del barómetro, y por  $a$  la del mercurio en la campana, de donde resulta que la presión del vapor es  $A-a$ .

Se trata de obtener el peso de un volumen de aire  $v$  a la temperatura  $t$  y a la presión  $A-a$ . Como a cero y a la presión de 0m,76 pesa un litro de aire 1gr,3, el peso del volumen  $v$ , a la misma presión y a cero, es  $1gr,3 \times v$ . Para calcular el peso del mismo volumen de aire a  $t$  grados, sea  $a$  el coeficiente de dilatación del aire; claro está que el volumen debe aumentar de cero a  $t$  grados, en la relación de 1 a  $1+at$ ; y al contrario, el peso, en igualdad de volumen, varía en razón inversa de  $1+at$  a 1. Por lo tanto, el peso del volumen de aire  $v$ , a  $t$  grados y a la presión de 0m,76, es  $1gr,3 \times v / 1+at$  (281, probl, VI).

En fin, siendo el peso de un mismo volumen de aire proporcional a la presión, se pasa de la presión 0m,76 a la  $A-a$ , multiplicando la cantidad  $1gr,3 \times v / 1+at$  por  $A-a / 0,76$ , lo cual da  $1gr,3 \times v (A-a) / (1+at) \times 0m,76$ , para el peso  $p'$  de un volumen de aire  $v$ , a la presión de 0m,76 y a  $t$  grados. De consiguiente, resulta para la densidad buscada,  $D = p / p' = p(1+at)0m,76 / 1gr,3v(A-a)$ .

327. Método de M. Dumas. -El procedimiento que acabamos de describir no puede aplicarse a los líquidos cuyo punto de ebullición pasa de 150 a 160 grados. En efecto, para dar esta temperatura al aceite, hay que calentar el mercurio a un grado tal, que emite vapores peligrosos de respirar. Además, en la campana graduada, la tensión de los vapores mercuriales tiende a agregarse a la del vapor, lo cual sería una causa de error.

El siguiente procedimiento, imaginado por M. Dumas, permite operar hasta la temperatura a la cual se deforma el vidrio, es decir a unos 360 grados. Consta el aparato de un globo de vidrio B con cuello afilado ([fig. 222](#)), como de medio litro de capacidad. Después de haber secado bien el globo interior y exteriormente, se le pesa mientras sólo contiene aire, con lo cual tenemos el peso P del vidrio. Se introduce en seguida por la punta afilada el líquido que se trata de vaporizar; y luego se sitúa el globo en

un baño de sal, o en uno de aceite de manos de buey o de una aleación de d'Arcet, según la temperatura de ebullición del líquido del globo. A fin de sostener éste en el baño, se fija, en una de las asas del perol que lo contiene, una barra de hierro, a lo largo de la cual puede correr un soporte del mismo metal. Éste posee dos anillos, entre los cuales se coloca el globo, conforme se ve en el grabado. En la otra asa, una barra, semejante a la primera, sostiene un termómetro de peso D.

Introducidos el globo y el termómetro en el baño, se calientan a una temperatura algo mayor que la de ebullición del líquido del globo; y el vapor, al salir por la punta afilada, expulsa al aire del aparato. En el momento en que cesa la salida del vapor, que se verifica luego de vaporizado todo el líquido, se cierra a la lámpara, con un soplete, la punta, procurando anotar en seguida la temperatura del baño y la altura del barómetro. En fin, frío ya el globo y enjugado con el mayor esmero, se le pesa de nuevo, y el peso  $P'$  que se obtiene, representa el del vapor que contiene, más el del vidrio, deducido el del aire desalojado (172). Se obtiene el peso del vapor, restando de  $P'$  el peso del vidrio, y sumando con la diferencia el peso del aire desalojado, lo cual será fácil, después de determinar el volumen del globo.

Al efecto, se introduce la punta afilada en el mercurio y se rompe su extremidad con unas pinzas; y como al condensarse el vapor se hizo el vacío en el aparato, resulta que se precipita en éste el mercurio por efecto de la presión atmosférica, llenándole por completo, si es que se expulsó todo el aire. Vertiendo en seguida en una campana graduada el mercurio que entró en el globo, se determina el volumen de este último a la temperatura ordinaria; por medio del cálculo se deduce fácilmente el del baño (281, problema V), y por lo tanto, el del vapor a la misma temperatura. Conocido así, lo mismo por medio de este procedimiento que por el de Gay-Lussac, el peso de cierto volumen de vapor a una temperatura y a una presión determinadas, se efectúa el resto del cálculo conforme hemos expuesto anteriormente. Si quedase aire en el globo, no se llenaría éste por completo de mercurio, sino que el volumen del mercurio introducido representaría también el del vapor.

*Densidades de algunos vapores con relación al aire.*

Aire.	1,0000	Vapor de sulfuro de carbono.	2,6447
Vapor de agua.	0,6235	- de esencia de trementina.	3,0130
- de alcohol.	1,6138	- de mercurio.	6,976
- de éter sulfúrico.	2,5860	- de iodo.	8,716

328. Relación entre el volumen de un líquido y el de su vapor. -Conocida la densidad de un vapor, se deduce de ella fácilmente el volumen que un peso dado del mismo debe ocupar en el estado de saturación, a una temperatura dada. Propongamos, por ejemplo, calcular el volumen de un gramo de vapor de agua a 100 grados y a la presión de 0m,76.

Siendo la densidad del vapor de agua a 100 grados, con relación a la del aire, 0,6235 se obtiene el peso de un litro de aquél a 100 grados y a la presión de 0m,76, buscando el de un litro de aire a iguales temperatura y presión, multiplicando este peso por 0,6235. Hemos visto (281, probl. VI) que, representando por  $P'$  el peso de un litro de aire a  $t$  grados, por  $P$  el del mismo volumen a cero, y por  $a$  el coeficiente de dilatación del aire, resulta  $P=P'(1+at)$ ; de donde  $P'=P/1+at$ . De consiguiente, en el caso en cuestión, el peso de un litro de aire seco, a 100 grados, es  $1\text{gr.}3/1+0,00356 \times 100=1\text{gr.}3/1,366=0\text{gr.}951$ ; de manera que 1 litro de vapor, saturado a 100 grados y a la presión de 0m,76, pesa  $0\text{gr.}951 \times 0,6235=0\text{gr.}592$ .

Para tener, a la misma temperatura y a igual presión, el volumen  $V$  ocupado por 1 gramo de vapor, no hay más que dividir 1 gr. por 0gr,592; de donde  $V=1\text{lit.}689=1689$  centímetros cúbicos. Transformándose en vapor a 100 grados y a la presión de 0m,76, adquiere, pues, el agua un volumen cerca de 1700 veces mayor que en el estado líquido.

△

▽△

## Capítulo VI



### Higrometría

329. Objeto de la higrometría. -La *higrometría* reconoce por objeto el determinar la cantidad de vapor de agua contenido en un volumen dado de aire. Aunque es muy variable esta cantidad, jamás se halla el aire saturado de vapor de agua, por lo menos en nuestros climas. Tampoco se observa nunca que se halle completamente seco, porque si se exponen a su acción sustancias *higrométricas*, es decir, de gran afinidad respecto al agua, como son el cloruro de calcio o el ácido sulfúrico, en todas ocasiones absorben dichas sustancias vapores de agua.

330. Estado higrométrico. -Como en general nunca está saturado el aire, se llama *estado higrométrico* o *fracción de saturación* del aire, la relación de la cantidad actual de vapor de agua que contiene con la que contendría si estuviese saturado, siendo idéntica en ambos casos la temperatura. El estado higrométrico del aire no depende de la cantidad absoluta de vapor acuoso contenido en la atmósfera, sino de la mayor o menor distancia a que se encuentra el aire del estado de saturación. El aire, cuando está frío, puede ser muy húmedo con poco vapor, y muy seco, por el contrario, con una cantidad mayor, cuando está caliente. Por ejemplo, el aire contiene, en general, más agua en el verano que en el invierno, y sin embargo, está menos húmedo, porque siendo la temperatura, más elevada, el vapor dista más de su punto de saturación. Del mismo modo cuando se calienta una habitación, no se disminuye la cantidad de vapor que existe en el aire; pero se disminuye la humedad de éste, porque se retarda su punto de saturación. El aire puede también quedar en este caso bastante seco para perjudicar a la economía animal; por esta razón conviene poner sobre las estufas una vasija que contenga agua.

Aplicándose la ley de Mariotte lo mismo a los vapores no saturados que a los gases, resulta que a igualdad de temperatura y de volumen, el peso del vapor, en un espacio sin saturar, crece como la presión, y por consiguiente, como la tensión del mismo vapor. Podemos sustituir, pues, en lugar de la relación de las cantidades de vapor, la de las fuerzas elásticas correspondientes, y decir que el estado higrométrico del aire es la *relación entre la fuerza elástica del vapor de agua que contiene y la del que contendría a igual temperatura, si estuviese saturado*.

Es decir que representando por  $f$  la tensión del vapor contenido en el aire, por  $F$  la del vapor saturado a la misma temperatura y por  $E$  el estado higrométrico, se tiene  $E=f/F$ , de cuya igualdad se deduce:  $f=F \times E$ .

Como consecuencia de esta segunda definición, debe notarse que, si la temperatura varía, puede contener el aire la misma cantidad de vapor, y no presentar, sin embargo, el mismo estado higrométrico. Por ejemplo, cuando

aumenta la temperatura, la fuerza elástica del vapor que contendría el aire, en el estado de saturación, crece con mayor rapidez que la fuerza del que contiene en la actualidad y entonces disminuye la relación de dichas fuerzas, es decir, el estado higrométrico.

No tardaremos en ver cómo se deduce el peso del vapor contenido en un volumen dado de aire, de su estado higrométrico.

331. Diferentes especies de higrómetros. -Denominanse *higrómetros* los instrumentos que sirven para determinar el estado higrométrico del aire. A pesar de que se han ideado varios sistemas, pueden agruparse en cuatro clases principales, que son: los higrómetros químicos, los de absorción, los de condensación y los psycrómetros.

El método del psycrómetro consiste en observar simultáneamente dos termómetros, uno de ellos, y con el receptáculo constantemente mojado el otro. De la diferencia de las temperaturas que indican, se deduce por medio del cálculo el estado higrométrico del aire. No describiremos el psycrómetro porque aún lo se hallan acordes los físicos acerca de la fórmula matemática que dio, para uso de dicho instrumento, su inventor M. August, y porque no siendo general debe modificarse según las circunstancias, en las cuales se encuentra el aparato.

332. Higrómetros químicos. -Toda sustancia dotada de gran afinidad respecto al vapor de agua es un *higrómetro químico*. Se introduce una de estas sustancias, por ejemplo, el cloruro de calcio en un tubo en forma de U; y luego se pone éste en comunicación con una parte superior de un aspirador lleno de agua, como el que se indica en la [figura 225](#). A medida que fluye el agua del aspirador, entra en él el aire por el tubo que encierra la sustancia desecante, la cual absorbe todo el vapor que contiene. Si se ha pesado, pues, antes del experimento el tubo con las materias que tiene dentro, y si después se le vuelve a pesar, el aumento de peso da la cantidad de vapor de agua contenido en un volumen de aire igual al del aspirador; y de este peso se deduce en seguida, por medio del cálculo, el estado higrométrico del aire. Este experimento es el más exacto, pero no ofrece el grado de sencillez, indispensable en las observaciones meteorológicas.

333. Higrómetros de absorción. -Los higrómetros de absorción están fundados en la propiedad que poseen las sustancias orgánicas de alargarse por la humedad y de acortarse por la sequedad. Muchos son los higrómetros de absorción; pero el más usado es el *higrómetro de cabello* o *higrómetro de Saussure* que es el apellido de su inventor. Consta de un bastidor de cobre ([fig. 223](#)), en el cual se halla tenso un cabello *c*, previamente desengrasado en agua que lleve en disolución una centésima parte de su peso, de subcarbonato de sosa. También se le puede desengrasar sumergiéndolo durante veinticuatro horas en éter sulfúrico, según lo efectúa M. Regnault. Si no estuviese desengrasado el cabello, absorbería muy poco vapor, y sería muy corta su prolongación, mientras que, libre de toda materia grasienta, se alarga rápidamente al pasar de la sequedad al estado húmedo.

Se halla sostenido el cabello  $c$  en su extremo superior por una pinza  $a$ , sujeta por un tornillo de presión  $d$  y que sube o baja para tender el cabello mediante un tornillo  $b$  de tuerca fija. Si estuviese anudado el cabello, la torsión indispensable ocasionaría una prolongación irregular. Se arrolla y fija el cabello inferiormente, en una polea o de dos gargantas, efectuándolo en la segunda garganta, en sentido contrario del cabello, un hilo de seda que sustenta un pequeño peso  $p$ , sosteniendo el eje de la polea una aguja que se mueve sobre un cuadrante graduado. Cuando se encoge el cabello, la tracción que ejerce levanta la aguja, y cuando se alarga, el peso  $p$  la hace descender.

Para la graduación del cuadrante, se marca cero en el punto en donde, a la temperatura ordinaria, se detiene la aguja en el aire completamente seco; 100 en el que se para encontrándose el aire saturado de vapor de agua; y por fin, se divide el intervalo entre estos dos puntos en 100 partes iguales, que son los grados del higrómetro.

El cero, o el punto de extrema sequedad, se determina colocando el higrómetro debajo de una campana de vidrio, cuyo aire se seca por medio de sustancias muy ávidas de agua, como son el cloruro de calcio o el carbonato de potasa calcinado. El aire de la campana pierde su humedad, y de consiguiente, se acorta el cabello, haciendo girar la polea y su aguja, pero con mucha lentitud. Sólo al cabo de quince o veinte días permanece estacionaria la aguja, lo cual indica, que el aire de la campana está completamente seco. Señálase entonces cero en el cuadrante, en el punto correspondiente a la aguja.

Se obtiene la posición del punto de extrema humedad, quitando de la campana las materias desecantes, y mojando sus paredes con agua destilada. Al evaporarse ésta, satura muy pronto al aire, alargándose con rapidez el cabello; y el pequeño peso, cuyo hilo se arrolla en sentido contrario que aquél, hace mover la aguja hacia el lado opuesto al cero. En menos de dos horas vuelve a quedar estacionaria, marcándose entonces 100, en el punto en que se para.

Según Saussure, un cabello tenso por un peso de 3 decigramos, se alarga de cero a 100,  $\frac{1}{40}$  de su longitud, que es de unos 20 centímetros. Los cabellos rubios son los que, al parecer, se prolongan con mayor regularidad.

Se desprecia la dilatación del cabello por efecto de las variaciones de temperatura, porque se ha notado que, por una diferencia de 33 grados en la temperatura del aire, la prolongación del cabello sólo hace recorrer a la aguja  $\frac{3}{4}$  de un grado del higrómetro. Haciendo abstracción de esta exigua dilatación, se observa que, sea cual fuere la temperatura, vuelve siempre exactamente, la aguja del higrómetro al cero en el aire perfectamente seco y a 100 grados en el que se halla saturado. La fijeza de este último punto demuestra que, en el aire saturado, absorbe siempre el cabello la misma cantidad de agua, sean cuales fueren la temperatura, y de consiguiente, la densidad del vapor.

Muchos son los inconvenientes que ofrecen los higrómetros que nos ocupan. Construidos con cabellos de diferentes especies, pueden variar en muchos grados sus indicaciones, por más que convengan en sus puntos fijos. Además, un mismo higrómetro no es comparable consigo mismo, porque se alarga el

cabello con motivo de la prolongada tensión del peso que sustenta. Por eso el mejor sistema de graduación es un cuadrante entero, de cero arbitrario, en el cual se determina de cuando en cuando la posición de los puntos de extrema sequedad y humedad. Aun cuando satisfaga estas condiciones, presenta también el higrómetro de cabello el inconveniente de no dar inmediatamente el estado higrométrico del aire. Vamos a exponer una tabla que Gay-Lussac construyó para deducir el estado higrométrico del aire, de las indicaciones del higrómetro que hemos descrito.

334. Tabla de corrección hecha por Gay-Lussac. -La experiencia demuestra que las indicaciones del higrómetro de cabello no son proporcionales al estado higrométrico del aire. Por ejemplo, cuando marca la aguja 50 grados, que es el número que corresponde a la parte media del cuadrante, dista mucho de ofrecer el aire una semi-saturación. Preciso ha sido, pues, encontrar experimentalmente el estado higrométrico que corresponde a cada grado del instrumento. Gay-Lussac resolvió este problema, fundándose en el principio (303) de tener los vapores que provienen de una disolución salina o ácida una tensión máxima, tanto más débil para una misma temperatura, cuanto más considerable es la cantidad disuelto, de sal o de ácido.

Colocaba Gay-Lussac el higrómetro de cabello debajo de una campana con una mezcla de agua y de ácido sulfúrico, y anotaba el grado del higrómetro, después de saturado el aire. Obtenía luego la tensión del vapor, haciendo pasar al vacío de un barómetro algunas gotas de la misma disolución salina que había puesto debajo de la campana. La depresión del mercurio en el barómetro le daba entonces la tensión del vapor, puesto que, en el estado de saturación y en igualdad de temperatura, la fuerza elástica de un vapor es la misma en el vacío que en el aire (322, 1.º). Buscando, por fin, en las tablas de las fuerzas elásticas la tensión del vapor saturado a la temperatura del aire de la campana, se tenían los dos términos de la relación que representaban el estado higrométrico. Repitiendo este experimento con disoluciones ácidas, más o menos concentradas y a la temperatura de 10 grados, encontró diez términos de la tabla siguiente; los otros se han determinado por Biot, por medio de fórmulas de interpolación.

*Estados higrométricos correspondientes a los grados del higrómetro de cabello a la temperatura de 10°.*

GRADOS del higrómetro.	ESTADOS higrométricos.	GRADOS del higrómetro.	ESTADOS higrométricos.
0	0	55	0,318
5	0,022	60	0,363
10	0,046	65	0,414
15	0,07	70	0,472
20	0,094	72	0,5
25	0,128	75	0,538
30	0,148	80	0,612
35	0,177	85	0,696

40	0,208	90	0,791
45	0,241	95	0,891
50	0,278	100	1

La tabla anterior demuestra que a 72 grados está semi-saturado el aire; y como a este punto corresponde las más de las veces la aguja del higrómetro en la superficie de la tierra, se deduce de aquí que el aire contiene por término medio la mitad del vapor que contendría si estuviese saturado. En nuestros climas nunca baja el higrómetro hasta 100 grados, aun cuando reinen las más copiosas lluvias; y en las mayores sequías, raras veces sube más allá de los 30 grados. Cuando se asciende en la atmósfera, marcha en general hacia el cero.

Según Gay-Lussac, su tabla de corrección podía aplicarse a todos los higrómetros de cabello; pero M. Regnault ha visto que las indicaciones de estos instrumentos varían con la naturaleza de los cabellos, con su color, con su tenuidad y con el sistema aceptado para desengrasarlos; de suerte que para obtener indicaciones exactas, es preciso una tabla particular para cada higrómetro, lo cual nos prueba cuán incompletos son estos instrumentos y cuánta es la inseguridad y las dificultades que ofrecen en su empleo.

335. Higrómetro de condensación de Daniell. -Los higrómetros de condensación tienen por objeto dar a conocer, por medio del enfriamiento del aire, a qué temperatura el vapor que contiene será suficiente para saturarle. Tales son los higrómetros de Daniell y el de M. Regnault.

El *higrómetro de Daniell* consta de dos esferas de vidrio, reunidas por un tubo acodillado ([figura 224](#)). La esfera A está llena hasta los dos tercios de éter, en el cual se introduce un pequeño termómetro encerrado en el tubo. Las dos esferas y el tubo están completamente purgadas de aire, lo cual se obtiene haciendo hervir el éter de la esfera A, mientras que la B continúa abierta, y cerrando ésta a la lámpara cuando se juzga que los vapores de éter han arrastrado todo el aire, de suerte que el tubo y la esfera B no contienen más que vapor de éter.

Envuelta en muselina la esfera B, se vierte sobre ella éter gota a gota, con objeto de que, al evaporarse, enfríe la esfera (315) y condense los vapores que contiene. Disminuye entonces la tensión interior; el éter de la esfera A emite acto continuo nuevos vapores, que van a condensarse de igual modo en la otra esfera, y así sucesivamente. A medida que de esta suerte destila el líquido de A a B, llega un momento en que el aire, que está en contacto con la primera esfera y que se enfría al mismo tiempo que ella, llega a la temperatura a que el vapor de agua que contiene es suficiente para saturarle. Condénsase entonces dicho vapor, depositándose en la esfera A una capa de rocío según la forma de un anillo que envuelve la superficie del líquido, porque allí es efectivamente donde, sobre todo, se produce el enfriamiento originado por la evaporación. El termómetro interior indica en aquel instante la temperatura del *punto de rocío*, es decir, la temperatura de saturación del aire ambiente.

Para obtener con más aproximación este punto, se observa la temperatura a que

desaparece el vapor precipitado, y se toma la media entre ésta y la de precipitación. Bueno es que durante el experimento se halle colocado el higrómetro en una corriente de aire, en una ventana abierta, por ejemplo, a fin de que sea más rápida la evaporación del éter sobre la muselina. Por último, con objeto de que sea más visible el depósito de rocío, suele ser, ordinariamente de vidrio negro la esfera A; y en cuanto a la temperatura del aire, la marca un termómetro situado en el pie mismo del aparato.

Habiéndonos ya dado a conocer el higrómetro de Daniell la temperatura a que estaría saturado el aire, se trata ahora de deducir de ella el estado higrométrico. Obsérvese, al efecto, que en un espacio libre que contiene una mezcla de aire y de vapor, a la presión atmosférica, la fuerza elástica del vapor permanece constante hasta el punto de saturación cuando baja la temperatura. En efecto, la fuerza elástica de la mezcla es igual a la suma de las fuerzas elásticas de cada fluido (323, 2.º), y mientras se enfría el aire, permanece invariable su tensión, porque aumenta por la disminución de volumen tanto, cuanto disminuye por el descenso de temperatura. La tensión del vapor debe quedar, pues, invariable, supuesto que la fuerza elástica de la mezcla es necesariamente igual a la presión de la atmósfera, lo mismo antes que después del enfriamiento. Por lo tanto, *cuando se enfría el aire, permanece invariable la tensión del vapor que contiene hasta el punto de saturación, en el cual dicha tensión es la misma que antes del enfriamiento.*

En virtud de este principio, si se busca en las tablas de las fuerzas elásticas la tensión  $f$  correspondiente al punto de rocío, será precisamente la que posea el vapor de agua del aire en el momento del experimento. Si se busca, pues, en las mismas tablas la tensión  $F$  del vapor saturado a la temperatura del aire, el cociente de  $f$  por  $F$  representará el estado higrométrico del aire (330). Supongamos, por ejemplo, que, a  $15^\circ$  en el aire, marca 5 el termómetro de la esfera A al verificarse el depósito de rocío. Se buscan en las tablas de las fuerzas elásticas las tensiones que corresponden a  $5^\circ$  y  $15^\circ$ , y se encuentra  $f=6^{\text{mm}},534$  y  $F=12^{\text{mm}},699$ ; de manera que la relación de  $f$  a  $F$ , o el estado higrométrico, es 0,514.

Muchas son las causas de error que presenta el higrómetro de Daniell. Vamos a enumerar algunas: 1.ª como la evaporación en la esfera A solo enfría la superficie del líquido, el termómetro que en él se introduce no puede dar con precisión la temperatura del punto de rocío; y 2.ª el observador, colocado junto al aparato, modifica la temperatura y el estado higrométrico del aire ambiente.

336. Higrómetro de M. Regnault. -M. Regnault construyó un higrómetro de condensación más seguro que el de Daniell. Consta el aparato de dos dedales de plata, de paredes delgadas y pulimentadas, de 45 milímetros de altura y 20 de diámetro ([fig. 225](#)), en los cuales se ajustan dos tubos de vidrio D y E. Cada uno de ellos contiene un termómetro muy sensible, fijo por medio de un tapón. El tubo D comunica por el mismo pie del sostén y por un tubo de plomo, con un aspirador G lleno de agua; y el tapón del mismo se halla atravesado por un tubo A, abierto por sus dos extremidades e introducido hasta el fondo del dedal. El tubo E no comunica con el aspirador, pues sólo contiene un termómetro para conocer la temperatura del aire.

Viértese el éter en el tubo D hasta como cosa de la mitad, y luego se abre la llave del aspirador, a fin de que salga el agua y se enrarezca el aire del tubo D. Por efecto de la presión atmosférica, entra entonces aire en el tubo A, pero como no puede penetrar en el D ni en el aspirador, sin pasar al través del éter, vaporiza una parte de este líquido, enfriándole tanto más pronto, cuanto más rápida sea la salida. Llega un instante en que el enfriamiento determina sobre el dedal un depósito de rocío, lo mismo que en el higrómetro de Daniell; y como el termómetro T da entonces la temperatura correspondiente, se poseen ya los elementos necesarios para calcular el estado higrométrico.

En este instrumento se halla toda la masa del éter a la misma temperatura, a causa de la agitación que le imprime la corriente de aire; y además se hacen a distancia las observaciones, por medio de un antejo, de manera que se evitan todas las causas de error.

337. Higróscopos. -Dase el nombre de *higróscopos* a unos aparatos que indican si hay más o menos vapor de agua en el aire, pero sin dar a conocer su cantidad. Se construyen de varias clases, pero los más usados son los de forma de figuritas, cuya cabeza se cubre o descubre con una capucha, según esté más o menos húmedo el aire. Están fundados estos instrumentos en la propiedad que tienen las cuerdas y los intestinos retorcidos de destorcerse por la acción de la humedad, y de torcerse más por la de la sequía. Dependen sus indicaciones de un pedacito de intestino retorcido, fijo por una de sus extremidades, mientras que la otra se adhiere a una pieza móvil. Estos higróscopos son perezosos, es decir, que como marchan con muchísima lentitud, sus indicaciones llevan siempre un retraso con respecto a las variaciones higrométricas del aire, y además son muy poco sensibles.

338. Problemas sobre la higrometría. -I. Calcular el peso del vapor de agua contenido en un volumen de aire V, a la temperatura t, marcando el higrómetro de cabello m grados.

Por medio de la tabla de Gay-Lussac (334) se encuentra el estado higrométrico E que corresponde a m grados del higrómetro, y en las tablas de las fuerzas elásticas se halla la tensión del vapor saturado F a t grados; por consiguiente, la igualdad  $f = F \times E$  (330), nos da a conocer la fuerza elástica f del vapor cuyo peso buscamos.

Sentado esto, 1 litro de aire a 0 y a la presión 76, pesando 1gr,293, su peso a  $t^\circ$  y a la presión f será  $1gr,293 \times f / (1 + at) 76$  (281, probl. VI); por consiguiente, 1 litro de vapor cuya tensión sea  $5/8$ , pesa a la misma temperatura y a una presión igual  $1gr,293 \times f \times 5 / (1 + at) \times 76 \times 8$ . Finalmente, de aquí se deduce, que el peso del vapor contenido en V litros de aire a t grados, siendo el estado higrométrico E, es de  $1gr,293 \times V \times f \times 5 / (1 + at) 76 \times 8$ , valor que es independiente de la presión atmosférica.

II. Determínese el peso P de un volumen de aire húmedo V, cuyo estado higrométrico es E, a la temperatura t y a la presión A, siendo la densidad del vapor los  $5/8$  de la del aire.

Para resolver este problema, importa observar que el volumen dado de aire no es otra cosa, según la ley segunda de las mezclas de los gases y de los vapores, que una mezcla de V litros de aire seco a t grados y a la presión A, menos la del vapor y de V litros de vapor a t grados y a la presión dada por el estado higrométrico; por lo tanto debemos determinar aisladamente el peso del aire y el del vapor.

La fórmula ya vista (330),  $f = F \times E$ , sirve para calcular la tensión f del vapor que existe en el aire, puesto que E es un dato y que F se encuentra en las tablas de las fuerzas elásticas. Conocida la

tensión  $f$ , si denominamos  $f'$  la tensión del aire, tendremos  $f+f'=A$ , de la cual se deduce  $f'=A-f=A-FE$ .

Queda reducida por lo tanto la cuestión a calcular el peso  $V$  litros de aire seco a  $t$  grados y a la presión  $A-FE$ , y después el de  $V$  litros de vapor también a  $t$  grados, pero a la presión  $FE$ . Y como sabemos que  $V$  litros de aire seco a  $t$  grados y a la presión  $A-FE$  pesan  $1\text{gr},293V(A-FE)/(1+at)76$  (281, probl. VI), y que, según hemos visto en el problema anterior,  $V$  litros de vapor a  $t$  grados y a la presión  $FE$ , pesan  $1\text{gr},293V \times FE \times 5 / (1+at)76 \times 8$ , efectuando por fin la suma de los dos pesos obtenidos y reduciendo, tendremos:

$$P=1\text{gr},293V(A-3/8FE)/(1+at)76 \text{ [A]}.$$

Si el aire se encontrase saturado, tendríamos  $E=1$ , y entonces esta fórmula se cambiaría en la que ya hemos deducido para las mezclas de los gases y de los vapores saturados, (321, probl. III).

La fórmula [A] como contiene además del peso  $P$ , muchas cantidades variables  $V$ ,  $E$ ,  $A$ ,  $t$ , podemos, tomando sucesivamente cada una de estas cantidades como incógnitas, proponer la solución de tantos problemas, cuantas son aquellas, la cual se obtendría resolviendo la ecuación [A] con relación a  $V$ , a  $E$ , a  $A$ , o a  $t$ . Presentemos un ejemplo en el problema siguiente.

III. Calcúlese a  $t$  grados y a la presión  $A$ , el volumen de un peso de aire  $P$ , cuyo estado higrométrico sea  $E$ , la densidad del vapor  $5/8$ , y conocida su tensión  $F$  a  $t$  grados, en las tablas de las fuerzas elásticas.

Resolviendo relativamente a  $V$  la ecuación [A] del problema anterior, se encuentra

$$V=P(1+at)76/1\text{gr},293(A-3/8FE) \text{ [B]}.$$

También podemos resolver este problema directamente. Para efectuarlo, siendo el peso  $P$  una mezcla de aire seco a  $t$  grados y a la presión  $A-FE$ , y de vapor a  $t$  grados y  $A$  la presión  $FE$ , representemos por  $x$  el peso del aire y por  $y$  el del vapor; además por el enunciado, se tiene  $x+y=P$  [1]. Pero siendo la densidad del vapor los  $5/8$  de la del aire, y debe ser igual a los  $5/8$  de  $x$  a una presión igual. Mas como el volumen de aire que se busca pesa  $x$  a la presión  $A-FE$ , su peso a la presión  $FE$ , que es la del vapor, no será más que  $x \times FE / A - FE$ ; por consiguiente,  $y=x \times FE \times 5/8 / A - FE$ .

Reemplazando este valor en la ecuación [1], se transformará en

$$x+x \times FE \times 5/8 / A - FE = P, \text{ de la cual se deduce } x=P(A-FE)/A-3/8FE.$$

Conocido el peso del aire, se obtendrá su volumen en litros, averiguando las veces que contiene dicho peso el de un litro de aire a  $t$  grados y a la presión  $A-FE$ ; y cómo un litro de aire a  $0$  grados y a la presión  $76$ , pesa  $1\text{gr},293$ , su peso a  $t$  grados y a la presión  $A-FE$ , será de  $1\text{gr},293(A-FE)/(1+at)76$ . Así, pues, obtendremos por último

$$V=P(A-FE)/A-3/8FE:1\text{gr},293(A-FE)/(1+at)76=P(1+at)76/1\text{gr},293(A-3/8FE),$$

fórmula que viene a ser la misma [B], que hemos obtenido anteriormente.

IV. *Corrección de la pérdida de peso que experimentan los cuerpos que se pesan en el aire.* - Ya hemos visto al ocuparnos de la balanza (51) que todos los pesos que se determinan con estos aparatos, son los aparentes, fundándose en el principio de que todo cuerpo pesado en el aire, pierde una parte de su peso igual al del aire desalojado (172); sin embargo, la solución de este problema es asaz complicada, porque no sólo varía el peso del aire desalojado con la presión, con la temperatura y con el estado higrométrico, sino que también el volumen de cuerpos que han de pesarse, y el de los *pesos* métricos, o los de cualquier otro sistema que se

empleen, varían a la par con la temperatura, de manera que debe efectuarse una corrección doble, es decir, una relativa a los pesos, y otra respecto a los cuerpos que se pesan.

1.<sup>a</sup> *Corrección relativa a los pesos.* -Para efectuar esta corrección, sean P sus pesos en el aire y A su altura real en el vacío; es decir, el que hemos anotado antes; sean además V el volumen de estos pesos a 0, K el coeficiente de dilatación lineal de la sustancia que los constituye, y D su densidad. Transformándose el volumen V a t grados en  $V(1+3Kt)$ , éste será igualmente el volumen de aire desalojado por los pesos. Por consiguiente, si representamos por m el peso de un litro de aire a t grados y a la presión A, en el momento de la pesada se tendrá:

$$P=A-mV(1+3Kt).$$

Pero según la fórmula ya conocida  $P=VD$  (107), puede reemplazarse V por  $A/D$ , y entonces la fórmula anterior acepta la forma

$$P=A[1-mV(1+3Kt)/D] \quad [1],$$

la cual nos da a conocer el valor en el aire de un peso representado por A, cuando se reemplaza m por su valor. Pero como m es el peso de un litro de aire más o menos húmedo a la temperatura t y a la presión A, su valor se calcula por la ecuación (A) que hemos encontrado anteriormente (probl. II).

2.<sup>a</sup> *Corrección relativa a los cuerpos que se pesan.* -Sean en la actualidad p el peso aparente del objeto que ha de pesarse, p su peso real en el vacío, d su densidad, k su coeficiente de dilatación, y t su temperatura. Empleando razonamientos iguales a los anteriores, encontraremos:

$$p=p[1-m(1+3kt)/d] \quad [2].$$

Sentado esto, recurriendo al empleo del método de las dobles pesadas y de una tara, cuyo peso aparente sea p', el peso real p', la densidad d' y el coeficiente k', y admitiendo que la temperatura y la presión no varíen, lo que acontece generalmente, tendremos:

$$p'=p'[1-m(1+3k't)/d'] \quad [3].$$

Si representamos por a y b los dos brazos de la cruz, se tendrá en la primera pesada (51),  $ap=bp'$ , y en la segunda,  $aP=bP'$ ; de donde se obtiene  $p=P$ . Reemplazando P y p por sus valores deducidos de las ecuaciones [1] y [2] que hemos escrito anteriormente, tendremos:

$$p[1-m(1+3kt)/d]=A[1-m(1+3Kt)/D].$$

de la cual se obtiene

$$p=A[1-m(1+3Kt)/D]/1-m(1+3kt)/d \quad [4],$$

que es la fórmula que resuelve el problema.

▽△

## Capítulo VII

▽△

## Conductibilidad de los sólidos, de los líquidos y de los gases

339. Conductibilidad de los sólidos. - La *conductibilidad* es la propiedad que poseen los cuerpos de transmitir el calórico con mayor o menor facilidad en el interior de su masa. Admítase que se verifica este género de propagación por una radiación interna de molécula a molécula. Como no todos los cuerpos conducen con igualdad el calórico, se denominan *buenos conductores* los que lo transmiten fácilmente, entre los cuales se cuentan en particular los metales; y se da el nombre de *malos conductores* a los que ofrecen mayor o menor resistencia respecto a la propagación del calor, como son el vidrio, las resinas, las maderas, y en particular, los líquidos y los gases.

Para comparar el poder conductor de los sólidos, construyó el médico holandés Ingenhousz, que murió a fines del siglo pasado, un aparatito que conserva su apellido ([fig. 226](#))<sup>(2)</sup>. Consiste en una caja de hoja de lata, a la cual se fijan, por medio de orificios y de tapones, varias barritas de diversas sustancias, como por ejemplo, de hierro, de cobre, de madera y de vidrio. Estas barritas penetran algunos milímetros en el interior de la caja, y se hallan cubiertas de cera blanca, que se funde a 61°. Llena de agua hirviendo la caja, se nota que en algunas barritas entra muy pronto en fusión la cera a mayor o menor distancia, mientras que en otras no surge ningún indicio de fusión. El poder conductor es, evidentemente, tanto más intenso, cuanto mayor es la distancia a la cual se ha fundido la cera.

M. Despretz midió los poderes conductores de los sólidos con el aparato representado en la [figura 227](#). Consiste en una barra prismática que posee de decímetro en decímetro pequeñas cavidades llenas de mercurio, en cada una de las cuales se sitúa un termómetro. Expuesta dicha barra, por una de sus extremidades, a un foco constante de calor, se ve que los termómetros suben sucesivamente a partir del foco, y que indican temperaturas fijas, pero decrecientes de un termómetro a otro. Merced a este procedimiento, comprobó M. Despretz la siguiente ley, que por vez primera formuló Lambert, de Berlín: *Si las distancias al foco crecen en progresión aritmética, los excesos de temperatura sobre el aire ambiente decrecen en progresión geométrica.*

Con todo, sólo es exacta esta ley en los metales muy buenos conductores, como el oro, el platino, la plata y el cobre; no es más que aproximada respecto al hierro, al zinc, al plomo y al estaño, y en ninguna manera aplicable a los cuerpos no metálicos, como el mármol, la porcelana, etc.

Representando por 1000 el poder conductor del oro, encontró M. Despretz que el de las sustancias siguientes es:

Platino.	981	Estaño.	304
Plata.	973	Plomo.	179
Cobre.	898	Mármol.	24
Hierro.	374	Porcelana.	12
Zinc.	363	Tierra de ladrillos.	11

Los señores Wiedmann y Franz publicaron en 1853, en los anales de Poggendorf, el resultado de largas investigaciones sobre la conductibilidad de los metales. Con objeto de no alterar la forma de las barras metálicas abriendo en ellas cavidades, conforme lo había efectuado M. Despretz, destruyendo así parcialmente la continuidad de los metales, se valieron aquellos físicos de un procedimiento que evitaba esta causa del error. Midieron la temperatura de las barras, en sus diferentes regiones, por medio de las corrientes termo-eléctricas que se obtenían aplicando sobre éstas el punto de soldadura de un elemento de la pila termo-eléctrica de Melloni (lib. X, cap. VIII).

Las barras metálicas eran lo más regulares posible, situándose en un espacio cuya temperatura era constante. Una de las extremidades de la barra se hallaba en comunicación con un foco de calor, y el elemento termo-eléctrico que debía estar en contacto con las barras era de cortísimas dimensiones, a fin de sustraerles muy poco calor.

Operando así, obtuvieron los señores Wiedmann y Franz resultados que diferían notablemente de los de M. Despretz. Representando por 100 la conductibilidad de la plata, encontraron para los demás metales los números siguientes:

Plata.	100	Acero.	11,6
Cobre.	73,6	Plomo.	8,5
Oro.	53,2	Platino.	8,4
Estaño.	14,5	Aleación de Rose.	2,8
Hierro.	11,9	Bismuto.	1,8

Las sustancias orgánicas conducen mal el calórico, y en cuanto a las maderas, demostró M. de la Rive, de Ginebra, que su conductibilidad es mucho mayor en el sentido de las fibras que transversalmente, y que las maderas más densas, son los mejores conductores. El salvado, la paja, la lana y el algodón, que son cuerpos poco densos, y que, por decirlo así, están formados de partes discontinuas, son muy malos conductores.

340. Conductibilidad de los líquidos. -La conductibilidad de los líquidos es sumamente débil, según puede demostrarse por medio del siguiente experimento: Se coloca en el fondo de una vasija cilíndrica de vidrio D ([fig. 228](#)), un pequeño termómetro B, compuesto de dos esferas de vidrio reunidas por un tubo encorvado *m*, en el cual hay un pequeño índice de líquido colorado. Llena luego de agua la vasija D a la temperatura ordinaria, se introduce parcialmente en dicho líquido otra vasija de hoja de lata A, en la cual se ha echado agua hirviendo o aceite a 2 o 300 grados. Nótase entonces que se calienta muy poco la esfera del termómetro más próxima al fondo de la vasija A, pues corre una cantidad muy poco sensible el índice *m*; de lo cual se deduce la débil conductibilidad del agua. Igual resultado ofrecen otros líquidos.

Efectuando la experiencia con un aparato análogo al anterior, y disponiendo una serie de termómetros, de manera que unos se encuentren debajo de otros, en toda la altura de la vasija D, encontró M. Despretz que se propaga el calor en los líquidos siguiendo la misma ley que en las barras metálicas, pero que la conductibilidad es incomparablemente más débil.

341. Estudio de la calefacción de los líquidos. -Cuando se calientan los líquidos por su parte inferior, resulta de su débil conductibilidad, que el calor se propaga particularmente por medio de corrientes ascendentes y descendentes que se establecen en su masa. Explícanse estas corrientes, por la dilatación de las capas inferiores que, volviéndose menos densas, suben en el líquido y son reemplazadas por las superiores, más frías, y de consiguiente, más densas. Se hacen estas corrientes visibles echando en el agua aserrín, que sube y baja con ellas. Para esto se hace el experimento como lo demuestra la [figura 229](#).

342. Conductibilidad de los gases. -No puede apreciarse de un modo directo el poder conductor de los gases, a causa de su gran diatermancia y de la suma movilidad de sus moléculas; pero,

cuando se ponen algunas trabas a sus movimientos, aparece casi nula su conductibilidad. Obsérvase, en efecto, que todas las sustancias entre cuyos filamentos queda aire interpuesto, presentan una gran resistencia a la propagación del calórico, como sucede con la paja, la plumazón y las pieles. Cuando se calienta una masa gaseosa, lo efectúa sobre todo por su contacto con un cuerpo caliente, y por las corrientes ascendentes originadas por la dilatación, de igual manera que en los líquidos.

343. Aplicaciones. -La mayor o menor conductibilidad de los cuerpos es un manantial de numerosas aplicaciones. ¿Se trata, por ejemplo, de conservar por mucho tiempo caliente un líquido? Pues se le encierra en una vasija de doble cubierta, cuyo intervalo esté lleno de materias no conductoras, como aserrín, vidrio, carbón machacado o paja. El mismo sistema se utiliza para impedir que un cuerpo absorba el calórico; de suerte que, para conservar el hielo durante el verano, se le pone una cubierta o una capa de paja o de lana.

Si en nuestras habitaciones nos parecen más fríos los embaldosados que los entarimados, es porque aquéllos conducen mejor el calórico. La sensación de calor o de frío que experimentamos al contacto de ciertos cuerpos, depende de la conductibilidad. Si su temperatura es menos alta que la nuestra, nos parecen más fríos de lo que son, a causa del calórico que nos quitan en virtud de su conductibilidad, conforme puede observarse con el mármol; y si, por el contrario, es superior su temperatura a la de nuestro cuerpo, nos parecen más calientes de lo que en realidad lo están, por el calórico que nos ceden de los diversos puntos de su masa, que es el fenómeno que nos ofrece una barra de hierro expuesta al sol.

▽△

## Capítulo VIII

▽△

### Calorimetría, teoría dinámica del calórico

344. Objeto de la calorimetría; caloría. -El objeto de la calorimetría es medir la cantidad de calor que ceden o absorben los cuerpos cuando su temperatura baja o sube un número de grados conocido, o cuando cambian de estado.

No se puede medir la cantidad absoluta de calor que pierde o adquiere un cuerpo, y sí únicamente la cantidad relativa, es decir, la relación entre la cantidad absoluta y la que pierde o absorbe otro cuerpo para producir un efecto determinado. Por eso se ha convenido en tomar como *unidad de calor o caloría* la cantidad de calor necesaria para elevar de cero a un grado la temperatura de un kilogramo de agua.

345. Calórico específico. -Llámase *calórico específico* o *capacidad calorífica* de un cuerpo, la cantidad de calor que absorbe cuando se eleva su temperatura de cero a un grado, comparativamente con la que absorbería en el mismo caso un peso igual de agua. Por esta definición se ve que, en último resultado, sirve de unidad el calórico específico del agua.

Se comprueba con la mayor facilidad que no todos los cuerpos poseen el mismo calórico específico, pues mezclando, por ejemplo, un kilogramo de mercurio a 100 grados con otro de agua a cero, sólo llega a unos tres grados la temperatura de la mezcla. Es decir, los 97 grados de calor que ha perdido el mercurio hacen subir tan sólo tres grados al mismo peso de agua. El agua absorbe, pues, en igualdad de peso, unas 33 veces más calórico que el mercurio, para una misma elevación de temperatura.

Tres son los métodos para la determinación de los calóricos específicos, a saber: el de la fusión del hielo, el de las mezclas, y el del enfriamiento. En este último, se calcula el calórico

específico de un cuerpo por el tiempo que tarda en enfriarse un número conocido de grados. Por nuestra parte, nos limitaremos a exponer los dos primeros métodos; pero ante todo conviene exponer cómo se mide la cantidad de calórico absorbida por un cuerpo de masa y calórico específico dados, cuando aumenta su temperatura cierto número de grados.

346. Medida del calor sensible absorbido por los cuerpos. -Sean  $m$  el peso de un cuerpo en kilogramos,  $c$  su calórico específico y  $t$  su temperatura. Sirviendo de unidad la cantidad de calor necesaria para que ascienda de cero a 1 grado un kilogramo de agua, es claro que se necesitarán  $m$  unidades de éstas para elevarse de cero a 1 grado un peso de  $m$  kilogramos de agua; y para hacer subir este último peso de cero a  $t$  grados, se requerirán  $t$  veces más, esto es,  $mt$ . Supuesto que tal es la cantidad de calor necesaria para que pase de cero a  $t$  grados  $m$  kilogramos de agua, cuyo calórico específico es 1, es evidente que, para un cuerpo del mismo peso de calórico específico  $c$ , serán necesarias  $c$  veces  $mt$  o  $mtc$ . De donde se deduce que, cuando se calienta un cuerpo de cero a  $t$  grados, *la cantidad de calor que absorbe puede representarse por el producto de su peso, por su temperatura y por su calórico específico*. Este principio es la base de las fórmulas que van a servir para la determinación de los calóricos específicos.

Si el cuerpo se calienta o se enfría de  $t$  a  $t'$ , grados, el calor absorbido o emitido estará igualmente representado por la fórmula  $m(t'-t)c$ , o bien  $m(t-t')c$ .

Recomendamos a los alumnos que se fijen mucho en estas fórmulas, porque con ellas se resuelven todos los problemas que se refieren a los calóricos específicos.

347. Método de las mezclas. -Para calcular, por el método de las mezclas, el calórico específico de un cuerpo sólido o líquido, se le pesa o se le da una temperatura conocida, que se determina, si es sólido el cuerpo, manteniéndolo cierto tiempo en una corriente de vapor a 100 grados, e introduciéndolo luego en una masa de agua fría cuyo peso y temperatura se conozcan igualmente. De la cantidad de calor que cede el cuerpo al agua se deduce desde luego su calórico específico.

Representemos al efecto por  $M$  el peso del cuerpo, por  $T$  su temperatura en el momento de introducirle en el líquido, y por  $c$  su calórico específico.

Sean, de igual manera,  $m$  el peso del agua fría y  $t$  su temperatura.

Sean, por último,  $m'$  el peso de la vasija que contiene el agua,  $c'$  su calórico específico y  $t$  su temperatura, que es evidentemente la del agua. Dicha vasija es, en general, un pequeño cilindro de plata o de latón, de paredes delgadas y pulimentadas.

Apenas se introduce el cuerpo caliente en el líquido sube la temperatura de éste; y si representamos por  $q$  la más alta a que llegue, se ve que se enfría el cuerpo un número de grados igual a  $(T-q)$ , y que pierde, de consiguiente, una cantidad de calor que tiene por medida  $Mc(T-q)$  (346). El agua y la vasija se calientan, por el contrario, un número de grados igual a  $(q-t)$ , absorbiendo respectivamente las cantidades de calor  $m(q-t)$  y  $m'c'(q-t)$ , supuesto que el calórico específico del agua es la unidad. La cantidad de calor que cede el cuerpo caliente, equivale por lo tanto a la suma de las cantidades absorbidas por el agua y la vasija; de manera que tenemos la ecuación

$$Mc(T-q) = m(q-t) + m'c'(q-t) \quad [1],$$

de la cual es fácil deducir el valor de  $c$ , una vez que se conozca el calórico específico  $c'$  de la vasija. Pero si no se conociese, principiariamos por determinarle, introduciendo en el agua un cuerpo caliente de la misma materia que la vasija, y por lo tanto, del mismo calor específico. Entonces la ecuación anterior toma la forma

$$Mc'(T-q) = m(q-t) + m'c'(q-t) \quad [2].$$

es decir, que sólo contiene la incógnita  $c'$ .

Conocido ya el calórico específico de la vasija, se pasa a resolver la ecuación [1] poniendo en el segundo miembro  $(q-t)$  como factor común, y se obtiene entonces

$$Mc(T-q)=m(m+m'c')(q-t) [3];$$

y dividiendo los dos miembros por  $M(T-q)$ , tendremos

$$c=(m+m'c')(q-t)/M(T-q) [4].$$

Frecuentemente se escribe el valor de  $c$  según esta forma:  $c=(m+m)(q-t)/M(T-q)$  [5]; haciendo  $m'c'=m$ ; es decir, que  $m$  es el peso de agua que absorbería la misma cantidad de calor que la vasija, lo cual se expresa diciendo que la vasija está *reducida* en agua.

Por último, a fin de prestar toda la precisión posible al método de las mezclas, hay que tener también en cuenta el calor que absorben el vidrio y el mercurio del termómetro.

Con objeto de apreciar las pérdidas de calor originadas por la radiación en el procedimiento que acabamos de describir, se hace primero un experimento con el cuerpo mismo cuyo calórico específico se busca, con la idea de conocer de un modo aproximado el número de grados que debe ascender la temperatura del agua y de la vasija. Si dicho número es, por ejemplo, 10 grados, se enfrían la mitad el agua y la vasija, es decir, 5 grados bajo la temperatura del aire ambiente, procediéndose luego al experimento definitivo. Como aumenta entonces sensiblemente en unos 10 grados el agua, resulta que la vasija, cuya temperatura era en un principio 5 grados inferior a la del recinto, es al fin del experimento 5 grados superior. Media, pues, una compensación entre la pérdida y la ganancia de calor que provienen de la radiación durante el experimento.

348. Aparato de M Regnault para el método de las mezclas. -La [figura 230](#) representa el aparato que M. Regnault ha adoptado para la investigación de los calóricos específicos por el método de las mezclas.

La pieza principal de este aparato es una estufa AA, representada en sección en la [figura 231](#). Se compone de tres compartimientos cilíndricos: en el del centro existe suspendido, con hilos de seda, un cestito de alambre de latón, en el cual se coloca, en pedazos, la sustancia que se somete al experimento. Un termómetro T, fijo en el centro mismo de estos fragmentos, marca la temperatura. En el segundo compartimiento *pp*, circula una corriente de vapor que llega por un tubo *e*, procedente de un generador B, y se marcha luego por un tubo *a* a un serpentín, donde se condensa. El tercer compartimiento *ee* está lleno de aire, destinado a impedir la pérdida de calor. Debajo de la estufa hay una cámara K, envuelta por una doble pared EE, formando un receptáculo que se mantiene lleno de agua fría, a fin de oponerse a la trasmisión del calórico procedente de la estufa y del generador. Finalmente, el compartimiento central de la estufa está cerrado por un registro *r* que se abre a voluntad, y que permite entonces hacer pasar el cestito *c* de la estufa a la cámara K.

Ahora bien; a la izquierda de la estufa se ve un vasito de latón D, de paredes muy delgadas, el cual está suspendido, por hilos de seda, sobre un carretoncillo que puede resbalar sobre una corredera para llegar a la cámara K. El vaso D, que se halla destinado a servir de calorímetro, está lleno de agua, y en ésta entra un termómetro *t* que marca su temperatura. Por último, un termómetro *t'*, colocado cerca de los aparatos, marca la temperatura del aire ambiente.

Dispuesto así el aparato, cuando el termómetro T indica que el cuerpo puesto en el cestito *c* ha adquirido una temperatura estacionaria, lo cual ocurre pasadas dos horas y media o tres, se levanta la pantalla *h*, y se hace adelantar el vaso D hasta que corresponda exactamente debajo del compartimiento central de la estufa. Tirando entonces del registro *r*, se deja caer rápidamente, en el agua del vaso D, el cestito *c* y las sustancias que contiene. Retirando al

momento el carretoncillo y el vaso D, se remueve el agua de éste hasta que el termómetro  $t$  quede estacionario. La temperatura que indica entonces es la que se ha representado por  $q$  en la fórmula del párrafo anterior. Conocida esta temperatura, lo restante del cálculo se verifica como ya se ha dicho. Sin embargo, se tiene en cuenta el calor cedido al calorímetro por el cestillo de latón; M. Regnault ha considerado además la que es absorbida por el medio ambiente.

349. Método de la fusión del hielo. -El método que vamos a describir está fundado en el calórico latente absorbido por el hielo que se funde, cantidad de calor que, según veremos muy pronto (355), es de 79 unidades para un kilogramo de hielo. Lavoissier y Laplace idearon el aparato que en este método se emplea, y que se designa con el nombre de *calorímetro de hielo*. La [fig. 232](#) lo representa visto por el exterior, y la [233](#) es un corte o una sección del mismo. Consta dicho aparato de tres cubiertas concéntricas de hoja de lata, colocándose en la del centro el cuerpo M ([fig. 233](#)), cuyo calórico específico se busca, y llenando de hielo machacado los otros dos compartimientos. El hielo de la cavidad A debe fundirse por el cuerpo caliente, y el de la cavidad B se opone a la radiación del recinto sobre el aparato. Las dos llaves D y E dan salida al agua que origina la fusión del hielo.

Cuando se quiere investigar el calórico específico de un cuerpo sólido por medio de este calorímetro, se determina primero el peso  $m$  de dicho cuerpo, en kilogramos; se le da luego una temperatura conocida  $t$ , manteniéndole por algún tiempo en un baño caliente de agua o de aceite o en una corriente de vapor; trasladándole en seguida rápidamente a la cavidad central, colocando de nuevo las cubiertas y recubriéndolas de hielo. Recógese entonces el agua que vierte la llave D, y luego que cesa la salida, se determina en kilogramos su peso  $P$ , que representa evidentemente el del hielo fundido. Supuesto que 1 kilogramo de hielo absorbe, al fundirse, 79 unidades de calor,  $P$  kilogramos han absorbido  $P$  veces 79 unidades. Por otra parte, dicha cantidad de calor es necesariamente igual a la que cedió el cuerpo M mientras se estuvo enfriando de  $t$  grados a cero, es decir, a  $mtc$  (346); porque se admite como evidente que al enfriarse un cuerpo de 1 grados a cero, cede precisamente la cantidad de calor que había absorbido para calentarse de cero a  $t$  grados. Se tiene, pues, la igualdad

$$mtc=79P; \text{ de donde } c=79P/mt.$$

Muchísimas causas de error presenta el método del calorímetro de hielo, consistiendo la principal en que parte del agua de fusión queda adherida al hielo, de suerte que no puede evaluarse con exactitud el peso  $P$ . Además, el aire exterior que entra, en el calorímetro por las llaves, aumenta la cantidad de hielo fundido. Óbvianse en parte estos inconvenientes, sustituyendo al calorímetro el *pozo del hielo*, que tal es el nombre que se da a una cavidad abierta en un pedazo de hielo compacto por medio de un hierro candente, y en la cual se coloca el cuerpo cuyo calórico específico se busca, después de haberle dado una temperatura conocida ([fig. 234](#)). Trazado con esmero el orificio, se le cierra luego herméticamente con otro pedazo de hielo bien modelado, y cuando se considera que habrá llegado ya a cero el cuerpo, se saca juntamente con el agua de fusión, de suerte que, después de determinados da el peso de ésta, sólo falta sustituirlo en la fórmula anterior.

350. -Calórico específico de los líquidos. -El calórico específico de los líquidos puede determinarse igualmente por el método del enfriamiento, por el de las mezclas, o por el del calorímetro de Lavoissier y Laplace. Sólo que en este último método es preciso encerrarlos en una vasijita de hoja de lata, o en tubos de cristal que se colocan en la cavidad M.

Comparando entre sí los números de la tabla siguiente, se observa que el agua y la esencia de trementina tienen un calórico específico superior al de las otras sustancias, y sobre todo respecto al de los metales. Esta propiedad es general para los líquidos. Por tener el agua una capacidad calorífica tan grande, es por lo que se necesita tanto tiempo para calentarla o enfriarla, puesto que absorbe o cede entonces una cantidad mucho mayor de calor que otra sustancia, supuestas iguales la masa y la temperatura. Esta doble propiedad se utiliza en el temple del acero, y en la calefacción por medio de la circulación del agua caliente, de lo cual nos ocuparemos más adelante (410).

351. Calóricos específicos medios de los sólidos y de los líquidos, entre cero y 100°. -M. Regnault ha calculado, por el método de las mezclas y por el del enfriamiento, el calórico específico de un gran número de cuerpos. A continuación damos los que ha obtenido, por el primer método, para los cuerpos que se usan con mayor frecuencia en las artes.

SUSTANCIAS.	CALÓRICOS específicos.	SUSTANCIAS.	CALÓRICOS específicos.
Agua.	1,00800	Níquel.	0,10863
Esencia de trementina.	0,42590	Cobalto.	0,10696
Negro animal calcinado.	0,26085	Zinc.	0,09555
Carb. de madera calcinado.	0,24111	Cobre.	0,09515
Azufre.	0,20259	Latón.	0,09391
Grafito.	0,20187	Plata.	0,05704
Vidrio de los termómetros.	0,19768	Estaño.	0,05623
Fósforo.	0,18949	Antimonio.	0,05077
Diamante.	0,14687	Mercurio.	0,03332
Fundición blanca.	0,12983	Oro.	0,03244
Hierro.	0,11379	Platino laminado.	0,03243
Acero dulce.	0,1175.	Bismuto.	0,03084

Los números comprendidos en esta tabla representan los calóricos específicos medios entre cero y 100 grados; pues, efectivamente, resulta de los estudios de Dulong acerca del calor, que los calóricos específicos aumentan con la temperatura. Los de los metales, por ejemplo, son mayores entre 100 y 200 grados, que entre cero y 100, y mayores aun de 200 a 300. Es decir, que para elevar la temperatura de un cuerpo de 200 a 250 grados, se requiere más calor que para efectuarlo de 100 a 150, y en este último caso, más que para hacerlo de cero a 50.

En una palabra, el aumento de calórico específico con la temperatura, es tanto más sensible, cuanto los cuerpos se hallan más próximos a su punto de fusión. Por el contrario, toda acción que aumenta la densidad de los cuerpos y la agregación de sus moléculas, disminuye su calórico específico.

En cuanto a los líquidos, su calórico específico aumenta con la temperatura con mucha más rapidez todavía que el de los sólidos. El agua debe exceptuarse, sin embargo; pues su calórico específico aumenta mucho menos que el de los otros líquidos.

Finalmente, una misma sustancia posee mayor calórico específico en el estado líquido que en el sólido; y más todavía que en estos dos estados, en gaseoso.

352. Ley de Dulong y Petit sobre el calórico específico de los átomos. -En 1819, Dulong y Petit dieron a conocer la ley notable, de que el producto del calórico específico de los cuerpos simples por sus pesos atómicos es el mismo para todos los cuerpos, e igual a 37; cuya ley también puede enunciarse diciendo que, *para los cuerpos simples, los calóricos específicos están en razón inversa de sus pesos atómicos.*

M. Regnault, después de haber determinado con mucho cuidado los calóricos específicos de un gran número de cuerpos, ha encontrado que el producto del peso atómico por el calórico específico no es constante, como lo habían anunciado Dulong y Petit; pero que este producto varía tan sólo entre 38 y 42, variación que puede resultar de no haberse determinado los calóricos específicos a distancias iguales del punto de fusión de los cuerpos.

M. Regnault ha formulado además las dos leyes siguientes, sobre los calóricos específicos de los cuerpos compuestos y de las aleaciones:

1.<sup>a</sup> *En los cuerpos compuestos de igual fórmula atómica, el calórico específico está en razón inversa del peso atómico.*

2.<sup>a</sup> *Para temperaturas un poco distantes del punto de fusión, el calórico específico de las aleaciones es exactamente la media de los calóricos específicos de los metales componentes.*

353. *Calórico específico de los gases.* -Refiérese el calórico específico de los gases al del agua o al del aire; pero en el primer caso representa la cantidad de calor necesaria para elevar de 1 grado un peso dado de gas, comparativamente con la que sería necesaria al mismo peso de agua; y en el segundo, la cantidad de calor indispensable para hacer subir de 1 grado un volumen dado de gas, comparativamente con la que se necesitaría para el mismo volumen de aire.

Cuando se consideran bajo este último punto de vista los calóricos específicos de los gases, se les puede suponer además a *presión constante* y a volumen variable, o bien a *volumen constante* según una presión variable.

Los calóricos específicos de los gases, con relación al agua, se determinaron, en 1812, por Delaroche y Berard. Medíase al efecto la cantidad de calor que cede a un peso conocido de agua, otro también conocido de gas, que circulaba por un serpentín sumergido en el agua. Deducíase en seguida de ella el calórico específico del gas por medio de un cálculo análogo al que se efectúa para el método de las mezclas.

Los mismos físicos determinaron los calóricos específicos de los gases, a presión constante, refiriéndolos al aire comparando entre sí las cantidades de calor cedidas a un mismo peso de agua por volúmenes iguales de gas y de aire, a la misma temperatura y a la presión atmosférica, durante todo el experimento. Después de los trabajos de Delaroche y Berard, aplicaron los señores de la Rive y Marcet, en 1835, el método del enfriamiento a la misma determinación.

Por último, los calóricos específicos de los gases, a volumen constante, siempre con relación al aire, se han calculado por Dulong, apoyándose en una fórmula que da a conocer la velocidad de propagación del sonido en los diferentes gases.

En virtud de los cálculos de Laplace y de Poisson, y de los experimentos de Clément y Désormes, de Delaroche y Berard, de Gay-Lussac y de Dulong, se había admitido hasta hace poco que el calórico específico de los gases a presión constante, es siempre mayor que a volumen constante. Pero en un trabajo reciente, y siguiendo un método completamente nuevo, acaba de descubrir M. Regnault que es nula o sumamente pequeña la diferencia entre estas dos especies de calórico específico.

354. *Medida del calórico latente de fusión.* -Hemos visto (288) que, al pasar los cuerpos de sólidos a líquidos, hay una absorción más o menos considerable de calórico latente; pero ahora debemos manifestar cómo se mide la cantidad de calor que entonces absorbe la unidad de peso. Esta cuestión se resuelve por el método de las mezclas, apoyándose, no obstante, en el principio, evidente al parecer, de que, al solidificarse un cuerpo, cede una cantidad de calórico exactamente igual a la que había absorbido durante la fusión.

Propongámonos, por ejemplo, determinar el calórico de fusión del plomo. Fúndese un peso  $M$  de este cuerpo, y después de averiguada su temperatura  $T$ , se le vierte en una masa de agua de meso  $m$  y temperatura  $t$  conocidas. Llamemos  $c$  al calórico específico del plomo,  $x$  al calórico de fusión, es decir, a la cantidad de calor latente absorbida por la unidad de peso al fundirse, o lo que es lo mismo, el que restituye en el momento de la solidificación, y por fin, sea  $q$  la temperatura final del agua calentada por el plomo.

Calentándose la masa de agua de  $t$  a  $q$  grados, ha absorbido una cantidad de calórico

representada por  $m(q-t)$  (346), y además, al enfriarse la masa de plomo de  $T$  a  $q$ , cedió por un concepto, una cantidad  $Mc(T-q)$ , y por otro, en el momento de la solidificación emite  $Mx$ . Se tiene, pues, la ecuación

$$Mc(T-q)+Mx=m(q-t), \text{ de donde } x=m(q-t)-Mc(T-q)/M.$$

355. Calórico de fusión del hielo. -Muchísimo interesa conocer el calórico de fusión del hielo, por las aplicaciones a que da lugar. Determinásele también por el método de las mezclas. Sean, al efecto,  $M$  un peso de hielo a cero,  $m$  otro de agua caliente a  $t$  grados, suficiente para fundir todo el hielo. Échase éste en el agua, y luego de completada la fusión, se mide la temperatura final  $q$  de la mezcla. Al enfriarse el agua de  $t$  grados a  $q$ , cedió una cantidad de calor igual a  $m(t-q)$ ; y en cuanto al hielo, si se representa por  $x$  su calórico de fusión, absorbe, para fundirse, una cantidad de calor  $Mx$ ; pero además se calienta después de la fusión el agua formada, pasando su temperatura de cero a  $q$  grados, y absorbiendo, por lo mismo, una cantidad de calor  $Mq$ . Obtíenese, por fin, la ecuación  $Mx+Mq=m(t-q)$ , de la cual se deduce el valor de  $x$ .

Por medio de este procedimiento, y evitando con el mayor cuidado todas las causas de error, encontraron los señores la Provostaye y Desains, que el calórico de fusión del hielo es 79; es decir, que un kilogramo de hielo que se funde, absorbe, en el estado de calórico latente, la cantidad de calor necesaria para elevar 79 kilogramos de agua de cero a un grado, o lo que es igual, un kilogramo de agua de cero a 79 grados.

M. Person, que ha efectuado numerosas investigaciones sobre los calóricos latentes, ha encontrado experimentalmente los siguientes números para los calóricos latentes de varios cuerpos simples y compuestos:

Agua.	79,25	Bismuto.	12,64
Nitrato de sosa.	62,97	Azufre.	9,37
Zinc.	28,13	Plomo.	5,37
Plata.	21,07	Fósforo.	5,03
Estaño.	14,25	Aleación de Darcet.	4,50
Cadmio.	13,66	Mercurio.	2,83

356. Medida del calórico latente de vaporización. -Hemos visto (315) que los líquidos, al evaporarse, emiten latente una cantidad muy considerable de calor, que se designa con el nombre de calórico de elasticidad o de vaporización. A fin de determinar la cantidad de calor absorbida en tal caso por la unidad de peso de los diferentes líquidos, se admite como evidente que, un vapor que pasa a líquido, deja en libertad una cantidad de calórico precisamente igual a la que había absorbido al evaporarse.

Ahora bien, el método que se aplica es el mismo que para la determinación de los calóricos específicos de los gases con relación al del agua. La [figura 235](#) representa el aparato en cuestión. Prodúcese el vapor en una retorta C, cuya temperatura indica un termómetro, y se dirige a un serpentín SS sumergido en agua fría, donde se condensa cediendo al serpentín y al agua de la vasija B su calórico latente. Recógese el agua que resulta de la condensación en una vasija A, y su peso da a conocer el del vapor que cruzó por el serpentín. En fin, varios termómetros, situados en la vasija B, indican la elevación de temperatura del agua.

Ahora bien; sean  $M$  el peso del vapor condensado,  $T$  su temperatura al entrar en el serpentín, y  $x$  su calórico de vaporización. Sean, además,  $m$  el peso del agua en que se introduce el serpentín, incluyendo en él los de la vasija B y del serpentín reducidos a agua,  $t$  la temperatura inicial del agua, y  $q$  la final al terminar el experimento.

Obsérvese, para medir el calórico, que cede el vapor, que al principio del experimento el agua de condensación sale a  $t$  grados, siendo así que al fin sale a  $q$ ; de suerte que puede admitirse que, durante todo el experimento, es su temperatura un término medio entre  $t$  y  $q$ , es decir,

$t+q/2$ . El peso  $M$  de vapor ha cedido, pues, después de su condensación, la cantidad de calor  $M(T-t+q/2)$ ; pero, además, en el momento de su liquefacción, emite otra cantidad representada por  $Mx$ . Por otra parte, el calor absorbido por el agua fría, el serpentín y la vasija, es  $m(q-t)$ , de manera que se tiene

$$Mx+M(T-t+q/2)=m(q-t).$$

Esta ecuación da a conocer  $x$ . Por este medio encontró  $M$ . Despretz el número 540 para el calórico de elasticidad del vapor de agua, es decir, que un gramo de agua a 100 grados absorbe, al vaporizarse, la cantidad de calor necesaria para elevar 540 gramos de agua de cero a un grado. MM. Fabre y Silberman han encontrado 535,8.

357. Problemas sobre los calóricos específicos y los calóricos latentes. -I. Proyectando en una vasija de vidrio que pesa 12 gramos, y que contiene 0lit.,15 de agua a 10 grados, un pedazo de hierro de 20 gramos de peso y a la temperatura de 98 grados, se nota que el agua sube a 11°,29; pídesse con estos datos el calórico específico del hierro, sabiendo que el del vidrio es 0,19768.

Este problema se resuelve por medio de la fórmula [3] del párrafo 347, reemplazando en ella las letras  $M, m, m', c', t'$  y  $q$ , por los números que les correspondan en el anterior enunciado; y por lo que hace al peso del agua, se obtiene sin más que observar que 1 litro de agua, pesando un kilogramo, 0lit.,15, o lo que es igual, 0lit.,150, pesa 150 gramos.

Haciendo las sustituciones indicadas en dicha fórmula resulta

$$20(98-11,29)c=(150+12\times 0,19768)(11,29-10),$$

de donde  $c=0,113$ .

II. Una masa de platino, de 40 gramos de peso, permanece en un horno el tiempo necesario para adquirir su temperatura; conseguido lo cual se le introduce en una cantidad de agua que pesa 84 gramos, y que marca 12 grados de temperatura, elevándose entonces 22 esta última. Se pide la temperatura del horno, sabiendo que el calórico específico del platino es 0,03243.

Si se representa por  $t$  la temperatura que se busca, el número de unidades de calor cedidas por el platino al enfriarse de  $t$  grados a 22, es  $40\times(t-22)\times 0,03243$ , en virtud de la fórmula  $m(t'-t)c$  del párrafo 246. De igual manera, el número de unidades absorbidas por el agua, cuyo calórico específico es 1, para calentarse de 12 a 22 grados, es  $84(22-12)$ , o sean 840. Como la cantidad de calor absorbida por el agua es necesariamente la misma que la que perdió el platino, se tiene  $40\times(t-22)\times 0,03243=840$ , de donde  $t=669$  grados.

Obsérvese que no es más que aproximado este valor de  $t$ , porque el número 0,03243 es el calórico específico del platino entre cero y 100 grados; pero se ha visto ya que es mayor a una temperatura más alta (351), y por consiguiente, es exagerado el número 669.

III. Abriendo una cavidad en un pedazo de hielo, y encerrando en ella una masa de estaño que pese 55 gramos, y cuya temperatura sea de 100 grados, se desea saber cuál será el peso del hielo fundido, teniendo presente que el calórico específico del estaño es 0,05623, y el de fusión de hielo 79.

Al enfriarse el estaño desde 100 a cero, pierde un número de unidades de calor representado por  $55\times 100\times 0,05623$ , siempre según la fórmula  $mtc$  (346). Como un kilogramo de hielo a cero absorbe para fundirse 79 unidades de calor (355), claro está que  $x$  kilogramos de hielo absorberán un número de unidades representado por  $79\times x$ . Tenemos, pues,

$$79x=55\times 100\times 0,05623, \text{ de donde } x=3\text{gr},9.$$

IV. ¿Cuánto hielo en peso se necesitará para que 9 litros de agua bajen de 20 grados a 5?

Sea  $M$ , en kilogramos, el peso buscado, el cual absorberá, para fundirse, un número de unidades de calor igual a  $79M$  (355); pero como el peso resultante de agua  $M$  se encuentra a cero en el momento de la fusión, y debe subir a  $5$ , absorbe una cantidad de calor representada por  $5M$ ; y de consiguiente, el calor total absorbido es  $79M+5M$ , u  $84M$ . Los 9 litros de agua ceden, al enfriarse, de  $20$  grados a  $5$ , la cantidad  $9(20-5)$ , o  $135$ . De manera que resulta

$$84M=135, \text{ de donde } M=1\text{kilog},607.$$

V. ¿Cuánto pesa el vapor de agua a  $100$  grados, necesario para calentar, al condensarse,  $208$  litros de agua desde  $14$  hasta  $32$  grados?

Sea  $p$  este peso en kilogramos. Valiendo  $540$  el calórico latente del vapor de agua (356), resulta que los  $p$  kilogramos de vapor ceden, al condensarse, una cantidad de calor representada por  $540 \times p$ , y dan  $p$  kilogramos de agua a  $100$  grados. Como se enfría luego esta agua hasta  $32$  grados, cede a su vez una cantidad de calor igual a  $p(100-32)$  o  $68p$ . Por otra parte, como los  $208$  litros que se calientan de  $14$  a  $32$  grados, pesan  $208$  kilogramos, absorben una cantidad de calor igual a  $208(32-14)$ , o  $3741$  unidades: se tiene, pues,

$$540p+68p=3741, \text{ de donde } p=6\text{kilog},158.$$

VI. En una vasija hay agua a  $11$  grados, y en otra a  $91$ ; ¿cuántos kilogramos habrá que tomar de ambas para formar un baño de  $250$  kilogramos a  $31$  grados?

Si  $x$  e  $y$  son los números de kilogramos que deben tomarse respectivamente de cada vasija, tenemos, en primer lugar, la ecuación  $x+y=250$  [1]. Se obtiene una segunda ecuación en  $x$  y en  $y$ , observando que  $x$  kilogramos a  $11$  grados contienen  $11x$  unidades de calor y que  $y$  kilogramos a  $91$ , comprenden  $91y$ . Por otra parte, los  $250$  kilogramos de mezcla a  $31$  grados, abrazan  $250 \times 31$ , o  $7750$  unidades, de manera que resulta la ecuación  $11x+91y=7750$  [2].

Resueltas las ecuaciones [1] y [2], se encuentra  $x=187\text{kilog},5$  o  $y=62\text{kilog},5$ .

▽△

## Teoría dinámica del calor

358. Equivalente mecánico del calor. -Partiendo de la idea de que el desarrollo del calor depende de un movimiento vibratorio de las moléculas, sometido a las leyes ordinarias de la mecánica, muchísimos geómetras y físicos trabajan hace algunos años en el desenvolvimiento de una nueva teoría, que designan con el nombre de *Teoría dinámica del calor*, y en la cual se proponen, no sólo hacer ver que una cantidad dada de calor puede transformarse en trabajo mecánico (395), y, recíprocamente, sino calcular además el trabajo mecánico que puede producir cierta cantidad de calor; o vice-versa, qué cantidad de calor puede originar un determinado trabajo mecánico. Se sabe efectivamente, que el calor puede producir un trabajo mecánico, conforme se nota en la expansión de los vapores y en la dilatación de los gases, y que recíprocamente es posible desarrollar calor por medio de una acción mecánica, tal como la percusión, la presión o el rozamiento (397 y 398). La teoría dinámica del calor es de actualidad, y merece llamar la atención de los físicos y de los mecánicos, porque puede introducir mejoras de la más alta importancia en las máquinas de vapor y en las de aire caliente.

Mongolfier es, al parecer, el primer físico que ha supuesto que hay identidad de origen entre el calórico y el movimiento, en el sentido, no sólo de que el calor es causa de movimiento, y éste de aquél, sino también en el de que el calor y el movimiento son dos formas distintas, dos efectos de una sola y única causa; en una palabra, que el movimiento puede transformarse en calor, y el calor en movimiento.

Fundándose Mongolfier en estas consideraciones teóricas, inventó, en 1800, una máquina, que llamó *piro-ariete*, con la cual, según su opinión, reducía el trabajo diario de un caballo de vapor al gasto de algunos céntimos. Consistía el principio del piro-ariete en dilatar, por medio del calor, cierta cantidad de aire, siempre igual, contenida en una vasija cerrada; en utilizar este aumento de volumen y de elasticidad para elevar una columna de agua; y luego, en restituir a la misma masa de aire el calor gastado por la dilatación y *convertido en efecto mecánico*, a fin de devolverle la fuerza elástica perdida, y así sucesivamente.

M. Séguin mayor, sobrino de Mongolfieri, ha presentado recientemente al Instituto de Francia (el 3 de enero de 1855) una memoria, en la cual describe una nueva máquina de vapor, fundada en las ideas teóricas arriba expuestas.

En 1824, publicó S. Carnot una obra intitulada *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, que contiene varias consideraciones muy notables acerca del modo de engendrar la fuerza motriz con el calor. Posteriormente ha sido objeto de estudio la teoría dinámica de muchos sabios, y en particular de los señores Joule, Thomson y Rankins, en Inglaterra; Mayer y Clausius, en Alemania; E. Clapeyron, Reech y Regnault, en Francia.

Carnot admitía que, en una máquina de vapor, el trabajo mecánico depende únicamente del paso del calor, en la máquina, de la caldera al condensador (388), pues la cantidad de calórico poseído por el vapor a su entrada en los cilindros, se encuentra completamente en el vapor que sale. En la nueva teoría la cantidad de calor que entra en la máquina no se conserva todo en el estado de calor, sino que desaparece parte en el trayecto, para convertirse en efecto mecánico, si bien, en todos los casos, el trabajo mecánico desarrollado es proporcional a la cantidad de calor que ha desaparecido.

Esta teoría ha denominado M. Joule *equivalente mecánico del calor*, a la cantidad de trabajo que puede producir una unidad de calor, o lo que es lo mismo, la cantidad de trabajo mecánico para desarrollar una unidad de calor. Después de muchísimos experimentos, encontró M. Joule que el equivalente mecánico del calor era 424 kilográmetros; es decir, que la cantidad de calor necesaria para calentar de 1 grado 4 kilogramo de agua puede desarrollar una fuerza motriz, capaz de elevar un peso de 424 kilogramos a un metro de altura por segundo. Siéndonos imposible describir aquí los experimentos de M. Joule, remitimos al lector a los *Archivos de las ciencias físicas y naturales de Ginebra* (mayo de 1854, p. 37).

Al tratar de las corrientes por inducción, daremos a conocer dos ejemplos notables de efectos mecánicos transformados en calor, en una experiencia de inducción, de la cual somos deudores a M. Foucault, como también en los nuevos experimentos electro-magnéticos, destinados al alumbrado de los faros, en los cuales la fuerza de un caballo de vapor crea una luz eléctrica brillante.

▽△

## Capítulo IX

▽△

### Radiación del calórico

359. Propagación del calórico en un medio homogéneo. -Siempre que un cuerpo se halla en un recinto cuya temperatura sea más o menos elevada que la suya, se observa que la de aquél sube o baja progresivamente hasta igualarse con la de este último; de este hecho se deduce que el cuerpo ha ganado o perdido cierta cantidad de calor que recibió de los cuerpos que lo rodean, o que cedió a los mismos. Se trasmite, pues, el calor de un cuerpo a otro, al través del espacio, de la misma manera que la luz. El calórico, que se propaga así a distancia, se designa con el nombre de *calórico radiante*, llamándose *rayo de calor*, o *rayo calorífico*, la línea recta que

sigue el calórico al propagarse.

También se trasmite el calor en la masa misma de los cuerpos; pero entonces es una verdadera radiación interior de molécula a molécula, fenómeno que ya hemos estudiado (339) con el nombre de *conductibilidad*.

360. Leyes de la radiación. -La radiación del calórico ofrece las tres leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *La radiación se verifica en todas direcciones alrededor de los cuerpos.* En efecto, si se coloca un termómetro en diferentes posiciones alrededor de un cuerpo caliente, indica en todas ellas una elevación de temperatura.

2.<sup>a</sup> *En un medio homogéneo se efectúa la radiación en línea recta.* Porque si se interpone una pantalla en la recta que une un foco calorífico con un termómetro, deja éste de sentir la influencia de aquél.

Pero, al pasar de un medio a otro, como por ejemplo del aire al vidrio, los rayos caloríficos, lo mismo que los luminosos, se desvían en general, constituyendo así la *refracción*, cuyas leyes veremos en la óptica, pues son idénticas, así para el calórico como para el lumínico.

3.<sup>a</sup> *El calórico radiante se propaga en el vacío del mismo modo que en el aire.* Demuéstrase esto, fijando un pequeño termómetro en un globo de vidrio, en el cual se hace el vacío. Si se le acerca entonces un cuerpo caliente, se ve que sube el termómetro, fenómeno que sólo se explica admitiendo la radiación en el vacío; porque se ha visto (339) que no es el vidrio buen conductor en grado suficiente del calórico para que pueda operarse la propagación por las paredes del globo y por el tubo del termómetro.

Aún no se ha determinado la velocidad de propagación del calórico, sabiéndose tan sólo que debe diferir poco de la de la luz, caso de que no sean exactamente iguales; porque la luz solar y la mayor parte de las luces artificiales van constantemente acompañadas de rayos de calor.

361. Causas que hacen variar la intensidad del calórico radiante. -Tomando como *intensidad del calórico* la cantidad de calor que recibe la unidad de superficie, se encuentra que las causas que pueden modificar dicha intensidad, son tres, a saber: la temperatura del foco de calor, su distancia y la oblicuidad de los rayos caloríficos con relación a la superficie que los emite. Obsérvanse efectivamente las tres leyes siguientes en la intensidad del calórico radiante.

1.<sup>a</sup> *La intensidad del calórico radiante es proporcional a la temperatura del manantial.*

2.<sup>a</sup> *Esta misma intensidad se halla en razón inversa del cuadrado de la distancia.*

3.<sup>a</sup> *La intensidad de los rayos caloríficos es tanto menor, cuanto más oblicua es la dirección de su emisión relativamente a la superficie radiante.*

Demuéstrase la primera ley presentando una de las esferas de un termómetro diferencial (254) a varios focos de calor, por ejemplo, a un cubo de hoja de lata lleno sucesivamente de agua a 30 grados, a 20 y a 10 grados. Nótese entonces que, a distancias iguales, marca el termómetro temperaturas que están en la misma relación que las del cubo, por ejemplo, como 6, 4, 2 (363, 2.<sup>o</sup>).

Para demostrar experimentalmente la segunda ley, se coloca el termómetro diferencial a cierta distancia de un foco de calor constante, y luego a otra doble, observándose que el termómetro en esta segunda posición indica una temperatura cuatro veces menor que en la primera. A una distancia triple, marca una temperatura nueve veces menor.

Demuéstrase también esta segunda ley, apoyándose en el teorema de geometría que dice, que la superficie de una esfera crece como el cuadrado de su radio. En efecto, si se concibe una esfera

hueca  $ab$  (fig. 236) de un radio cualquiera, y en su centro un foco constante de calor  $C$ , cada unidad de superficie de la pared interior recibe cierta cantidad de calor. Si se considera una esfera de radio duplo, su superficie, en virtud del teorema anterior, será cuatro veces mayor. La pared interior contendrá, pues, cuatro veces más unidades de superficie, y como no varía la cantidad de calor emitida desde el centro, es claro que cada unidad recibiría necesariamente cuatro veces menor.

Para demostrar la tercera ley, se coloca delante de un espejo cóncavo una caja de hoja de lata  $mn$  (fig. 237), cilíndrica y de poca altura, que puede girar alrededor de un eje horizontal. La cara anterior de esta caja está cubierta de negro de humo, y sobre su borde superior existe una tubuladura que sirve para llenar la caja de agua caliente. Por último, entre la caja y el espejo hay dos pantallas  $H$  y  $K$ , con orificios circulares de igual diámetro, y que así dejan paso a un haz de rayos paralelos que se proyectan sobre el espejo.

Sentado esto, colocando un termómetro diferencial en el foco del espejo, se da desde luego a la caja llena de agua caliente la posición vertical figurada por líneas punteadas, y se la deja así hasta que la temperatura indicada por el termómetro haya quedado estacionada, y en ambos casos se observa que el termómetro señala la misma temperatura, lo cual demuestra precisamente la ley enunciada. En efecto, en el primer caso, la porción de la superficie de la caja que envía rayos caloríficos hacia el espejo, está representada por un círculo que cuenta por diámetro  $ac$ , y que es igual, por consiguiente, a la abertura de las pantallas; en el segundo, la superficie que radia hacia el espejo es una elipse, que tiene a  $ab$  por eje mayor y al diámetro de las aberturas circulares, o sea  $ac$ , por eje menor: esta segunda superficie es, por consiguiente, mayor que la primera, y por consiguiente, emite más rayos hacia el espejo. Pero, una vez que el efecto producido sobre el termómetro no es más intenso que en el primer caso, esto nos prueba que en el segundo caso, en que los rayos son oblicuos a la superficie radiante, la intensidad es menor que en el primero, en que son perpendiculares a la misma superficie.

Para formular esta ley, representemos por  $i$  la intensidad de los rayos perpendiculares a la superficie, y por  $i'$  la de los rayos oblicuos. Estando necesariamente estas intensidades en razón inversa de las superficies  $ab$  y  $ac$ , puesto que ambas producen el mismo efecto, resulta  $i \times \text{superf. } ab = i' \times \text{superf. } ac$ . Pero como la superficie  $ac$  no es otra cosa que la proyección de la superficie  $ab$ , se sabe, según un teorema conocido en trigonometría, que  $\text{superf. } ac = \text{superf. } ab \sin. abc$ . Sustituyendo este valor en la ecuación anterior, y suprimiendo el factor común a ambos miembros,  $\text{superf. } ab$ , resulta  $i' = i \times \sin. abc$ ; la cual nos dice que *la intensidad de los rayos oblicuos es proporcional al seno del ángulo que con la dirección de los mismos hace la superficie radiante.*

362. Equilibrio movable de temperatura. -Dos son las hipótesis que se han formulado acerca de la radiación. Supónese en la primera que cuando dos cuerpos de temperatura desigual se hallan uno en frente de otro, sólo hay radiación desde el cuerpo más caliente al más frío, sin que éste emita nada hacia aquél, hasta que, bajando gradualmente la temperatura del cuerpo más caliente, se equilibre con la del más frío, cesando entonces por completo la radiación. Esta hipótesis se ha reemplazado por la siguiente, debida a Prévost, de Ginebra, que es la única admitida hoy día. Pretende dicho físico, que todos los cuerpos, sea cual fuere su temperatura, emiten constantemente calórico en todas direcciones. Entonces se nota una pérdida, es decir, enfriamiento en los de temperatura más alta, porque los rayos que despiden son más intensos que los que reciben; y por el contrario, hay absorción, es decir, aumento de temperatura, para los que la tienen menos elevada: de esta suerte llega un momento en que la temperatura es igual en ambos cuerpos; pero aún continúa, no obstante, el cambio de calórico entre los mismos, si bien cada uno recibe tanto cuanto emite; y por ser así, permanece constante la temperatura. Este estado particular se designa con el nombre de *equilibrio movable de temperatura.*

363. Ley de Newton sobre el enfriamiento. -Un cuerpo situado en un recinto vacío, no se enfría o no se calienta más que por radiación, siendo así que en la atmósfera, además de ésta, existe también el contacto con el aire. En ambos casos, la velocidad en el ascenso o en el descenso de temperatura, es decir, la *cantidad de calor perdida o absorbida en un segundo*, es tanto mayor, cuanto más considerable sea la diferencia de temperatura.

Newton formuló acerca de esta cuestión, la ley que sigue: *La cantidad de calor que un cuerpo gana o pierde, por segundo, es proporcional a la diferencia entre su temperatura y la del recinto.* Dulong y Petit han demostrado que no es general esta ley, conforme supuso Newton, y que sólo debe aplicarse a diferencias de temperatura que no excedan de 15 a 20 grados. Pasado este término, la cantidad de calor que se gana o se pierde es mayor que la que la ley indica.

Dedúscense de la ley de Newton las siguientes consecuencias:

1.<sup>a</sup> Cuando un cuerpo se halla expuesto a un foco constante de calor, no puede aumentar indefinidamente su temperatura, porque la cantidad de calor que recibe en tiempos iguales es siempre la misma, mientras que la que pierde crece con el exceso de su temperatura sobre la del aire ambiente. Llega, pues, un momento en que la cantidad de calor emitida es igual a la absorbida, y entonces queda estacionaria la temperatura.

2.<sup>a</sup> La ley de Newton, aplicada al termómetro diferencial, hace ver que las indicaciones de este instrumento son proporcionales a las cantidades de calor que recibe. Sea, en efecto, un termómetro diferencial con una de sus esferas sujeta a la acción de un foco constante de calor. El instrumento indica primero temperaturas crecientes, quedando luego estacionario, según lo indica la posición fija que toma el índice. En este momento, la cantidad de calor que recibe la esfera, es igual a la que emite; pero esta última, según la ley de Newton, es proporcional al exceso de la temperatura de la esfera sobre la del ambiente; es decir, al número de grados que marca el termómetro. De consiguiente, *la temperatura que marca el termómetro diferencial, es también proporcional a la cantidad de calórico que recibe.*

▽△

## Reflexión, emisión y absorción del calórico

364. Leyes de la reflexión. -Cuando los rayos caloríficos caen sobre la superficie de un cuerpo, se dividen generalmente en dos partes; unos penetran en la masa del cuerpo, y los otros son repelidos por la superficie, a la manera de una esfera elástica, circunstancia que se expresa diciendo que se han *reflejado*.

Si representamos por *mn* (fig. 238) una superficie plana reflejante, por *CB* el *rayo incidente*, por *BD* una línea perpendicular a la superficie que se llama *normal*, por *BA* el *rayo reflejado*, el ángulo *CBD* es el *ángulo de incidencia*, y *DBA* el *ángulo de reflexión*. Entendido esto, en la reflexión del calórico se cumplen lo mismo que en la de la luz, las dos leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *El ángulo de reflexión es igual al de incidencia.*

2.<sup>a</sup> *El rayo incidente y el reflejado están en un mismo plano, perpendicular a la superficie reflejante.*

Estas dos leyes se demuestran por medio de espejos cóncavos (366).

365. Reflexión sobre los espejos cóncavos. -Dase el nombre de *espejos cóncavos*, o *reflectores*, a unas superficies esféricas o parabólicas, de metal o de vidrio, que sirven para concentrar en un mismo punto los rayos luminosos o caloríficos.

Sólo consideraremos los espejos esféricos. La [figura 240](#) representa dos, y en la [239](#) se ve su sección por un plano que pasa por el eje. El centro *C* de la esfera a que pertenece el espejo, se denomina *centro de curvatura*; el punto *A*, o la parte media del reflector, es el *centro de figura*; y por fin, la recta *AB*, tirada por estos dos puntos, es el *eje principal* del espejo.

A fin de aplicar a los espejos esféricos las leyes de la reflexión sobre las superficies planas, se

los considera formados por una infinidad de superficies planas infinitamente pequeñas, y mediante esta hipótesis, se puede deducir, por la geometría, que las normales a estas pequeñas superficies van a concurrir todas al centro de curvatura.

Supongamos en el eje AB del espejo MN un foco de calor bastante lejano para que podamos considerar como paralelos entre sí los rayos EK, PH..., que de él emanan. En virtud de la hipótesis anterior, que supone constituido el espejo por una infinidad de pequeños elementos planos, el rayo EK se refleja sobre el elemento K, absolutamente como sobre un espejo plano; es decir, que siendo CK la normal a este elemento, acepta el rayo una dirección KF tal, que el ángulo CKF es igual al CKE. Los demás rayos PH, GI..., que se reflejan del mismo modo, van a concurrir sensiblemente a un mismo punto F, situado en la parte media de AC, conforme se demostrará en óptica. Existe, pues, en F reunión de los rayos caloríficos, y por consiguiente, una temperatura más elevada que en los demás puntos. De aquí el nombre de *foco* que se ha dado a este punto. La distancia FA del foco al espejo, se llama *distancia focal*.

En la figura anterior se propaga el calórico siguiendo las líneas EKF, LDF..., en el sentido de las flechas; pero, recíprocamente, si se halla en F el cuerpo caliente, se propaga el calórico según las direcciones FKE, FDL..., de suerte que los rayos emitidos del foco quedan, después de la reflexión, paralelos entre sí: de lo cual resulta que no pierde nada de su intensidad el calor transmitido.

366. Demostración de las leyes de la reflexión. -El experimento que sigue, efectuado la primera vez por Pictet y Saussure, en Ginebra, y conocido por el nombre de *experimento de los espejos conjugados*, demuestra la existencia de los focos, y a la vez las leyes de la reflexión del calórico. Hállanse dispuestos dos reflectores M y N ([figura 240](#)) a 4 o 5 metros de distancia, de manera que coincidan sus ejes. En el foco de uno de ellos, en un canastillito de alambre de hierro A, se ponen varias ascuas, y en el otro foco un cuerpo inflamable B, por ejemplo, la yesca. Los rayos emitidos por las ascuas, se reflejan primero en el espejo a que corresponde el foco A; toman, por efecto de esta reflexión, una dirección paralela al eje (365); se reflejan de nuevo sobre el otro reflector, y van a concurrir a su foco B. Así lo prueba la combustión de la yesca que se enciende en dicho punto, y no en los demás.

Sirve este experimento además para demostrar que el calórico y la luz se reflejan siguiendo unas mismas leyes. Colócase, al efecto, en el foco A una vela encendida y en el B una pantalla de vidrio deslustrado, notándose en ésta un foco luminoso, exactamente en el sitio en donde se enciende la yesca, lo cual nos dice que el foco de calor y el de luz se forman en un mismo punto. Verifícase, pues, la reflexión en ambos casos, siguiendo las mismas leyes. Al hablar de la luz demostraremos que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, y que el rayo incidente y el reflejado, se encuentran en un mismo plano perpendicular, a la superficie reflejante y *por lo tanto, sucede lo mismo que en el calórico*.

Los espejos cóncavos han recibido el nombre de *espejos ustorios*, por efecto de la alta temperatura que con ellos puede obtenerse. Refiérese que Arquímedes incendió los buques romanos delante de Siracusa, por medio de tales espejos. Buffon construyó espejos ustorios, cuya potencia prueba que es muy posible el hecho atribuido a Arquímedes, los cuales constaban de muchos espejos planos y azogados, de 22 centímetros de largo por 16 de ancho, que podían volverse con entera independencia entre sí en tal o cual dirección, de suerte que los rayos reflejados fuesen a concurrir a un mismo punto. Con 128 espejos sometidos al ardiente sol del verano, inflamó Buffon una tabla de madera sombreada, a 68 metros de distancia.

367. Reflexión en el vacío. -El calórico se refleja del mismo modo en el vacío que en el aire, conforme se demuestra por medio del siguiente experimento, del cual somos deudores al químico inglés Davy. Dispónense debajo del recipiente de la máquina neumática dos pequeños reflectores en frente uno de otro: en uno de los focos hay un termómetro muy sensible, y en el otro foco un manantial de calor eléctrico, que consiste en un alambre de platino hecho incandescente por el paso de la corriente de una pila. Vese en seguida que sube el termómetro muchos grados a causa del calórico reflejado, pues no acusa aquél elevación alguna de temperatura, si no se encuentra exactamente en el foco del segundo reflector.

368. Reflexión aparente del frío. -Si se disponen dos reflectores en frente uno de otro ([fig. 240](#)) y en vez de carbones incandescentes, se coloca en uno de los focos una masa de hielo, estando por ejemplo, a 12 o 15 el aire ambiente, se observa que un termómetro diferencial, fijo en el foco del segundo reflector, indica un enfriamiento de muchos grados. A primera vista parece que dependa este fenómeno de rayos frigoríficos emitidos por el hielo; pero esta *reflexión aparente del frío*, que tal es el nombre que recibe, se explica por la teoría que dimos (362) acerca del equilibrio de temperatura que tiende siempre a establecerse entre los cuerpos. Media un cambio de calórico de la misma manera que en la inflamación de la yesca, sin más diferencia que el cambio de condiciones, pues ahora el termómetro es el cuerpo caliente. Como los rayos que emite son más intensos que los del hielo, no hay compensación entre el calor que cede y el que recibe, originándose de aquí su enfriamiento.

A este mismo hecho debernos referir el frío que sentimos junto a las paredes de yeso, de piedra, y en general, cerca de toda masa cuya temperatura es inferior a la nuestra.

369. Poder reflector -Dase el nombre de *poder reflector* a la propiedad que poseen los cuerpos de reflejar una cantidad mayor o menor del calor incidente.

Varía, según las sustancias, este poder, y a fin de poder estudiarle, sin necesidad de construir tantos reflectores cuantos fuesen aquéllas, puso Leslie en práctica un medio muy ingenioso ([fig. 241](#)). El manantial de calor es un cubo M lleno de agua a 100 grados; y en el eje de un reflector esférico N, entre el foco y el espejo, existe fija una lámina *a* de la sustancia cuyo poder reflector se busca. Con esta disposición, los rayos emitidos, y reflejados primero sobre el espejo, encuentran la lámina *a*, se reflejan en ella de nuevo, y van a formar un foco, entre la lámina y el espejo, en un punto donde se coloca la esfera de un termómetro. Permaneciendo el mismo reflector y termómetro, y siendo siempre la temperatura del agua del cubo 100 grados, se observa que la del termómetro varía con la naturaleza de las láminas a que se someten al experimento; de lo cual se deduce, no el poder reflector absoluto de un cuerpo, sino la relación de éste poder con el de otro cuerpo, tomado como término de comparación. Efectivamente, en conformidad con lo dicho (363, 2.ª) acerca de la aplicación de la ley de Newton al termómetro diferencial, las temperaturas que este instrumento marca son proporcionales a las cantidades de calor que recibe. De consiguiente, si una lámina de vidrio y otra de plomo, por ejemplo, hacen recorrer al termómetro diferencial un grado la primera y seis la otra, debemos deducir que la cantidad de calor reflejada por el plomo es seis veces mayor que la que refleja el vidrio; porque siendo la misma la cantidad de calor que emana del cubo, el reflector cóncavo refleja siempre igual porción, no pudiendo depender la diferencia más que del poder reflector de las láminas *a*.

Mediante este procedimiento, y representando por 100 el poder reflector del latón, tomado como término de comparación, formó Leslie el cuadro siguiente de los poderes reflectores relativos:

Latón.	100	Tinta de China.	13
Plata.	90	Vidrio.	10
Estaño.	80	Vidrio impregnado de aceite.	5
Acero.	70	Vidrio mojado con agua.	0
Plomo.	60	Negro de humo.	0

Estos números sólo representan el *poder reflector relativo* de las diferentes sustancias, relacionadas con el latón; su *poder absoluto sería la relación de la cantidad de calor reflejada con la cantidad de calor recibida*. Melloni ha sido el primero que ha determinado el poder reflector absoluto de cierto número de sustancias. MM. Desains y La Provostaye, que lo han determinado igualmente para diversos metales, han encontrado los siguientes resultados por medio del termo-multiplicador de Melloni, reflejando el calor, según un ángulo de 50 grados:

Plaqué argentífero.	0,97	Acero.	0,82
---------------------	------	--------	------

Oro.	0,95	Zinc.	0,81
Latón y cobre.	0,93	Hierro.	0,77
Platino.	0,83	Hierro fundido.	0,74

No tardaremos en ver (373) las causas que respecto a una misma sustancia, hacen variar su poder reflector.

370. Poder absorbente. -El *poder absorbente* de los cuerpos es la propiedad que poseen de dejar penetrar en su masa una porción mayor o menor del calor incidente. Su *valor absoluto* es la relación de la cantidad de calor absorbida con la cantidad de calor recibida.

El poder absorbente de un cuerpo se halla siempre en orden inverso del reflector; es decir, cuanto más calórico refleja un cuerpo, menos absorbe, y recíprocamente, sin que por esto sean complementarios ambos poderes; esto es, que la suma de las cantidades de calor reflejado y absorbido, no representa la totalidad del calor incidente. Siempre es menor; porque en realidad se divide el calor incidente en tres partes, a saber: 1.<sup>a</sup> una que es absorbida; 2.<sup>a</sup> otra que es reflejada con regularidad, o siguiendo las leyes ya demostradas (365), y 3.<sup>a</sup> otra parte que se refleja irregularmente; es decir, en todas las direcciones, y que se designa con el nombre de *calor difuso*(385).

Para determinar el poder absorbente de los cuerpos, se valió Leslie del mismo aparato que sirve para la investigación de los poderes reflectores ([fig. 241](#)), pero suprimiendo la placa *a*, y colocando la esfera del termómetro en el foco mismo del reflector. Recubriendo sucesivamente de negro de humo, de barniz, de oro, de plata, de cobre, etc., dicha esfera, se nota que marca el termómetro, bajo la influencia del manantial de calor *M*, una temperatura tanto más alta, cuanto más calórico absorbía la sustancia que servía de cubierta a la esfera focal. De esta suerte averiguó Leslie, que el poder absorbente de un cuerpo es tanto mayor, cuanto más débil es el reflector. Sin embargo, no es posible, en estos experimentos, deducir la relación de los poderes absorbentes de las temperaturas termoscópicas, por no ser en este punto rigurosamente aplicable la ley de Newton; pues esta ley sólo es cierta en los cuerpos cuya sustancia no varía, mientras que la cubierta que envuelve a la esfera focal, es diferente en cada observación. Pronto veremos (372) de qué manera pueden deducirse de las relaciones de los poderes emisivos las de los absorbentes.

Aceptando como germen de calor un cubo lleno de agua a 100 grados, ha investigado Melloni, por medio de su termo-multiplicador, los poderes absorbentes relativos, que vamos a consignar.

Negro de humo.	100	Tinta de China.	85
Blanco de albayalde.	100	Goma laca.	72
Cola de pescado.	91	Metales.	13

371. Poder emisivo. -El *poder emisivo* de los cuerpos es su propiedad de emitir, en igualdad de temperatura y de superficie, una cantidad mayor o menor de calor.

Sirvióse también Leslie del mismo aparato ([fig. 241](#)) para la determinación del poder emisivo de los cuerpos. La esfera del termómetro ocupa el foco mismo del reflector y las caras del cubo *M* se componen de diferentes metales o se cubren con diversas sustancias, como negro de humo, papel, agua, etc. Lleno el cubo de agua a 100 grados, y permaneciendo invariables todas las demás condiciones, volvía sucesivamente Leslie cada cara del cubo y anotaba las temperaturas del termómetro. La cara cubierta de negro de humo determinaba en el foco del reflector una temperatura mucho más elevada que la que producían todas las demás, y las caras metálicas eran las que daban temperaturas más débiles. Aplicando la ley de Newton, y representando por 100 el calor emitido por el negro de humo, formó Leslie la tabla siguiente de los poderes emisivos

Negro de humo.	100	Cola de pescado.	80
Agua.	100	Plomo empañado.	45
Papel.	98	Mercurio.	20
Lacre.	95	Plomo brillante.	19
Vidrio blanco ordinario.	90	Hierro pulimentado.	15
Tinta de China.	88	Estaño, oro, plata, cobre, etc.	12

Obsérvese que en este cuadro el orden de los cuerpos es precisamente inverso, de el del cuadro de los poderes reflectores. Los señores Desains y La Provostaye, empleando el termo-multiplicador, han determinado los números siguientes, como poderes emisivos de los metales, relacionados con el del negro de humo representado por 100.

Platino laminado.	11	Oro en hojas.	4,28
- bruñido.	9,50	Plata virgen laminada.	3
Plata mate depuesta químicamente.	5,36	- bruñida.	2,50
Cobre en láminas.	4,90	- depuesta químicamente y bruñida.	2,25

Estos coeficientes nos manifiestan que el poder emisivo dado por Leslie para los metales, es exagerado.

372. Identidad de los poderes absorbente y emisivo. -No sería fácil deducir los poderes absorbentes de los reflectores, porque se ha visto (370) que no son rigurosamente complementarios el uno del otro; pero sí quedarían aquéllos determinados, caso de demostrar que son iguales, en cada cuerpo, a los emisivos. Tal es lo que Dulong y Petit han deducido del experimento que sigue. En un gran globo de vidrio, que se mantiene a cero dentro del hielo, y que lleva interiormente ennegrecidas las paredes, fijaron un termómetro a cierta temperatura, a 15 grados, por ejemplo; y luego, habiendo efectuado el vacío en el globo por medio de un tubo que le ponía en comunicación con la máquina neumática, dejaron que se enfriara gradualmente el termómetro, anotando el tiempo que tardaba en bajar de 10 a 5 grados. Repitieron luego el experimento en sentido contrario; es decir, mantuvieron las paredes del globo a 15 grados y enfriaron el termómetro a cero, resultando que el tiempo que empleaba el termómetro en subir de 5 a 10 grados, era precisamente el mismo que el que había tardado en bajar de 10 a 5. Dedúcese de aquí que, para un mismo cuerpo, y para una misma diferencia entre su temperatura y la del recinto, es igual el poder emisivo al absorbente, supuesto que son iguales las cantidades de calor emitido y absorbido en el mismo tiempo.

373. Causas que modifican los poderes reflector, absorbente y emisivo. -Siendo iguales los poderes emisivo y absorbente, toda causa que influya sobre el primero, modificará necesariamente al segundo en el mismo sentido. En cuanto al poder reflector, supuesto que sigue un orden inverso al de los otros dos, toda causa que aumente éstos, debe disminuirle, y recíprocamente.

Ya hemos visto que varían, según las sustancias, los diferentes poderes que nos ocupan, y que los metales son los cuerpos de más poder reflector, mientras que el del negro de humo es el más débil. Pero en un mismo cuerpo, se modifican estos poderes según el grado de pulimento, la densidad, el espesor de la sustancia radiante, la oblicuidad de los rayos incidentes, y por fin, la naturaleza del manantial.

Durante largo tiempo se ha admitido que el poder reflector crecía de un modo general con el grado de pulimento de las superficies, y que, por el contrario, disminuían los demás poderes. Pero Melloni manifestó que, rayando una lámina metálica pulimentada, unas veces aumentaba y otras disminuía su poder reflector, lo cual se lo explicó por medio de la mayor o menor densidad que adquiere la lámina metálica reflejante. Si ésta se ha batido previamente (71), pierde la homogeneidad; las moléculas se hallan más aproximadas en la superficie que en el

interior de la masa, y el poder reflector aumenta. Pero cuando se raya la superficie, la masa interior, que es menos densa, queda a descubierto, y disminuye el poder reflector. Por el contrario, en una lámina no templada y homogénea en toda su masa, aumenta el poder reflector cuando se raya la lámina con un instrumento cortante, lo cual proviene de un aumento de densidad en la superficie, ocasionado por las rayas que en ellas se han trazado.

El espesor de las sustancias radiantes puede modificar igualmente su poder emisivo, conforme lo prueban los experimentos de Leslie, de Rumford y de Melloni. Cerciórese este último físico de que, barnizando las caras de un cubo metálico lleno de agua a una temperatura constante, crecía el poder emisivo con el número de capas de barniz, hasta 16, quedando en seguida estacionario por más capas que se añadieran. Calculó que las 16 capas formaban un espesor de  $\frac{4}{100}$  de milímetro. En punto a los metales, aplicadas sucesivamente hojitas de oro de 8, 4 y 2 milésimas de milímetro a las caras de un cubo de vidrio, se notó que era la misma la disminución del calórico radiante. De aquí resulta, al parecer, que en los metales no influye el espesor de la capa radiante, por lo menos hasta el límite a que puede llegarse.

También ha comprobado Melloni, que el poder absorbente varía con la naturaleza del foco de calor. Por ejemplo, siendo igual la cantidad de calor incidente el carbonato de plomo absorbe casi dos veces más, si es emitido por un cubo lleno de agua a 100 grados, que si lo es por una lámpara. Sólo el negro de humo absorbe constantemente la misma cantidad de calor, sea cual fuere el manantial.

El poder absorbente varía con la inclinación de los rayos incidentes. Se encuentra en su máximo bajo la incidencia normal, y disminuye a medida que los rayos incidentes se separan de la normal. He aquí una de las razones por que el suelo se calienta más en verano que en invierno, por ser entonces menos oblicuos los rayos solares.

Al parecer los cuerpos reducidos a polvo poseen, en general, el mismo poder emisivo; al menos, esto es lo que se observa respecto a diez y seis cuerpos, de veinte que Masson y Courtépée sometieron al experimento.

En cuanto a los cuerpos gaseosos en combustión, su poder radiante es excesivamente débil; como se prueba aproximando la esfera de un termómetro hacia una llama de hidrógeno, aunque la temperatura de esta llama sea muy elevada. Pero colocando en la misma una espiral de platino, acepta ésta la temperatura de la llama, y radia fuertemente según lo indica el termómetro. Por un efecto semejante es por lo que las llamas de las lámparas y del gas del alumbrado radian mucho más que la llama de hidrógeno, a causa del exceso de carbono que contienen, y que, no quemándose en su totalidad, queda incandescente en la llama.

374. Aplicaciones. -Las propiedades de los diversos poderes reflejante, absorbente o emisivo que poseen los cuerpos, encuentran muchísimas aplicaciones en la economía doméstica y en las artes. Leslie había enunciado en términos generales, que los cuerpos blancos reflejaban muy bien el calórico, si bien lo absorbían débilmente, aconteciendo lo contrario respecto a los cuerpos negros. Pero este principio no es tan general como lo había admitido Leslie, según lo indica el albayalde, que aunque blanco, posee un poder absorbente tan intenso como el negro de humo (370). Por lo tanto, si se trata de elegir, por ejemplo, el traje más conveniente en invierno o en verano, debe darse la preferencia al blanco, porque su poder emisivo es menor que el del negro, y de consiguiente, se opone más, durante el invierno, a la pérdida del calor del cuerpo humano. En verano, a causa de su débil poder absorbente, absorbe menos calor de la atmósfera que el negro, y por esto parece más fresco. Tal será, sin duda, la razón que habrá guiado a la naturaleza para dar, a los animales que habitan las regiones polares, un pelaje blanco, sobre todo durante el invierno.

Conviene que la superficie de las vasijas para calentar agua, como la de las cafeteras, sea negra y que esté sin pulimentar porque es entonces mayor el poder absorbente. El brillo que se acostumbra darles, se obtiene a expensas del combustible. Si se desea, por el contrario, conservar caliente un líquido el mayor tiempo posible, debe colocársele en una vasija metálica pulimentada y brillante, porque como es entonces menor el poder emisivo, se verifica con más lentitud el enfriamiento.

En los Alpes, aceleran los montañeses la fusión de las nieves cubriéndolas con tierra, pues así crece su poder absorbente.

En nuestras habitaciones debe ser negra la superficie exterior de las estufas y de los caloríferos, a fin de dar libre emisión al calórico; y al contrario, el interior de las chimeneas tendría que cubrirse de porcelana o de loza blanca y pulimentada, a fin de aumentar el poder reflector del foco hacia las habitaciones.



## Trasmisión del calórico radiante al través de los cuerpos

375. Poder diatérmico. -Existen cuerpos que dan paso al calórico radiante, de la misma manera que los cuerpos diáfanos permiten pasar la luz; pero otros en cambio se hallan privados de esta propiedad, o no la poseen sino en grado muy exiguo. Melloni dio a los primeros el nombre de *diatérmanos*, y a los segundos el de *atérmanos*. Los gases son los cuerpos más diatérmanos, y los metales, completamente atérmanos. No se crea que, a pesar de la analogía que media entre el calórico radiante y la luz, sean siempre los cuerpos transparentes los más diatérmanos, ni que los opacos sean constantemente atérmanos.

Prevost, en Ginebra, y Delaroche, en Francia, descubrieron, en 1811 y 1812 muchos fenómenos que presentan los cuerpos diatérmanos; pero en 1832, dio Melloni, merced a un ingenioso aparato termométrico, que luego describiremos, una teoría completa de las propiedades diatérmicas de los sólidos y de los líquidos.

Empleó aquel físico en sus experimentos de cinco manantiales de calor, a saber: 1.º una lámpara de Locatelli; es decir, sin cristal, con reflector y con una sola corriente de aire; 2.º una lámpara de Argand; esto es, con doble corriente de aire y con cristal, tales son las lámparas Carcel; 3.º un alambre de platino arrollado en hélice y mantenido al rojo blanco en la llanta de una lámpara de alcohol; 4.º un cubito de cobre ennegrecido exteriormente lleno de agua a 100 grados; 5.º y finalmente, una placa de cobre ennegrecida y mantenida a unos 400 grados por medio de la llama de una lámpara de alcohol.

Cambiando sucesivamente las láminas diatérmicas y los focos de calor, comprobó Melloni los hechos que vamos a exponer.

376. Causas que modifican el poder diatérmico. -Seis son las causas que modifican el poder diatérmico, a saber:

- 1.ª La naturaleza de la sustancia que constituye las pantallas que atraviesa el calórico;
- 2.ª El grado de pulimento de estas pantallas;
- 3.ª Su espesor;
- 4.ª El número de pantallas que cruza el calórico;
- 5.ª La naturaleza de las pantallas que ha cruzado;
- 6.ª La naturaleza del foco del calor.

377. Influencia de la sustancia de las pantallas. -Trabajando con diversos líquidos colocados sucesivamente en una vasija de vidrio, cuyas paredes opuestas eran paralelas, distando entre sí 9mm,2, y comparando las indicaciones dadas por su aparato cuando se hallaban interpuestos los líquidos con el efecto que se obtenía con el calórico directo, encontró Melloni, tomando por

manantial de calor una lámpara de Argant, que, de 100 rayos incidentes:

El sulfuro de carbono deja pasar.	63
El aceite de olivas.	30
El éter.	21
El ácido sulfúrico.	17
El alcohol.	13
El agua azucarada o aluminosa.	12
El agua destilada.	11

Habiendo efectuado los mismos experimentos con diversas sustancias sólidas talladas en láminas, con un espesor constante de 2m,6, obtuvo Melloni la tabla siguiente:

De cada 100 rayos, la sal gema deja pasar.	92
el espato de Islandia y el vidrio de espejos.	62
el cristal de roca ahumado.	57
el carbonato de plomo diáfano.	52
la cal sulfatada diáfana.	20
el alumbre diáfano.	12
el sulfato de cobre.	0

De los resultados consignados en estos dos cuadros, se deduce que, varias sustancias, más o menos impenetrables a la luz, como el cristal de roca ahumado, pueden muy bien dejarse atravesar por el calórico; mientras que otras sustancias, muy poco permeables a este último fluido, como por ejemplo, el sulfato de cal, y sobre todo el alumbre, pueden ser muy diáfanos. Estos diversos experimentos conducen, pues, a admitir que no hay relación alguna entre el poder diatérmico y la translucidez de los cuerpos.

378. Influencia del pulimento. -El poder diatérmico de una lámina aumenta con su grado de pulimento. Por ejemplo, Melloni encontró que las indicaciones de su aparato variaban de 12 a 5 grados, con solo interponer varias pantallas de vidrio de la misma naturaleza y del mismo espesor, pero más o menos pulimentadas.

379. Influencia del espesor. -La cantidad de calor que atraviesa una pantalla diatérmica, decrece cuando aumenta el espesor. La absorción se efectúa, en general, en las primeras capas, pues a cierta profundidad tiende el calor transmitido a permanecer constante, caso aun de que continúe creciendo el grueso.

Comprobó Melloni este hecho actuando con láminas de vidrio blanco, cuyos espesores eran 1, 2, 3, 4, y encontró que de cada 1000 rayos dejaban pasar 619, 576, 558, 549, números cuyas diferencias tienden a anularse.

380. Influencia del número de pantallas. -El aumento del número de pantallas que el calórico atraviesa produce un efecto análogo al aumento de espesor; es decir, que la absorción crece con menos velocidad que el número de pantallas, o en otros términos, que la cantidad de calor absorbido decrece desde una pantalla a la siguiente.

Además, si se hallan superpuestas muchas láminas de la misma especie, la cantidad de calor que impiden el paso es mayor de lo que se da si constituyesen una sola placa de un grueso igual a la suma de sus espesores. Por fin, el efecto que producen varias láminas superpuestas de diversas sustancias, es independiente del orden según el cual se suceden.

381. Influencia de la naturaleza de las pantallas ya atravesadas. -Los rayos caloríficos que han cruzado ya una o muchas sustancias, sufren una modificación, en virtud de la cual son más o menos adecuados para transmitirse al través de nuevas sustancias diatérmicas. Por ejemplo, comparando los resultados que se obtienen con una lámpara de Argant, cuya llama esté envuelta por un tubo de vidrio, con los queda una lámpara de Locatelli sin cristal, y representando por 100 los rayos incidentes, encontró Melloni los resultados que siguen, relativamente a la cantidad de calor transmitido por las dos lámparas:

SUSTANCIAS.	LÁMPARA de Argant.	LÁMPARA de Locatelli.
La sal gema deja pasar.	92	92
El espato de Islandia y el cristal de espejos	62	39
El cristal de roca ahumado.	57	37
La cal sulfatada.	29	14
El alumbre.	12	9

Dedúcese de aquí, que el calor que ya ha cruzado en la lámpara de Argant al vidrio, se trasmite con más facilidad al través de las demás sustancias. Sólo la sal gema da siempre paso a la misma cantidad de calor incidente.

382. Influencia de la naturaleza del manantial. -En general, la naturaleza del manantial de calor, modifica mucho el poder diatérmico de los cuerpos, conforme lo demuestran los resultados obtenidos por Melloni, al utilizar cuatro manantiales distintos. En efecto, representando también por 100 los rayos incidentes, obtuvo aquel físico los resultados consignados en el cuadro siguiente:

SUSTANCIAS.	LÁMPARA de Locatelli.	PLATINO incandescente.	COBRE calentado a 400°.	COBRE calentado a 100°.
La sal gema deja pasar.	92	92	92	92
El espato de Islandia.	39	28	6	0
El cristal de espejos.	39	24	6	0
La cal sulfatada.	14	5	0	0
El alumbre.	9	2	0	0

Este cuadro demuestra, exceptuando la sal gema, que la proporción de calor transmitida al través de los sólidos disminuye con la temperatura del foco, llegando a ser nula cuando sólo tiene este 100 grados. El mismo fenómeno se observa en los líquidos.

383. Diferentes especies de rayos caloríficos. -Las propiedades que presenta el calor, al pasar al través de los cuerpos, indujeron a Melloni a emitir acerca del calorífico una hipótesis análoga a la que hace tiempo que existe respecto a la luz. Así como Newton admitió muchas especies de luz, como son la *roja*, *anaranjada*, *amarilla*, *verde*, *azul*, *añil* y *violeta*, desigualmente transmisibles al través de los cuerpos diáfanos, y que pueden combinarse entre sí o permanecer aisladas; de la misma manera admite Melloni la existencia de muchas especies de rayos caloríficos, emitidos simultáneamente, en proporciones variables por los diversos focos de calor, y dotados de la propiedad de atravesar, con mayor o menor facilidad, las sustancias diatérmicas. Poseerían, pues, éstas una verdadera *coloración* calorífica; es decir, que absorberían ciertos rayos dejando pasar los demás, así como un vidrio azul, por ejemplo, sólo se deja penetrar por el color azul y no por los demás colores.

La teoría de Melloni se explica muy bien en el sistema de las ondulaciones, admitiendo que las propiedades de las diferentes especies de rayos caloríficos dependen del número distinto de vibraciones, o de ondas caloríficas de desigual longitud.

384. Aplicaciones de los poderes diatérmanos. -Si bien no se ha efectuado aún experimento alguno directo acerca del poder diatérmico de los gases, no puede negarse que el aire es muy diatérmico, supuesto que en él se originan todos los fenómenos de calor radiante. Por efecto de su gran poder diatérmico se bailan siempre las capas superiores de la atmósfera a una baja temperatura, a pesar de los rayos solares que las cruzan.

Por ser poco diatérmica el agua, se produce el fenómeno contrario en el seno de los mares y de los lagos. Las capas superiores son las únicas que participan de las variaciones de temperatura, siguiendo las estaciones; pues a cierta profundidad permanece constante la temperatura.

Se han utilizado las propiedades de los cuerpos diatérmanos para separar la luz y el calor que irradian unidos de un mismo foco. La sal gema, cubierta con negro de humo, detiene por completo la luz, dando paso al calor; y por el contrario, las placas o disoluciones de alumbre detienen al calor, dejando pasar la luz. Aplícase, con ventaja, este último procedimiento en los aparatos que se iluminan con los rayos solares o con luz eléctrica, cuando es indispensable evitar un calor muy intenso.

El uso de campanas en los Jardines para el abrigo de ciertas plantas, está fundado en la propiedad diatérmica del vidrio (véase el cuadro anterior), pues cruzan esta sustancia los rayos solares que tienen una alta temperatura, mas no el calor radiante del suelo.

385. Difusión. -Hemos visto ya (370) que el calor que cae sobre la superficie de un cuerpo no se refleja en totalidad, siguiendo las leyes de reflexión (366); sino que una parte lo verifica con irregularidad, es decir, en todas direcciones alrededor del punto de incidencia. Este fenómeno es el que se designa con el nombre de *difusión* o de *reflexión irregular* del calor, dándose el nombre de *reflexión regular* o de *reflexión especular* a la que sigue las leyes citadas. Melloni fue quien descubrió el fenómeno de la difusión por la superficie de los cuerpos.

La reflexión regular no se efectúa más que en las superficies pulimentadas: y la irregular, por el contrario, se produce en las mates o rugosas, como las de las láminas de madera, de vidrio y de metal sin pulimentar y en estado mate.

Varía el poder difusivo, según la naturaleza del foco y de las sustancias reflectoras. Los cuerpos blancos dispersan mucho el calor que radia de un foco incandescente; y los metales mates son aun más dispersivos que los cuerpos blancos.

▽△

## Capítulo X

▽△

### Máquinas de vapor

386. Objeto de las máquinas de vapor. -Las *máquinas de vapor* son los aparatos que se emplean para utilizar la fuerza elástica del vapor de agua como fuerza motriz.

En las máquinas que se emplean generalmente comunica el vapor, en virtud de su fuerza elástica, a un émbolo o pistón un movimiento rectilíneo, el cual se trasforma después en movimiento circular continuo por medio de varios órganos mecánicos.

Las máquinas de vapor constan de dos partes muy distintas, que son: el aparato en el cual se produce el vapor, y la máquina, propiamente dicha: describiremos, desde luego, el primer aparato.

387. Generador del vapor. -Denomínase generador o caldera el aparato en el cual se origina la producción del vapor. La [figura 242](#) representa la forma que se da comúnmente a los generadores de las máquinas fijas, pues las calderas de las locomotoras y de los buques de vapor son muy diferentes. Consta de un largo cilindro de palastro, cuyos extremos son hemisféricos existiendo en su parte inferior otros dos cilindros también de palastro, pero de menor diámetro, que comunican con la caldera por medio de dos tubos. Los dos cilindros, a los cuales nos contraemos y de los que uno tan sólo es visible en el dibujo, se denominan *hervideros*: sobre ellos actúa directamente el fuego del hogar, encontrándose en su totalidad llenos de agua siendo así que el nivel de este líquido en la caldera sólo se eleva a una altura algo superior a la que determina su centro.

Debajo de los hervideros se encuentra la hornilla alimentada con hulla o con madera. Los productos de la combustión, después de haber circulado alrededor de los hervideros y de la caldera, pasan a la atmósfera por una chimenea a la cual se da generalmente una gran altura, con el fin de activar el tiro que establece.

La descripción que insertamos a continuación nos dispensa entrar en mayores detalles respecto a las calderas de vapor.

*Explicación de la figura 242.*

- A Tubo que conduce el vapor al tubo *c* de la caja de distribución de la máquina (fig. 244).
- B Tubo que conduce el vapor a un manómetro que indica la tensión del vapor en el interior de la caldera.
- C Tubo que sirve para la introducción del agua en la caldera.
- D *Silbato de alarma*, denominado así, porque avisa cuando no hay bastante agua en la caldera, circunstancia que puede causar una explosión en el momento de entrar el agua, porque, encontrándose enrojecidas las paredes, se forma al instante un exceso de vapor al penetrar aquélla. Mientras que el nivel en la caldera no ha descendido en demasía, no pasa el vapor al silbato; pero si desciende aquél a un punto inferior a la altura a que debe conservarse, un pequeño flotador que no se ve en el grabado, y que cierra el pie del silbato, baja y deja salir al vapor. Al escaparse éste, pasa rasando los bordes de un disco metálico, originando un sonido agudo, que con frecuencia se oye en los caminos de hierro.
- F *Flotador* destinado a indicar el nivel del agua en la caldera. Consta de una piedra rectangular, inmersa parcialmente en el agua, como se ve por la rotura practicada en la pared del generador. Esta piedra, que se halla suspendida en el extremo de una palanca, permanece en equilibrio por la pérdida de peso que experimenta en el agua y por efecto de un contrapeso *p*. Mientras que el agua se eleva a la altura necesaria, permanece horizontal la palanca que sostiene al flotador; pero se inclina hacia F cuando no hay bastante agua, y en sentido contrario, si existe demasiada. En ambos casos estas dos indicaciones sirven para regular convenientemente la introducción del agua de alimentación.
- G *Generador* cilíndrico de palastro, completamente cerrado.
- H *Hervideros*, de los cuales existen dos situados a una misma altura.
- O Conducto de la chimenea.
- P Peso que actúa sobre la válvula de seguridad.
- p* Contrapeso del flotador.
- R Puerta del hogar.
- S *Válvula de seguridad*, la cual hemos descrito ya al hablar de la marmita de Papín (314).
- T Orificio para la limpieza y reparación de la caldera.

388. Máquina de doble efecto, o máquina de Watt. -Dase el nombre de *máquina de vapor de doble efecto* a aquella en la cual actúa el vapor alternativamente en las dos caras del émbolo. Se denomina igualmente *máquina de Watt*, porque corresponde su construcción al sistema que había adoptado este ilustre ingeniero.

Demos primero una idea del conjunto de esta máquina, pasando después a describir en particular cada una de sus piezas. A la izquierda del dibujo (fig. 243) existe un cilindro de hierro fundido, al cual pasa el vapor que produce la caldera; y merced a la parte desprendida de la pared del mismo, se nota el émbolo o pistón sobre el cual actúa el vapor alternativamente por su cara superior e interior, con objeto de hacerle subir y descender. Por su vástago A trasmite el émbolo su movimiento alternativo a una gran palanca de hierro fundido L, denominada *balancín*, y sostenida por cuatro columnas también de fundición. El balancín trasmite su movimiento a una larga barra de hierro fundido I, que es la *biela o barra de conexión* que se articula con un *manubrio* K, comunicándole un movimiento continuo de rotación. Este manubrio se fija a un árbol horizontal de fundición llamado *árbol motor*, que gira con él, el cual, por medio de ruedas de engranaje o de correas sin fin, va a comunicar el movimiento a diversos mecanismos, tales como sierras, tornos, laminadores, máquinas de hilar, etc.

A la izquierda del cilindro se encuentra la caja de distribución, desde la cual, por medio de un mecanismo que describiremos en breve (389), actúa alternativamente el vapor, sobre la cara superior e interior del émbolo. Pero como es de todo punto indispensable que, después de haber actuado el vapor sobre cada una de las caras del émbolo, desaparezca del cilindro, porque de no ser así, existiría una presión en los dos sentidos y el émbolo permanecería en equilibrio, es preciso que el vapor, después de haber trabajado sobre el émbolo, pase a la capacidad O, que contiene agua fría y que se denomina el *condensador*. En dicho receptáculo el vapor se condensa casi completamente, y la presión cesa respecto a la parte del cilindro que comunica con el condensador, con lo cual se consigue que no existiendo presión más que sobre una de las caras del émbolo, pueda éste efectuar su movimiento de ascenso o de descenso.

Reposa el empleo del condensador sobre un principio relacionado con la teoría del vapor, del cual somos deudores a Watt, y que dice, que cuando dos vasos que comunican entre sí, y que contienen vapor en estado de saturación, poseen diferentes temperaturas, la tensión es la misma en los dos vasos, correspondiendo ésta a la temperatura del vaso más fría (305).

Como se calienta rápidamente el agua del condensador por efecto de la liquefacción de los vapores, es preciso renovarla con frecuencia, lo cual se obtiene mediante dos bombas. Una de ellas, FM, que se denomina *bomba de aire*, aspira del condensador el agua caliente que contiene, al mismo tiempo que el aire disuelto en el agua de la caldera que pasa unido con el vapor al cuerpo del cilindro y al condensador. La otra bomba, HR, a la cual se le da el nombre de *bomba de pozo*, aspira de uno de éstos, o de un río, el agua fría, que es inyectada en el condensador por la presión atmosférica.

La tercera bomba, GQ, es la *bomba alimenticia*, la cual inyecta en el generador el agua caliente aspirada del condensador, obteniéndose así una economía en el consumo de combustible.

#### *Máquina de vapor de doble efecto.*

(Explicación).

- A Vástago del émbolo que se articula con el paralelogramo, y que sirve para transmitir al balancín el movimiento alternativo del émbolo.
- B Varilla fija en el cilindro para sostener el brazo de retorno C.
- C Doble brazo de retorno, que dirige el movimiento del paralelogramo.
- D, D, Varillas que forman con la extremidad del balancín un paralelogramo articulado, al cual se fija el vástago del émbolo, y que reconoce por objeto conservar a este vástago un movimiento rectilíneo durante su curso.
- E Vástago de la *bomba de aire*, que extrae el aire y el agua caliente del condensador.

- G Vástago de la *bomba alimenticia* que inyecta en la caldera por el tubo S, el agua caliente aspirada del condensador.
- H Vástago de la *bomba del pozo* que sirve para elevar el agua fría necesaria para la condensación.
- I *Barra de conexión o biela*, que transmite el movimiento del balancín al manubrio.
- K *Manubrio* que transmite el movimiento de la biela al árbol motor.
- L *Balancín móvil* en su parte media sobre dos gorriones. Transmite el movimiento del émbolo a la barra de conexión.
- M Cilindro de la bomba de aire que comunica con el condensador O.
- N Depósito por el cual pasa el agua caliente que aspira del condensador la bomba de aire.
- O *Condensador* lleno de agua fría, en el cual se liquida el vapor después de haber actuado sobre el émbolo.
- P *Émbolo metálico* móvil en un cilindro de hierro fundido. Este émbolo es el que recibe directamente la presión del vapor y el que transmite el movimiento a todas las piezas de la máquina.
- Q Depósito de aire (191) de la bomba impelente alimenticia que dota de agua a la caldera.
- R Depósito de agua fría de la bomba del pozo.
- S Tubo que conduce al generador el agua caliente inyectada por la bomba alimenticia.
- T Tubo que conduce del depósito R al condensador el agua fría aspirada por la bomba del pozo.
- U Tubo que conduce el vapor desde el cilindro al condensador, después de haber actuado sobre el émbolo.
- V Gran rueda de hierro fundido denominada *volante*, que gira con el árbol motor y que sirve para regular el movimiento, en virtud de su inercia, en particular cuando el émbolo se halla en la parte alta y en la inferior de su curso.
- Y Palanca acodillada que transmite el movimiento del excéntrico *c* a la caja de distribución.
- Z Barra del excéntrico.
- a* Orificio que comunica, o con la parte superior, o con la inferior del cilindro, y que sirve para dar paso al vapor a fin de que vaya por el tubo M al condensador.
- b* Varilla que transmite el movimiento a la caja de distribución, la cual sirve para que llegue el vapor unas veces encima y otras debajo del émbolo, y que describiremos en el artículo *Distribución del vapor*.
- c* Orificio por el cual llega el vapor del generador a la caja de distribución.
- d* *Caja de estopa*, en la cual resbala el vástago del émbolo sin dar paso al vapor.
- e* *Excéntrico* fijo en el árbol motor: gira en un collar al cual se une la barra *z*.
- m* Varilla que enlaza la varilla *b* de la válvula con la palanca acodillada Y y con el excéntrico.

En la [figura 243](#), la parte inferior del dibujo no representa enteramente la disposición que comúnmente se da a las bombas, al depósito de agua caliente y al de agua fría. Las modificaciones del grabado se han hecho con la idea de que se comprenda mejor cómo funcionan estas piezas y cómo se enlazan entre sí.

389. Distribución del vapor; excéntrico. -La [figura 244](#) representa los pormenores de la *distribución del vapor*. Un tubo *c*, que comunica con la caldera, conduce el vapor a una caja rectangular de hierro fundido fija en el cilindro. En el espesor de la pared de este último hay tres orificios *u*, *n*, *a*: por un conducto interno comunica el primero con la parte superior del cilindro; el segundo con la inferior, y el tercero *a* con un orificio *r* que se dirige al condensador. Sobre los tres orificios resbala una pieza *t*, llamada *corredera* o *válvula en forma de D*, fija por una varilla *b* articulada en *m* con un eje mayor *d*, a fin de recibir con él un movimiento de vaivén de una palanca angular y o *S*, que se encuentra ajustada en el excéntrico. Cuando la

válvula ocupa la parte superior de su curso, como indica la figura, penetra el vapor por el orificio  $n$  y pasa a la parte inferior del cilindro, mientras que, por cerrar aquélla el orificio  $u$ , no puede penetrar por él el vapor; pero el vapor que se halla encima del émbolo se dirige por el mismo orificio  $n$  y por el  $a$  a la cavidad  $r$ , por la cual pasa al condensador. En este caso el émbolo sólo se encuentra impelido de abajo hacia arriba, y asciende por lo tanto.

Por el contrario, si se encuentra la válvula en el punto inferior de su curso, el orificio  $u$  es el que da entrada al vapor y el  $n$  el que le deja paso para dirigirse al condensador; por lo tanto, desciende el émbolo, aconteciendo lo propio cada vez que varía de posición la válvula.

El movimiento de vaivén que acepta la válvula procede del *excéntrico*. Tal es el nombre que se da a una pieza circular E, fija en el árbol motor A, pero de modo que su centro no coincida con el eje de dicho árbol. El excéntrico se halla envuelto por un aro C, en el cual gira, a rozamiento suave, ajustándose en el mismo las varillas ZZ. Acepta el aro, sin girar, el movimiento del excéntrico, y recibe de él, en la dirección horizontal, un movimiento alternativo que comunica a la palanca S o y, y ésta a su vez a la válvula.

390. Máquina de simple efecto. -Se denomina *máquina de simple efecto* aquélla en la cual sólo actúa el vapor en la cara superior del émbolo, exigiendo para el ascenso de éste, la acción de un contrapeso colocado en la otra extremidad del balancín. Estas máquinas, que apenas se emplean hoy día, se aplicaron especialmente en un principio por Watt al movimiento de las bombas que se utilizan para el agotamiento de las minas. En este caso son preferibles, por su sencillez, a la máquina de doble efecto, y así es que aún se emplean en el condado de Cornualles, en Inglaterra.

La [fig. 245](#) representa la sección de una máquina de simple efecto. El balancín BB es de madera: existen en su extremidad unos arcos de círculo, en los cuales se arrollan dos cadenas, sujeta una de ellas al vástago del émbolo P, sobre el cual obra el vapor, y la otra al vástago de la bomba de desagüe. A la derecha del cilindro A se encuentra la caja de distribución C, a la cual llega el vapor de la caldera por el tubo T. Un vástago vertical  $d$  mueve tres válvulas  $m$ ,  $n$  y  $o$ ; la  $m$  y la  $o$  se abren de abajo hacia arriba, y la  $n$  de arriba hacia abajo.

Estando abiertas las válvulas  $m$  y  $o$ , conforme indica el dibujo, llega directamente el vapor de la caldera, por el tubo T, al émbolo P, mientras que el que se encuentra debajo pasa al condensador N por el conducto M; en cuyo caso desciende el émbolo. La varilla que mueve las válvulas  $m$ ,  $n$  y  $o$  se encuentra unida con una palanca angular  $dck$ , móvil en una charnela  $c$ . Esta palanca angular es la que abre y cierra las válvulas. Al efecto, una varilla F, fija en el balancín, posee dos topes  $a$  y  $b$ , por medio de los cuales choca con la extremidad  $k$  de la palanca angular. En la [fig. 245](#), por efecto de la disposición de las válvulas, desciende el émbolo y con él la varilla F; de consiguiente, el tope  $b$  choca con la palanca y la hace descender al mismo tiempo que a la varilla  $dmo$ , cerrándose entonces las válvulas  $m$  y  $o$ , y abriéndose la  $n$ . En este momento se interrumpe la comunicación con la caldera y con el condensador; pero el vapor que acaba de hacer descender al émbolo, pasa libremente a la parte inferior por el conducto C. Como entonces oprime por igual las dos caras del émbolo, se equilibra, subiendo de nuevo el émbolo en virtud de la tracción que ejerce el peso Q; operación que requiere poca fuerza, porque la bomba de desagüe, cuyo eje se fija en el peso Q, sólo exige un esfuerzo cuando asciende su émbolo. En el momento en que el pistón P llega a la parte superior de su curso, el tope  $a$  choca a su vez contra la palanca  $k$ , levanta a varilla  $dmo$ , y el vapor actúa de nuevo sobre el émbolo, el cual principia a descender, continuando de esta suerte sus movimientos.

391. Locomotoras. -Llámanse *máquinas locomotoras*, o simplemente *locomotoras*, las máquinas de vapor que, montadas sobre el armazón de un carruaje, se mueven por sí mismas, transmitiendo el movimiento a las ruedas.

En las locomotoras se suprimen el paralelogramo, el balancín y el volante de las máquinas fijas; encontrándose también completamente modificada la forma de la caldera. Las partes principales de que constan son las siguientes: el *bastidor*, la *caja de fuego*, el *cuerpo cilíndrico* de la caldera, los *cilindros de vapor* con sus válvulas, las *ruedas motoras* y las que se contraen a la alimentación del generador.

El bastidor es un marco de madera de roble, sostenido por los ejes de las ruedas, y que sirve de apoyo a su vez a todas las partes de la máquina. La [fig. 246](#) representa al maquinista que dirige la locomotora, subido sobre la plataforma de palastro que cubre al bastidor, en el momento de ir a abrir el regulador de *admisión del vapor* I, situado en la parte superior de la caja de fuego Z. En la parte inferior de ésta se encuentra el hogar, desde el cual la llama y los productos de la combustión pasan a la caja de humo Y, y luego al tubo de la chimenea, después de haber cruzado 125 tubos de cobre que se hallan completamente sumergidos en el agua de la caldera.

La caldera que enlaza la caja de fuego con la de humo, es de palastro, de forma cilíndrica, de un metro de diámetro, encontrándose cubierta de duelas de caoba que, por su débil conductibilidad, se oponen al enfriamiento. Al salir de la caldera pasa el vapor a los dos cilindros situados a cada lado de la caja de humo. En ellos, por medio de una distribución análoga a la ya descrita (389), obra alternativamente sobre las dos caras de los émbolos, cuyos vástagos transmiten el movimiento al eje de las ruedas motoras. No se ve esta distribución en el grabado, porque se encuentra en la parte inferior del bastidor entre los dos cilindros. Después de haber actuado el vapor sobre los émbolos, se desprende por la chimenea aumentando así su tiro. La transmisión del movimiento de los émbolos a las dos ruedas motoras se efectúa por dos bielass o barras de conexión que, por medio de manivelas, ligan los vástagos de los émbolos con el eje de dichas ruedas. En cuanto al movimiento alternativo de la válvula en la caja de distribución de cada uno de los cilindros, se obtiene por medio de excéntricos, colocados sobre el eje de las dos ruedas motoras.

La alimentación, es decir, la renovación del agua en la caldera, se obtiene por dos bombas aspirantes e impelentes, situadas debajo del bastidor y movidas por excéntricos. Estas bombas aspiran el agua, por medio de tubos de comunicación, de un depósito situado en el *ténder*, nombre que se da al carruaje que sigue inmediatamente a la locomotora, y que transporta el agua y el carbón necesarios para un recorrido determinado.

La explicación que acompaña al grabado nos ahorra el entrar en mayores detalles.

*Locomotora de cúpula o receptáculo de vapor.*

- A Tubo de cobre que recibe el vapor por su extremidad I, y que se bifurca en el otro extremo, para conducirlo a los dos cilindros que contienen los émbolos motores.
- B Mango de la palanca que sirve para cambiar la dirección de la marcha de la máquina. Transmite el movimiento a la barra C, la cual lo comunica a la distribución.
- C Barra del aparato anterior para cambiar la marcha.
- D Parte inferior de la caja de fuego que contiene las rejillas del fogón.
- E Tubo de escape del vapor luego que ha actuado sobre los pistones.
- F Cilindro de fundición que contiene un émbolo motor. A cada lado de la locomotora existe uno análogo. Con objeto de que se vea el émbolo, está entreabierto el cilindro en la figura, que describimos.
- G Vástago que sirve para abrir la corredera I, a fin de que pase el vapor al tubo A. En el grabado tiene en la mano el maquinista la palanca que hace girar este vástago.
- H Llave para vaciar la caldera.
- I Regulador que se abre y se cierra a mano, para la toma o introducción del vapor.
- K Gran biela motora ahorquillada, que reúne la extremidad del vástago del pistón con el manubrio M de la rueda motora.
- L Lámpara y reflector que sirve para indicar, la aproximación de la locomotora, durante la noche.
- M Manivela que transmite al eje de la rueda motora el movimiento del émbolo.
- N Botón para enganchar el ténder. Puerta del fogón por el cual el fogonero introduce el coke.
- P Émbolo metálico cuyo vástago se articula con la barra K.
- Q Tubo de la chimenea por la cual se escapan el humo y el vapor de los cilindros.

- R,R Tubos que conducen el agua del ténder a dos bombas impelentes que alimentan la caldera, pero que no se ven en el dibujo.
- S Palanca que barre las piedras o cualquier otro obstáculo que exista en la vía.
- T,T Resortes que sustentan la caldera.
- U,U Rails o barras de hierro que, apoyadas sobre cojinetes, reposan sobre traviesas de madera.
- V Bastidor o macizo de la caja de estopa de los cilindros.
- X,X Cuerpo cilíndrico de la caldera, cubierto de duelas de caoba que disminuyen la pérdida de calor por su débil conductibilidad. Vese debajo del tubo A hasta qué punto asciende el nivel del agua en la caldera. En el centro mismo del agua existen los tubos de cobre *a*, al través de los cuales pasan los productos de la combustión para dirigirse a la caja de humo.
- Y Caja de humo donde terminan los tubos *a*.
- Z,Z Caja de fuego con cúpula o receptáculo para el vapor.
- a* Tubos de cobre en número de 125, abiertos por sus dos extremos. Terminan por un lado en la caja de fuego, y por el otro en la de humo. Estos tubos transmiten el calor del hogar al agua de la caldera, y la vaporizan.
- b* Sector-guía situado al lado de la caja de fuego que posee varias muescas, en las cuales puede engranar el brazo de la palanca B. La muesca extrema anterior, corresponde a la marcha hacia adelante; la extrema posterior, a la marcha hacia atrás, y la de en medio es un punto muerto. Las muescas intermedias entre ésta y las extremas, regulan la expansión para la marcha hacia adelante o hacia atrás.
- c* Cajas que contienen resortes espirales que regulan el juego de las válvulas de seguridad *i*.
- g* Silbato de alarma que se oye a unos 2000 metros.
- i* Válvulas de seguridad.
- m,m* Estribos para subir a la locomotora.
- n* Tubo de cristal situado delante del maquinista para indicar el nivel del agua en la caldera, con la cual comunica por sus dos extremos.
- r,r* Guías que mantienen en línea recta el movimiento de la cabeza del émbolo.
- t,t* Llaves para purgar, después de dispuesto el tren y de calentados los cilindros.
- v* Varilla que transmite el movimiento a las llaves de purgar.

392. Máquinas de reacción; eolípila. -Se denominan *máquinas de reacción*, unas máquinas en las cuales actúa el vapor por reacción, a la manera del agua en el molinete hidráulico (85). La idea de estas máquinas es muy antigua, pues ciento veinte años antes de Jesucristo, Heron de Alejandría, el inventor de la fuente que conserva su nombre, describió el siguiente aparato, conocido con el nombre de *eolípila de reacción*.

Consiste en una esfera hueca de metal ([fig. 247](#)), que puede girar alrededor de dos gorriones. En las extremidades de un mismo diámetro se ven dos tubos agujereados lateralmente, y en sentido contrario, que dan paso al vapor. Para introducir el agua en la esfera, se principia por calentarla, a fin de enrarecer el aire; luego se introduce en agua fría, con lo cual el aire se contrae y penetra el líquido en la esfera. Calentando entonces el aparato hasta la ebullición, el vapor que se desprende le imprime un movimiento de rotación muy rápido, debido a la presión del vapor sobre la pared opuesta al orificio de salida.

Se han efectuado diversas tentativas con objeto de utilizar en grande escala la reacción del vapor como fuerza motriz. También se ha ensayado el hacerle obrar por impulsión, dirigiendo un chorro de vapor sobre la paleta de una rueda giratoria; pero en estos diversos procedimientos, el vapor dista mucho de ofrecer el efecto útil que se obtiene haciéndolo actuar por expansión sobre un émbolo.

393. Máquinas de baja, de alta y de mediana presión. -Se dice que una máquina es de *baja presión*, cuando la tensión del vapor no pasa de 1 atmósfera y  $\frac{1}{4}$ ; de *mediana presión*, si esta presión se halla comprendida entre  $1\frac{1}{4}$  y 4 atmósferas, y de *alta presión*, si es superior a 4 atmósferas.

394. Máquinas con expansión y sin ella. -Si el vapor funciona de lleno sobre el émbolo durante todo su curso, no varía su fuerza elástica y se dice que el vapor obra *sin expansión*; pero si, merced a una disposición adecuada de la válvula, cesa de llegar vapor sobre el émbolo, cuando sólo se encuentra éste a los dos tercios o a los tres cuartos de su curso, entonces es la máquina de *expansión*; es decir, que, en virtud de su fuerza expansiva, debida a su alta temperatura, continúa obrando sobre el émbolo, y acaba de hacerle recorrer su curso. De aquí la distinción de *máquinas con expansión y sin expansión*.

Por último, se denominan *máquinas de condensación* las que poseen un condensador para la liquefacción del vapor que ha obrado sobre el émbolo; y *máquinas sin condensación*, las que carecen de condensador, como son las locomotoras.

395. Caballo de vapor. -En mecánica aplicada, se entiende, por *trabajo mecánico* de un motor, el producto por esfuerzo que ejerce, por el camino recorrido por éste, y se toma como unidad de trabajo mecánico, el *kilográmetro*, o sea el trabajo necesario para elevar 1 kilogramo a 1 metro de altura en 1 segundo.

En la medida del trabajo de las máquinas de vapor, sirve de unidad el *caballo de vapor*, que representa el *trabajo necesario para elevar 75 kilogramos a 1 metro de altura en un segundo*, es decir, que equivale a 75 kilográmetros. De consiguiente, una máquina de 40 caballos es la que puede elevar, de una manera continua, 40 veces 75 kilogramos, o 3000 kilogramos, a 1 metro de altura segundo. El trabajo de un caballo de vapor es casi doble del de un caballo ordinario de tiro.

△

## Capítulo XI

▽△

### Manantiales de calor

396. Diferentes manantiales de calor. - Los diversos manantiales de calor son: 1.º los *mecánicos*, que comprenden el rozamiento, la percusión y la presión; 2.º los *físicos*, a saber, la radiación solar, el calor terrestre, las acciones moleculares, los cambios de estado y la electricidad; 3.º los *químicos*, es decir, las combinaciones moleculares, y especialmente la combustión.

#### *Manantiales mecánicos.*

397. Calor engendrado por el rozamiento. -El roce de dos cuerpos uno sobre otro, desarrolla una cantidad de calor tanto más considerable, cuanto más intensa es la presión y más rápido el movimiento. Por ejemplo, sucede con frecuencia que se calientan hasta inflamarse los cubos de las ruedas de los coches por su roce con el eje. Davy fundió parcialmente dos pedazos de hielo frotándolos entre sí, en una atmósfera bajo cero. Rumford al horadar, debajo del agua, un trozo de bronce, encontró que, para obtener 250 gramos de limaduras, el calor desarrollado por el rozamiento es capaz de elevar 25 kilogramos de agua desde cero a 100 grados, cantidad que representa 2500

calorías (344). En la exposición universal de 1855, MM. Beaumont y, Mayer expusieron un aparato con el cual elevaban, en algunas horas, desde 10 hasta 130 grados, 400 litros de agua. Este calor se desarrollaba por el rozamiento que se producía en el interior de un cono hueco de cobre, por otro cono de madera recubierto de cáñamo, que efectuaba en el interior de aquél 400 vueltas por minuto. El cono hueco estaba fijo y completamente sumergido en el agua de una caldera herméticamente cerrada. Las superficies frotadas se encontraban constantemente impregnadas de aceite.

Al chocar el eslabón contra el pedernal, se desarrolla con el rozamiento tal calor, que las partículas metálicas que se desprenden llegan a inflamarse en el aire.

Atribúyese el calor que desarrolla el rozamiento, a un movimiento vibratorio que adquieren las moléculas de los cuerpos.

398. Calor originado por la presión y por la percusión. - Si se comprime un cuerpo de manera que aumente su densidad sube tanto más su temperatura, cuanto mayor es la disminución del volumen. Este fenómeno, poco sensible en los líquidos, lo es más en los sólidos; pero en los gases, que son sumamente compresibles, es muy considerable el desprendimiento de calor.

Demuéstrase este último, por medio del *eslabón neumático*. Se compone este instrumento de un tubo de vidrio de paredes gruesas, con un émbolo de cuero que se ajusta herméticamente ([fig. 248](#)), y que tiene en su base una cavidad para situar un pedacito de yesca. Lleno de aire el tubo, se introduce bruscamente el émbolo, y el aire comprimido se calienta entonces en términos de inflamar la yesca, la cual arde con solo retirar rápidamente el émbolo. La inflamación de la yesca, en este experimento, supone una temperatura de 300 grados por lo menos. En el acto de la compresión se nota una luz bastante viva, que se atribuyó primero a la alta temperatura que adquiere el aire; pero luego se ha reconocido que depende únicamente de la combustión del aceite con que se impregna el émbolo.

La presión, por efecto del ascenso de temperatura que determina, basta para originar la combinación, y de consiguiente, la detonación de una mezcla de oxígeno y de hidrógeno.

El calor que desarrolla la compresión, se explica por la aproximación de las moléculas, que hace pasar parte del calor latente al estado de calor sensible.

Otro manantial de calor es la percusión, como puede notarse batiendo sobre un yunque un metal maleable. Pero el calor que entonces se desprende debe su origen, no solo a la aproximación de las moléculas, sino también a un movimiento vibratorio, puesto que el plomo se calienta, no obstante de que no aumenta su densidad por la percusión.

#### *Manantiales físicos.*

399. Radiación solar. -El sol es el manantial más intenso de calor, pero se ignora la causa del que emite este astro, que suponen unos ser una masa inflamada que experimenta inmensas erupciones, mientras que otros le han considerado como compuesto de capas que reaccionan químicamente unas sobre otras, de igual manera que los pares de la pila voltaica, dando así origen a corrientes eléctricas, a las cuales

deberíamos la luz y el calor solar. Según ambas hipótesis, debe contar un término la incandescencia del sol.

Varias son las tentativas que se han efectuado para medir la cantidad de calor que anualmente emite el sol. M. Pouillet encontró, por medio de un aparato que ha denominado *pyrheliómetro*, que si la cantidad total de calor que la tierra recibe del sol, en el curso de un año, se emplease enteramente en fundir hielo, sería capaz de fundir una capa de 31 metros de espesor extendida alrededor del globo. Ahora bien, atendida la superficie que presenta la tierra a la radiación del sol, y en vista de la distancia a que se encuentra de dicho astro, sólo recibe  $\frac{1}{238100000}$  del calor que éste emite.

400. Calor terrestre. -El globo terrestre posee un calor propio que se designa con el nombre de *calor central*. En efecto, a una profundidad poco considerable, pero que varía según los países, se encuentra una capa cuya temperatura permanece constante en todas las estaciones; de lo cual se deduce que el calor solar no penetra en el suelo más que hasta una profundidad determinada. Luego, debajo de esta capa, que se designa con el nombre de *capa invariable*, se observa que la temperatura aumenta, por término medio, un grado por cada 30 o 40 metros de profundidad. En las minas y en los pozos artesianos, se ha comprobado a grandes profundidades esta ley del aumento de temperatura de la tierra. A 3500 metros, es decir, a algo menos de una legua métrica, llegaría ya a 100 grados la temperatura de la capa correspondiente. Las aguas termales y los volcanes confirman la existencia del calor central.

La profundidad a la cual se encuentra la capa invariable, no es idéntica en los diferentes puntos del globo: en París es de 27 metros, y la temperatura permanece constantemente a 11°,8.

Diversas son las hipótesis que se han ideado para explicar el calor central; pero la que generalmente admiten los físicos y los geólogos, es la que supone que la tierra se mantuvo líquida en un principio por efecto de una alta temperatura, y que, por irradiación se ha solidificado poco a poco la superficie terrestre hasta formar una corteza sólida, y que en la actualidad no pasará de 14 a 15 leguas de espesor, encontrándose en el estado líquido la masa central. El enfriamiento no puede menos de verificarse con suma lentitud, por razón de la débil conductibilidad de las capas terrestres. Por igual causa, el calor central sólo eleva, al parecer,  $\frac{1}{36}$  de grado la temperatura del globo.

401. Calor desprendido por la imbibición y la absorción. Los fenómenos moleculares, como la imbibición (134), la absorción y las acciones capilares, se encuentran acompañados en general de un desprendimiento de calor. M. Pouillet observó que, siempre que se vierte un líquido sobre un sólido muy dividido, se nota una elevación de temperatura que varía según la naturaleza de las sustancias. Con las materias inorgánicas, como los metales, los óxidos y las tierras, viene a ser de 2 a 3 décimos de grado; pero con las orgánicas, tales como la esponja, la harina, el almidón, las raíces y las membranas secas, varía de 1 a 10 grados.

Igual fenómeno ofrece la absorción de los gases por los cuerpos sólidos. M. Dobereiner averiguó que, colocando en el oxígeno platino muy dividido, cual es el que se obtiene en el estado de precipitado químico con el nombre de *negro de platino*, absorbe este metal muchos centenares de veces su volumen de aquel gas, elevándose entonces la

temperatura lo suficiente para dar margen a combustiones muy intensas. Produce igual efecto la *esponja* o el *musgo de platino*, que se obtiene precipitando el cloruro de platino por la sal amoníaco; y así es que basta dirigirle una corriente de hidrógeno, para que éste se inflame por el desprendimiento del calor originado por la absorción.

En este principio se funda el *eslabón de musgo de platino*. Consta este aparato de dos vasijas de vidrio ([fig. 249](#)), una de las cuales A penetra en otra inferior B por medio de un tubo esmerilado que la cierra herméticamente, y en cuya extremidad existe una masa de zinc Z, que se inmerge en agua cargada, de ácido sulfúrico. La reacción del agua, del ácido y del metal produce un desprendimiento de hidrógeno, que no encontrando en un principio salida a alguna, repele el agua de la vasija B a la A hasta que no se sumerja el zinc. El tapón de la vasija superior, permite que salga por su contorno el agua, a medida que va subiendo. Un tubo de cobre H, fijo en el costado de la vasija B, posee, un pequeño cono E con un orificio, encima del cual hay una esponja de platino en una cápsula D.

Sentado esto, al abrir una llave que cierra el tubo de cobre, se desprende el hidrógeno y se inflama por su contacto con el platino; pero no hay que presentar este metal a la corriente del gas, sino después de expulsado todo el aire de la vasija B; pues, de lo contrario, la combinación del oxígeno y del hidrógeno ocasionaría una viva detonación.

M. Favre, que ha efectuado investigaciones recientes acerca del calor que desprende un gas al ser absorbido por el carbón (135), llegó al notable resultado de que el calor máximo emitido por la absorción de 1 gramo de ácido sulfuroso o de protóxido de nitrógeno, es muy superior al que da la liquefacción de un peso igual de los mismos gases; y el calor desprendido por la absorción del ácido carbónico excede al que daría su propia solidificación. Debemos deducir de aquí, que no puede explicarse por completo el calor que se obtiene, por la absorción de los gases, admitiendo que el gas absorbido se liquida y se solidifica en los poros del carbón, sino que es preciso además el admitir una acción especial entre las moléculas del carbón y las del gas, acción que M. Mitcherlich ha designado con el nombre de *afinidad capilar*.

El calor que originan los cambios de estado, se ha estudiado ya en los artículos *Solidificación y Liquefacción* (290 y 317); y el que procede de la electricidad, se dará a conocer en la teoría de los fenómenos eléctricos.

#### *Manantiales químicos.*

402. Combinaciones químicas; combustión. -Acompaña generalmente a las combinaciones químicas, un desprendimiento más o menos abundante de calor. Es insensible, si se efectúan con lentitud, como por ejemplo, cuando se oxida el hierro en el aire; pero es muy intenso, si se producen con rapidez, surgiendo entonces una combustión.

Se denomina *combustión*, toda combinación química que se efectúa con desprendimiento de calor y de luz. En las combustiones que nos presentan las hornillas, las lámparas, las bujías, etc., se combinan con el oxígeno del aire, el carbono y el hidrógeno de la madera, del aceite y de la cera; pero además existen combustiones en las cuales en nada actúa el oxígeno. Por ejemplo, si en un frasco de cloro se proyecta

antimonio muy dividido o fragmentos de fósforo, se unen estos cuerpos con el cloro, con un vivo desprendimiento de luz y de calor.

Muchos combustibles arden con llama. La *llama* es simplemente un gas o un vapor que han adquirido una alta temperatura por efecto de la combustión. Su poder iluminante varía con los productos que se forman durante la combustión. La presencia de un cuerpo sólido en una llama, aumenta su facultad iluminante. Las llamas de hidrógeno, de óxido de carbono y de alcohol son pálidas, porque no contienen más que productos gaseosos; pero las de las velas, de los velones y del gas del alumbrado, poseen un gran poder iluminante, por contener un exceso de carbono, el cual, experimentando tan sólo una combustión incompleta, se vuelve incandescente en la llama. Se da una intensidad mucho mayor a una llama, colocando en ella hilos de platino o de amianto. Obsérvese que la temperatura de una llama no está en relación con su poder iluminante; pues la de hidrógeno, que es la más pálida, es, sin embargo, la que más calor produce.

403. Calor emitido durante la combustión. -Muchos físicos, y particularmente Lavoisier, Rumford, Dulong, Despretz, Hess y los señores Fabre y Silbermann, han tratado de investigar el calor que emiten los diferentes cuerpos durante la combustión y las combinaciones.

Para estos experimentos, empleó Lavoisier el calorímetro de hielo, descrito anteriormente (349); Rumford hizo uso de un calorímetro, que conserva su nombre, y que consiste en una cuba rectangular, llena de agua, en cuyo interior hay un serpentín que cruza su fondo, terminando en forma de embudo invertido. Debajo de este embudo es donde se queman los cuerpos que se someten al experimento. Los productos de la combustión se desprenden por el serpentín calentando el agua de la cuba, y, según la temperatura de este líquido, se deduce el calórico desprendido. Despretz y Dulong han modificado sucesivamente el calorímetro de Rumford, quemando los cuerpos, no debajo de la cuba que contiene el agua que se ha de calentado, sino en una cámara de combustión colocada en el interior mismo del líquido; el oxígeno necesario a la combustión llegaba por un tubo, dispuesto en la parte inferior de la cámara, y los productos de la combustión desprendían por otro tubo, colocado en la parte superior y arrollado en forma de serpentín en la masa del líquido que habían de calentar. Finalmente, MM. Fabre y Silbermann son los que han perfeccionado en particular y con suma habilidad este calorímetro, evitando, en cuanto es posible, toda causa de error, y pudiendo determinar, no sólo la cantidad de calor desprendida en la combustión, sino también en las acciones químicas.

Tomando como unidad de calor la cantidad de calórico necesaria para elevar 1 grado la temperatura de 1 kilogramo de agua, encontró Dulong que un kilogramo de las sustancias siguientes, emite al arder, los números de unidades comprendidos en la tabla que sigue.

Hidrógeno.	34600	Hulla mediana.	7600
Hidrógeno protocarbonado.	13205	Carbono puro.	7295
- bicarbonado.	12032	Alcohol a 42° de Baumé.	6855
Esencia de trementina.	10836	Madera muy seca.	3652
Aceite de olivas.	9862	Azufre.	2601
Éter sulfúrico.	9430	Óxido de carbono.	2488

Los números anteriormente deducidos por otros físicos difieren mucho, en algunos cuerpos, de los obtenidos por Dulong, sobre todo respecto al carbono; pero hoy día la concordancia muy aproximada entre los resultados de MM. Fabre y Silbermann, y los de Dulong, manifiesta la exactitud de los números obtenidos por este físico.

Los experimentos de Dulong, de M. Despretz y de M. Hess conducen al principio de que un cuerpo que arde, emite siempre la misma cantidad de calor para llegar al mismo grado de oxidación, ora lo verifique inmediatamente, ora de un modo progresivo. Por ejemplo, un gramo de carbono que se transforma directamente en ácido carbónico, desprende la misma cantidad de calor que si se hubiese convertido primero en óxido de carbono, y luego éste en ácido carbónico.

▽△

## Calefacción

404. Diversos sistemas de calefacción. -La *calefacción* es un arte que tiene por objeto utilizar, en la economía doméstica y en la industria, los manantiales de calor que nos ofrece la naturaleza.

La combustión de la madera, del carbón, de la hulla, del coke, de la turba y de la antracita, es el manantial de calor que principalmente se utiliza en la actualidad.

Atendiendo a los aparatos que sirven para la combustión, pueden admitirse cuatro procedimientos de calefacción, a saber: 1.º a calefacción de hogar exterior, como acontece en las chimeneas; 2.º la que se efectúa por medio de un hogar interior, tal como el de las estufas; 3.º la que se efectúa por medio del aire enrarecido; 4.º la que utiliza el vapor, y 5.º la que se obtiene por la circulación del agua caliente. Pasemos a describir con brevedad estos diferentes procedimientos.

405. Chimeneas. -Las *chimeneas* son hogares abiertos, situados junto a la pared y coronados por un tubo que da paso a los productos de la combustión. La invención de las chimeneas data, al parecer, del primer siglo de la era cristiana. En tiempos más remotos, se colocaba el foco en el centro de la pieza que debía calentarse, y el humo se escapaba por una abertura que se practicaba en el techo de las habitaciones. Por eso aconsejaba Vitruvio que no se adornaran con obras suntuosas los cuartos de invierno, a fin de que no los echase a perder el humo y el hollín.

Las primeras chimeneas, si bien se aplicaban contra las paredes, no llevaban jambas ni dinteles, sino simplemente una *campana* para la salida del humo; de suerte que la forma que hoy se les da es enteramente moderna. Las personas que sucesivamente han ido perfeccionándolas son físicos, y particularmente Filiberto Delorme, Ganger, Franklin y Rumford.

A pesar de todos los perfeccionamientos de las chimeneas, son los caloríferos más imperfectos y más dispendiosos, porque sólo utilizan, con la madera, un 6 por 100 del calor total emitido por el combustible, y un 13 con el coke y la hulla. Proviene esta enorme pérdida de que la corriente de aire necesaria para la combustión arrastra siempre una cantidad considerable de calor producido, de suerte que éste en gran parte, se pierde en la atmósfera. Esta circunstancia obligó a decir a Franklin que si se deseaba, con una cantidad dada de combustible, obtener el menor calor posible, debían adoptarse las chimeneas. Con todo, son y seguirán siendo el sistema de calefacción más agradable y sano, por la presencia del fuego y porque renuevan de continuo el aire de las habitaciones.

406. Tiro de las chimeneas. -Se entiende por *tiro* de una chimenea una corriente que se establece de abajo hacia arriba en el tubo, por efecto del ascenso de los productos de la combustión. Cuando la corriente es rápida y continua, se dice que tira bien la chimenea.

Reconoce por causa el tiro, la diferencia de temperatura entre el interior del tubo y el exterior, porque, siendo, en su virtud, las materias gaseosas que llenan el tubo menos densas que el aire del aposento, es imposible el equilibrio (171). Efectivamente, como el peso de la columna gaseosa CD ([fig. 250](#)) en el tubo es menor que el de la columna de aire exterior AB, que tiene la misma altura, resulta por esto, de

afuera hacia adentro, un exceso de presión que repele los productos de la combustión, con tanta mayor rapidez, cuanto más notable sea la diferencia de peso entre las dos masas gaseosas.

Compruébase perfectamente la existencia de las corrientes que originan, en los gases, la diferencia de temperatura, por medio del experimento que sigue: se abre una puerta que ponga en comunicación una pieza calentada con otra que no lo esté, y luego se coloca en la parte superior una vela encendida; su llama se dirige desde el sitio caliente hacia el frío; y por el contrario, si se la pone en el suelo, se dirige la llama desde el aposento frío al que se halla caliente. Dependen estos dos efectos, de una corriente de aire enrarecido que se escapa por la parte superior de la puerta, y de otra fría que pasa a reemplazarle por la inferior.

La chimenea para que tire bien, debe contar con las siguientes condiciones:

- 1.<sup>a</sup> La sección del tubo ha de poseer las dimensiones estrictamente necesarias para la salida de los productos de la combustión, pues en caso contrario, si es demasiado grande, se establecen a la vez corrientes ascendentes y descendentes, y la chimenea despide humo. Conviene colocar en el vértice un tubo cónico más estrecho, a fin de que salga el humo con velocidad suficiente para resistir la acción del viento
- 2.<sup>a</sup> El tubo de la chimenea ha de ser bastante alto, porque como la causa del tiro es el exceso de la presión exterior sobre la interna, éste será tanto mayor, cuanto más alta sea la columna de aire caliente.
- 3.<sup>a</sup> Es preciso que el aire exterior pueda penetrar en el aposento en el cual exista la chimenea, con toda la rapidez que exija el hogar. En una habitación herméticamente cerrada no ardería el combustible, o se establecerían corrientes de aire descendentes que llenarían de humo el cuarto. El aire entra, de ordinario, en cantidad suficiente por las rendijas de las puertas y de las ventanas.
- 4.<sup>a</sup> Debe evitarse siempre, que comuniquen entre sí dos tubos de chimenea, porque si tira el uno más que el otro, surge, en este último, una corriente de aire descendente que llena de humo la habitación.

407. Estufas. -Las *estufas* son aparatos caloríferos de hogar aislado, situados en el mismo centro de la masa de aire que trata de calentarse, de suerte que radia el calórico en todas direcciones, alrededor del foco. Por la parte inferior entra el aire, y los productos salen por la superior por medio de tubos. Como estos productos gaseosos se enfrían mucho al salir, puede utilizarse así la totalidad del calor desarrollado. Este sistema es más económico, pero dista mucho de ser tan saludable como el de las chimeneas, porque su ventilación es muy débil, y hasta nula, si se toma el aire del exterior como en las estufas suecas. Ofrecen, además, el inconveniente de producir un olor desagradable y perjudicial, en particular cuando son de hierro fundido o de palastro, lo que probablemente debe atribuirse a la descomposición de las materias orgánicas del aire, por su contacto con las paredes calentadas de los tubos.

La calefacción es más rápida con las estufas de metal ennegrecido y de gran poder emisor, pero en cambio se enfrían muy pronto. Las de loza blanca y barnizada, de débil poder emisor, calientan con más lentitud, pero por más tiempo y con mayor suavidad.

408. Calefacción por medio del vapor. -Utilízase la propiedad que poseen los vapores de restituir su calórico de vaporización, cuando se condensan, para calentar baños, talleres, edificios públicos, estufas, invernáculos, etc. Al efecto, se produce el vapor en calderas análogas a las que hemos descrito en el artículo *Generador de vapor* ([figura 242](#)), y luego se le hace circular por tubos situados en el punto que se trata de calentar. Se condensa el vapor en estos tubos, y les cede todo su calórico latente, el cual queda libre en el momento de la condensación. Este calórico se trasmite en seguida al aire exterior, o al líquido en el cual se sitúan los tubos de conducción.

409. Calefacción por el empleo del aire caliente. -La calefacción por medio del aire caliente consiste en calentar aire en la parte inferior de un edificio, dejándole que suba luego hasta los pisos superiores, en virtud de su menor densidad, por cañerías situadas en las paredes. El aparato se halla dispuesto según manifiesta la [figura 251](#). Un fogón F, construido en el piso bajo, contiene un sistema de tubos encorvados AB, uno de los cuales tan sólo es visible en el dibujo. Por el orificio inferior A entra el aire, se calienta en

el tubo, y sube en el sentido de las flechas, penetrando en las habitaciones M por el orificio superior B, llamado *boca de calor*.

En los diferentes pisos, posee cada pieza una o muchas bocas de calor, que se procura el disponerlas lo más bajo posible, porque siempre tiende a subir el aire caliente.

El conducto O es un tubo de chimenea común, que da paso a los productos de la combustión.

Estos aparatos, conocidos con el nombre de *caloríferos*, son mucho más económicos que las chimeneas, pero no pueden ventilar tan bien el aire de las habitaciones, y por consiguiente, son menos saludables.

410. Calefacción por medio del agua caliente. -La calefacción efectuada por la circulación del agua caliente consiste en un movimiento continuo de circulación del agua, que, después de haberse calentado en una caldera, sube por una serie de tubos, volviendo por otros análogos a la misma caldera luego que está fría.

A fines del siglo pasado inventó Bonnemain, en Francia, el primer aparato adecuado para este género de calefacción; pero M. Leon Duvoir fue quien dio a estos aparatos la forma que hoy poseen. La [figura 252](#) representa la disposición adoptada por este ingeniero para calentar un edificio de varios pisos. En el sótano se sitúa una caldera *oo*, en forma de campana y de hogar interior F, y encima un largo tubo M que va a un depósito Q, situado en el tejado del edificio que se desea calentar. Dicho depósito tiene en su parte superior un tubo *n* cerrado por una válvula *s*, más o menos cargada, de suerte que limite la tensión del vapor en el interior del aparato.

Esto sentado, y llena de agua la caldera, el tubo M y parte del depósito Q, a medida que se calienta el líquido, se produce en el tubo M una corriente ascendente de agua hasta Q, y al mismo tiempo se establecen corrientes descendentes de agua no ya tan caliente y más densa, que nacen de la parte inferior del depósito Q, dirigiéndose respectivamente por otros tantos tubos a los recipientes *b, d, f*, llenos de agua. Parten luego de éstos, nuevos tubos, en los cuales continúa la corriente descendente, hasta otros receptáculos *a, c, e*; y por fin, dos de estos últimos siguen por tubos de retorno hasta la parte inferior de la caldera.

Durante este doble trayecto, cede sucesivamente el agua caliente su calórico sensible a los tubos y a los depósitos, de suerte que se calientan éstos y se trasforman en verdaderas estufas de agua. Determinase fácilmente su número y sus dimensiones, para calentar un espacio dado, apoyándose en que la experiencia y la teoría han demostrado, que un litro de agua basta para comunicar el calor necesario a 3200 litros de aire. Dos de estas estufas pueden, durante el invierno, mantener de 600 a 700 metros cúbicos de aire a una temperatura de 15 grados.

En el interior de los recipientes *a, b, c, d, e, f*, hay tubos de hierro fundido llenos de aire, que se toma del exterior por medio de los tubos P situados debajo del piso. Este aire, se calienta en los tubos, y sale luego por la parte superior de los recipientes.

La ventaja principal de este sistema de calefacción consiste en dar una temperatura sensiblemente constante durante mucho tiempo, pues se enfría con gran lentitud el agua de los recipientes y de los tubos. Por esto se usa mucho en los invernáculos, en las estufas, en la incubación artificial, y en general, en todos los casos en que se requiere una temperatura uniforme.

▽△

## Manantiales de frío

411. Diversos manantiales de frío. -Las causas del frío son el paso del estado sólido al líquido por las acciones químicas, la evaporación, el enrarecimiento de los gases, la radiación en general, y particularmente la nocturna. Conocidas ya las dos primeras causas (288, 294 y 315), sólo trataremos ahora de las dos últimas.

412. Frío que produce la dilatación de los gases. -Hemos visto ya (398), que por la compresión de los gases queda libre parte del calor latente, y que sube la temperatura. Recíprocamente, el enrarecimiento de un gas va acompañado de un descenso de temperatura, por pasar a latente cierta cantidad de calor libre. Para demostrarlo, se coloca el termómetro de Bréguet (256) debajo del recipiente de la máquina neumática, se hace el vacío, y se nota que a cada golpe del émbolo avanza la aguja hacia el cero, retrocediendo después.

Se ha observado que el frío producido por el enrarecimiento de un gas es generalmente menor que el calor producido por su compresión. Se explica esto diciendo, que el calor cedido por las paredes del cuerpo de bomba, en el primer caso, es mayor que el absorbido en el segundo, puesto que el émbolo, al retirarse, pone al gas en contacto con una superficie cada vez mayor.

413. Frío que produce la radiación nocturna. -De día recibe la tierra del sol más calor que el que emite hacia los espacios celestes, y por lo tanto, se aumenta su temperatura; pero de noche sucede todo lo contrario. El calor que pierde entonces la tierra no queda compensado, y de aquí resulta un descenso de temperatura tanto mayor, cuanto menos nebuloso está el cielo; porque, si hay nubes, éstas emiten a la tierra mayor cantidad de calórico que los cuerpos celestes. Obsérvase, en efecto, en ciertos inviernos, que no se hielan los ríos, a pesar de que marque el termómetro menos de 4 grados bajo cero, por encontrarse cubierto el cielo, mientras que en otros inviernos menos rigurosos se hielan aquéllos, porque está despejada la atmósfera. El poder emisivo (371) influye muchísimo en el enfriamiento por la radiación nocturna; pues cuanto mayor es aquél, tanto más considerable es el enfriamiento.

Ya se verá en la meteorología, que el enfriamiento que origina la radiación nocturna, es la causa del fenómeno denominado rocío.

En Bengala se utiliza el enfriamiento nocturno para obtener artificialmente el hielo. Con este objeto, durante las noches serenas, se exponen a la intemperie grandes vasijas llenas de agua, anchas y de poca altura, teniendo cuidado de que descansen sobre sustancias mal conductoras, como son la paja, las hojas secas, etc. Entonces, por efecto de la radiación nocturna, se enfrían lo suficiente estas vasijas para que se congele el agua, aun cuando el aire esté a 10° sobre cero. El mismo partido se puede sacar, sin duda alguna, en todas las comarcas que tengan el cielo sereno.

Se cuenta que los peruvianos, para preservar de la helada las yemas de las plantas jóvenes, producían grandes hogueras en la inmediación del lugar que querían proteger, consiguiendo así una nube artificial que se oponía al enfriamiento producido por la radiación nocturna. Este procedimiento se ha ensayado recientemente en Francia y debería aplicarse en los distritos, en los cuales abunda el viñedo.

▽△

## Libro sétimo

De la luz

▽△

### Capítulo primero

▽△

#### Trasmisión, velocidad e intensidad de la luz

414. Luz; hipótesis sobre su naturaleza. -La *luz* es el agente que produce en nosotros, por su acción sobre la retina, el fenómeno de la visión. La parte de la física que trata de las propiedades de la luz, se designa con el nombre de *óptica*.

Para explicar el origen de la luz, se han adoptado las mismas hipótesis que para el calor, a saber: la de la *emisión* y la de las *ondulaciones*. En la primera, sostenida por Newton, se asienta que los cuerpos luminosos emiten en todas direcciones, bajo la forma de moléculas sumamente tenues, una sustancia imponderable que se propaga en línea recta con una velocidad casi infinita. Al penetrar estas moléculas en el ojo, actúan sobre la retina, y determinan la sensación que constituye la visión.

En la hipótesis de las ondulaciones, sostenida por Grimaldi, Descartes, Huyghens, Young, Malus y Fresnel, se admite que las moléculas de los cuerpos luminosos están animadas de un movimiento vibratorio infinitamente rápido, que se comunica a un fluido muy sutil y elástico, difundido por todo el universo, que se denomina *éter*; y que una conmoción en un punto cualquiera de este éter se propaga en todos sentidos en forma de ondas esféricas luminosas, de igual manera que propagan el sonido en el aire las ondas sonoras. Con todo, se admite que las vibraciones del éter se producen, no perpendicularmente a la superficie de la onda luminosa, como en la propagación del sonido, sino según esta superficie misma, es decir, perpendicularmente a la dirección que sigue la luz al propagarse, lo cual se expresa diciendo que las vibraciones son *trasversales*. Podemos formarnos una idea de estas vibraciones, agitando una cuerda por uno de sus extremos, pues el movimiento se propaga serpenteando hasta el otro extremo. La propagación se efectúa, pues, en el sentido de la cuerda, pero se verifican al través las vibraciones.

En el sistema de las ondulaciones consiguió Fresnel dar una explicación completa de muchos fenómenos luminosos, tales como los de la *difracción* y los de los *anillos coloreados*, que no podían explicarse en el sistema de la emisión. Por eso, la teoría de las ondulaciones es la única que generalmente se admite, desde las investigaciones de Fresnel.

415. Cuerpos luminosos, diáfanos, traslúcidos y opacos. -Llámanse *cuerpos luminosos* los que emiten luz, como el sol y las sustancias en ignición; *cuerpos diáfanos* o *transparentes* los que dejan fácil paso a la luz, y al través de los cuales se distinguen los objetos, tales son, el agua, los gases y el vidrio pulimentado. Los *cuerpos traslúcidos* son los que, si bien permiten paso a la luz, no dejan reconocer la forma de los objetos que se distingue al través de los mismos, tales son, el vidrio deslustrado y el papel impregnado de aceite. Por fin, se denominan *cuerpos opacos* aquellos que se oponen al paso de la luz, como por ejemplo, las maderas y los metales. Sin embargo, no hay cuerpos completamente opacos, pues todos son más o menos traslúcidos cuando se han reducido a láminas bastante delgadas.

416. Rayo y haz luminosos. -*Rayo luminoso* es la línea que sigue la luz al propagarse, y *haz luminoso* un conjunto de rayos emitidos de un mismo foco. Dícese que es *paralelo* un haz luminoso, cuando se compone de rayos paralelos; *divergente*, si se separan éstos entre sí, y *convergente*, cuando concurren hacia un mismo punto. Todo cuerpo luminoso emite, de todos sus puntos y en todas direcciones, rayos rectilíneos divergentes.

417. Propagación de la luz en un medio homogéneo. -Un *medio* es el espacio, lleno o vacío, en donde se produce un fenómeno. El aire, el agua y el vidrio son medios en los cuales se propaga la luz. Es *homogéneo* un medio, cuando la densidad y la composición química son las mismas en todas sus partes.

Sentado esto, diremos que *en todo medio homogéneo se propaga la luz en línea recta*. En efecto, si se interpone un cuerpo opaco en la línea recta que une el ojo con un cuerpo luminoso, queda interceptada la luz. Obsérvase también que la luz que penetra en la cámara oscura por un pequeño orificio, traza en el aire un surco luminoso rectilíneo, que se hace visible iluminando las moléculas de polvo que flotan en la atmósfera.

Sin embargo, varía de dirección la luz cuando encuentra un obstáculo, que no puede penetrar, o cuando pasa de un medio a otro. Pronto describiremos estos fenómenos con los nombres de *reflexión* y de *refracción*.

418. Sombra, penumbra, reflejo. -La *sombra* de un cuerpo es el lugar del espacio en el cual impide que penetre la luz. Si se desea determinar la extensión y la forma de la sombra que un cuerpo proyecta, hay que distinguir dos casos: aquél en que el cuerpo luminoso es un punto único, o bien cuando constituye una extensión cualquiera.

En el primer caso, sean S ([fig. 253](#)) el punto luminoso, y M el cuerpo que produce la sombra, y que supondremos esférico. Si se concibe que una recta indefinida SG se mueve alrededor de la esfera M, siéndole tangente y pasando constantemente por el punto S, engendra dicha recta una superficie cónica, que más allá de la esfera, separa la porción del espacio que queda en la sombra del iluminado. En el caso que consideramos, si se colocara a cierta distancia del cuerpo opaco una pantalla PQ sería brusco el tránsito de la sombra a la luz, pero no es esto lo que acontece comúnmente, puesto que los cuerpos luminosos poseen siempre cierta extensión.

Supongamos, en efecto, para simplificar la demostración, que los cuerpos iluminante e iluminado sean dos esferas SL y MN ([fig. 254](#)). Si se concibe que una recta indefinida AG se mueve tangencialmente a las dos esferas, cortando siempre la línea de los centros en el punto A, engendra una superficie cónica que tiene por vértice dicho punto, y que limita, detrás de la esfera MN, un espacio MGHN completamente privado de luz. Si en la actualidad una segunda recta LD, que corta la línea de los centros en B, gira también tangencialmente a las dos esferas, en términos de que engendre una nueva superficie cónica BDC, se reconoce, por la inspección de la figura, que todo el espacio exterior, con respecto a dicha superficie se halla completamente iluminado; pero que la parte comprendida entre las dos superficies cónicas no se encuentra ni del todo privada de luz, ni enteramente iluminada. De suerte que, si se coloca una pantalla PQ detrás del cuerpo opaco, la porción *cGdH* de aquélla, está por completo en la sombra, y la anular *ab* recibe luz de ciertos puntos del cuerpo luminoso, pero no de todos. Esta porción de pantalla se encuentra, pues, más iluminada que la sombra propiamente dicha, pero menos que el resto por eso se la denomina *penumbra*.

Las sombras, tal cual acabamos de obtenerlas, son las sombras *geométricas*; pero las físicas, es decir, las que realmente se observan, no se hallan tan rigurosamente limitadas. Nótese, en efecto, que cierta cantidad de luz pasa a la sombra, y que recíprocamente se observa sombra en la parte iluminada. Éste es el fenómeno que describiremos en breve con el nombre de *difracción*.

Cuando un cuerpo opaco intercepta la luz por una de sus caras, no está nunca completamente oscura la cara opuesta, y sí constantemente más o menos iluminada por la luz que reflejan los cuerpos inmediatos. Este efecto de reverberación se denomina *reflejo*. Como la luz que refleja un cuerpo colorado participa, en general, del color propio del mismo, resulta que los reflejos adquieren a su vez la tinta de los objetos próximos. Los pintores en sus cuadros, los decoradores de las habitaciones en la elección de ropajes, y las mujeres en los de sus galas, utilizan artísticamente los efectos de luz que presentan los reflejos.

419. Imágenes producidas por pequeños orificios. -Cuando se proyectan, en una pantalla blanca, los rayos luminosos que penetran en una cámara oscura *por un pequeño orificio*, se obtienen de los objetos exteriores, imágenes que ofrecen los fenómenos siguientes: 1.º el de presentarse invertidas; 2.º el de que su forma, que es siempre la de los objetos exteriores, sea independiente de la del orificio.

La inversión de las imágenes depende de que los rayos luminosos que proceden de los objetos exteriores y que penetran en la cámara oscura, se cruzan al pasar por el orificio ([fig. 255](#)). Como continúan propagándose en línea recta, los rayos que parten de los puntos más altos encuentran la pantalla en los bajos, y recíprocamente, los que proceden de abajo van a proyectarse en los puntos superiores de aquélla. De aquí la inversión de la imagen. En el artículo *Cámara oscura* manifestaremos cómo se aumenta el brillo y la claridad de las imágenes por medio de vidrios convergentes, y qué medios se emplean para darles su verdadera posición.

Para demostrar que la forma de la imagen no depende de la de la abertura, cuando ésta es suficientemente pequeña y se halla a una distancia conveniente de la pantalla, supongamos una abertura triangular O ([fig. 256](#)) practicada en la pared de una cámara oscura, una pantalla *ab*, sobre la cual se recibe la imagen de una llama AB situada en el exterior. De cada punto de la llama penetra en la cámara un haz de luz divergente, que forma en la pantalla una imagen triangular, semejante a la abertura. La reunión de todas estas imágenes parciales produce una total de la misma forma que el objeto luminoso. En efecto, si concebimos que una recta indefinida se mueva en la abertura que suponemos muy pequeña, con la condición de que permanezca siempre tangente al objeto luminoso AB, se puede admitir que describe en su movimiento dos conos cuyos vértices están en el orificio mismo de la cámara, y las bases respectivamente, la del uno, en el cuerpo luminoso, y la del otro, en la parte iluminada de la pantalla, o sea la imagen. Por lo tanto, si la pantalla es perpendicular a la recta que une el centro de la abertura con el del cuerpo luminoso, es semejante a éste la imagen; pero si está aquélla oblicua, se presenta prolongada la

imagen en el sentido de la oblicuidad. Tal es lo que se observa, por ejemplo, en la sombra que da el ramaje de los árboles, pues los haces luminosos que pasan al través de las hojas, ofrecen imágenes del sol, que son redondas o elípticas, según sea el suelo sobre el cual se proyectan perpendicular u oblicuo a los rayos solares, cualquiera que sea, por otra parte, la forma de los intervalos que dejan entre sí las hojas, para el paso de la luz.

420. Velocidad de la luz. -La luz se propaga con tal velocidad que es imposible, en la superficie de la tierra, hallar un intervalo apreciable para medirla, por mucha distancia que medie, entre el momento en que se produce un fenómeno luminoso, y aquél en el cual lo percibe la vista; por lo tanto, ha sido preciso determinar dicha velocidad por medio de observaciones astronómicas. El astrónomo danés Roemer fue el primero que, en 1675, dedujo la velocidad de la luz, observando los eclipses del primer satélite de Júpiter.

Sabemos, en efecto, que Júpiter es un planeta alrededor del cual giran rápidamente cuatro satélites de igual manera que da vueltas la luna alrededor de la tierra. Su primer satélite E ([fig. 257](#)) tiene sus inmersiones, o entra en la sombra proyectada por Júpiter J, a intervalos de tiempos iguales que valen  $42^{\text{h}} 28^{\text{m}} 36^{\text{s}}$ . Mientras la tierra T se encuentra en la parte *ab* de su órbita, es decir, sensiblemente a la misma distancia de Júpiter, se nota que son constantes los intervalos entre dos inmersiones consecutivas; pero a medida que se aleja de él dando vueltas alrededor del sol S, crece el intervalo entre dos inmersiones, y al transcurrir seis meses, cuando ha pasado la tierra de la posición T a la T', se observa un retraso total de  $16^{\text{m}} 36^{\text{s}}$  entre el instante en que aparece el fenómeno y aquél en que, según el cálculo, se ha efectuado en realidad. Cuando la tierra se encontraba en T, para llegar a ella la luz solar, reflejada por el satélite E, tenía que recorrer la distancia ET, mientras que en la segunda posición T' ha de recorrer la ET', superior a la anterior en la cantidad TT', supuesto que los rayos ET y ET' pueden considerarse como paralelos, atendida la distancia del satélite E. Preciso es, pues, que tarde la luz  $16^{\text{m}} 36^{\text{s}}$  en recorrer el diámetro TT' de la órbita terrestre, es decir, el doble de la distancia que media desde la tierra al sol; de suerte que, en virtud de este dato, la velocidad por segundo viene a ser de unas 77,000 leguas de 4,000 metros.

Las estrellas más próximas a la tierra se encuentran por lo menos a una distancia 206,265 veces mayor que la que nos separa del sol, y por consiguiente, la luz que proyectan tarda más de 3 años y 3 meses en llegar hasta nosotros. Por lo que hace a las estrellas que no son visibles sino por medio del telescopio, se encuentran a tal distancia de la tierra, que se requieren millares de años para que llegue la luz hasta nuestro sistema planetario, de suerte que pueden haber transcurrido muchos siglos desde su desaparición, sin dejar de verlas y de estudiar sus movimientos.

421. Aparato de M. Foucault para medir la velocidad de la luz. -A pesar de la prodigiosa velocidad de la luz, ha conseguido M. Foucault determinarla experimentalmente, por medio de un ingenioso aparato fundado en el uso del espejo giratorio, adoptado ya por M. Wheatstone para medir la velocidad de la electricidad.

Antes de describir este aparato, indicaremos que lo que vamos a exponer, supone que nos son conocidas las propiedades de los espejos y, de las lentes (436 y 464). La [figura 258](#) representa, en plano horizontal, las principales disposiciones del aparato de M. Foucault. La pared K de una cámara oscura posee un orificio cuadrado, detrás del cual se halla tenso verticalmente un alambre fino de platino *o*. Un haz de luz solar, reflejado exteriormente sobre un espejo, penetra en la cámara por el orificio cuadrado, encuentra el alambre de platino, y de aquí se dirige a una lente acromática L, de largo foco, situada a una distancia del alambre, menor que el doble de la principal distancia focal. La imagen del alambre de platino tiende entonces a formarse sobre el eje de la lente, con dimensiones más o menos amplificadas. Pero el haz luminoso, después de haber atravesado la lente, encuentra un espejo plano *m*, que gira con gran velocidad, sobre el cual se refleja, y forma en el espacio una imagen del alambre de platino, que se va moviendo con una velocidad angular doble de la del espejo<sup>(3)</sup>. Esta imagen es reflejada por un espejo M, cóncavo y fijo, cuyo centro de curvatura coincide con el eje de rotación del espejo giratorio *m* y con su centro de figura. El haz reflejado sobre el espejo M, retrocede sobre sí mismo, se refleja de nuevo en el espejo *m*, cruza por segunda vez la lente, y va a formar una imagen del alambre de platino que aparece sobre este mismo alambre mientras el espejo *m* gira con lentitud.

A fin de ver esta imagen sin interceptar el haz que entra por el orificio K, se coloca una lámina de vidrio V, de caras paralelas, entre la lente y el alambre de platino, y se le inclina de manera que los rayos reflejados vayan a caer sobre un poderoso ocular P.

Sentado esto, si está en reposo el espejo  $m$ , o si gira con escasa velocidad, el rayo de retorno  $Mm$  encuentra al espejo  $m$  en la misma posición que tenía en el momento la primera reflexión; recobra, pues, la misma dirección que la siguió, encuentra en  $a$  el espejo  $V$ , se refleja en él parcialmente, y va a formar en  $d$  a una distancia  $ad$ , igual a  $ao$ , la imagen que observa el ojo con el ocular  $P$ . Al girar, hace desaparecer el espejo  $m$  dicha imagen, y si es uniforme su velocidad de rotación, queda inmóvil esta imagen en el espacio. Para velocidades que no pasen de 30 vueltas por segundo, son distintas las apariciones sucesivas; pero respecto a un número superior a 30 revoluciones, persisten las impresiones en el ojo, y aparece absolutamente tranquila la imagen.

Por último, si el espejo  $m$  gira con suficiente velocidad, muda sensiblemente de posición mientras la luz recorre el doble trayecto de  $m$  a  $M$  y de  $M$  a  $m$ ; el rayo de retorno, después de su reflexión en  $m$ , acepta la dirección  $mb$ , y va a formar su imagen en  $i$ , es decir, que la desviación total de ésta es  $di$ . Rigurosamente hablando, hay desviación apenas gira el espejo, aunque sea con lentitud, pero no es apreciable hasta que adquiere cierta magnitud, lo cual exige una velocidad de rotación bastante rápida, o una distancia  $Mm$  suficientemente grande, porque la desviación crece por precisión, como el tiempo que tarda la luz en volver sobre sí misma.

En el experimento de M. Foucault, la distancia  $Mm$  sólo fue de 4 metros, y dando entonces al espejo  $m$  una velocidad de 600 a 800 vueltas por segundo, se obtuvieron desviaciones de 2 a 3 décimos de milímetro.

Suponiendo que  $Mm=l$ ,  $Lm=l'$ ,  $oL=r$ , y representando por  $n$  el número de vueltas por segundo, por  $d$  la desviación absoluta  $di$ , y por  $V$  la velocidad de la luz, obtuvo M. Foucault, la fórmula  $V=8 p l'nr/d(l+l')$ .

El aparato de M. Foucault permite actuar igualmente sobre los líquidos. Se interpone, al efecto, un tubo  $AB$  de 3 metros de longitud y lleno de agua destilada, entre el espejo giratorio  $m$  otro cóncavo  $mM'$  idéntico al  $M$ . Los rayos luminosos reflejados por el  $m$  en la dirección  $mM'$  atraviesan dos veces la columna de agua  $AB$  antes de volver sobre el espejo  $V$ . El rayo de retorno acaba de reflejarse entonces en  $c$ , y de dar su imagen en  $A$ , y la desviación es, por lo tanto, mayor para los rayos que han atravesado el agua, que para los que se han propagado sólo por el aire, lo cual indica que la velocidad de la luz es menor en el agua que en el aire.

Esta consecuencia es la parte interesante del experimento de M. Foucault. En efecto, habiendo patentizado la teoría que, en el sistema de las ondulaciones, es menor la velocidad de la luz en el medio más refringente, mientras que se verifica lo contrario en el de la emisión, el resultado que M. Foucault obtuvo, demuestra que el sistema que debe adoptarse exclusivamente, ha de ser el de las ondulaciones.

Por lo que hace al mecanismo de que se vale M. Foucault para comunicar una gran velocidad al espejo giratorio, consiste en una pequeña turbina de vapor, algo parecida a la sirena, y que, como ésta, produce un sonido, tanto más agudo, cuanto más rápida es la rotación. De la agudeza del sonido se deduce la velocidad de rotación.

422. Leyes de la intensidad de la luz. -Tomando como *intensidad* de una luz la cantidad que recibe la unidad de superficie de un cuerpo iluminado, esta intensidad se halla sometida a las dos leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *La intensidad de la luz, en una superficie dada, se encuentra en razón inversa del cuadrado de la distancia al foco luminoso.*

2.<sup>a</sup> *La intensidad de la luz recibida oblicuamente es proporcional al coseno del ángulo que forman los rayos luminosos con la normal a la superficie iluminada.*

Para demostrar la primera ley, consideremos dos pantallas circulares  $CD$  y  $AB$  ([fig. 260](#)), colocadas, una a cierta distancia del manantial luminoso  $L$ , y la otra a una distancia dupla, y representemos por  $sS$  las superficies de estas dos pantallas. Expresando por  $a$  la cantidad total de luz emitida por el manantial, según el cono  $ALB$ , la intensidad de la luz sobre la pantalla  $CD$ , es decir, la cantidad de luz que se proyecta sobre la unidad de superficie es  $a/s$ ; asimismo la intensidad sobre la pantalla  $AB$ , es  $a/S$ . Pero por efecto de la semejanza de los triángulos  $ALB$  y  $CLD$ , el diámetro  $AB$  es duplo de  $CD$ ; por consiguiente, siendo entre sí las superficies de los círculos como el cuadrado de los diámetros, la

superficie S es cuatro veces mayor que la s. Luego la intensidad  $a/S$  es cuatro veces menor que  $a/s$  que es lo que queríamos demostrar.

Todavía se puede demostrar experimentalmente la primera ley con el auxilio del aparato representado en la [figura 262](#). Comparando, para esto, las sombras proyectadas sobre cristal deslustrado por una varilla opaca, estando por una parte iluminada por una sola bujía, y por otra por cuatro, colocadas a una distancia dupla de la primera; se encuentra así, que las dos sombras originadas tienen la misma intensidad, lo cual demuestra la ley en cuestión.

La [figura 260](#) manifiesta que la causa de que la intensidad luminosa esté en razón inversa del cuadrado de la distancia, es la divergencia de los rayos luminosos emitidos desde un mismo manantial. Para rayos luminosos paralelos, la intensidad permanece constante, en el vacío al menos, porque en el aire y en los demás medios transparentes la intensidad de la luz decrece por un efecto de absorción (480), aunque con mucha más lentitud que el cuadrado de la distancia.

El cálculo comprueba la segunda ley. Sea, en efecto, un haz de rayos paralelos DA, EB ([fig. 261](#)), que caen oblicuamente sobre una superficie AB, y sea *om* la normal a esta superficie. Representando por S la sección recta del haz, por *a* la cantidad total del haz de luz proyectada sobre la superficie AB, y por I la que cae sobre la unidad de superficie; es decir, la intensidad de la luz, en tal supuesto tendremos:  $I = a/AB$  [1]. Pero como S no es más que la proyección de AB sobre un plano perpendicular al haz, deducimos, según nos demuestra la trigonometría, que  $S = AB \cos a$ ; obteniéndose de aquí  $AB = S/\cos a$ . Sustituyendo este valor de AB en la igualdad [1], tendremos que  $I = a/S \cos a$  [2], fórmula que demuestra la *ley del coseno*, porque *a* y S, siendo cantidades constantes, I varía proporcionalmente al *cos a*.

La ley del coseno se aplica igualmente a los rayos emitidos oblicuamente por una superficie luminosa; es decir, que los rayos son de una intensidad tanto menor, cuanto mayor es su inclinación respecto a la superficie que los emite, hecho que se relaciona con la 3.<sup>a</sup> ley del calorífico radiante (361).

423. Fotómetros. -Denominanse *fotómetros* unos aparatos adecuados para comparar las intensidades relativas de dos luces. Varios son los sistemas que se han imaginado, pero todos dejan mucho que desear respecto a su precisión.

*Fotómetro de Rumford.* -El fotómetro de Rumford consta de una pantalla de vidrio deslustrado, delante de la cual se fija una varilla opaca *m* ([fig. 262](#)). A cierta distancia se sitúan las luces que quieren compararse, como por ejemplo, un quinqué y una vela, de manera que cada una proyecte sobre la pantalla una sombra de la varilla. Las sombras proyectadas de esta suerte, son en un principio de una intensidad desigual; pero separando o acercando gradualmente la lámpara, se obtiene una posición, respecto a la cual la intensidad de las dos sombras *a* y *b* es idéntica, lo cual manifiesta que la pantalla se halla igualmente iluminada por las dos luces. En tal caso las intensidades de éstas son directamente proporcionales a los cuadrados de sus distancias a las sombras proyectadas; es decir, que si el quinqué está, por ejemplo, 3 veces más distante que la vela, debe iluminar 9 veces más.

Efectivamente, sean *i* e *i'* las intensidades del quinqué y de la vela respecto a la unidad de distancia, y *d* y *d'* sus distancias respectivas a las sombras proyectadas. En virtud de la primera ley de la intensidad de la luz (422), la del quinqué a la distancia *d* es  $i/d^2$  y la de la vela  $i'/d'^2$  a la distancia *d'*. Estas dos intensidades son iguales en la pantalla, de suerte que se tiene la igualdad  $i/d^2 = i'/d'^2$ , de donde  $i/i' = d'^2/d^2$ , que es lo que se debía demostrar.

*Fotómetro de M. Foucault.* -Este físico ha perfeccionado el fotómetro de Rumford, observando, en lugar de las sombras proyectadas por un cuerpo opaco, interpuesto entre la pantalla y las luces que se comparan, un brillo directo sobre una pantalla de papel almidonado, del cual cada una de sus mitades se halla iluminada respectivamente por una de las luces. A este fin la pantalla de papel constituye la pared anterior de una cajita de madera, semejante a la del daguerrotipo, en la cual existe un tabique opaco, perpendicular a la pantalla que separa los dos haces proyectados por las luces; además, el tabique es movable, utilizándose un piñón, que engrana con una cremallera para originar su adelanto o su retroceso, hasta tanto que los dos brillos sobre el papel almidonado lleguen a ser tangentes en el sentido vertical. Sentado esto, sólo tendrá que alejarse o aproximarse una de las dos luces, para que, vistas transparentemente, presenten el mismo brillo.

El fotómetro de Rumford y todos los que se basan sobre el mismo principio, ofrecen el inconveniente de que las dos luces que se comparan no poseen el mismo matiz, siendo, por ejemplo, el de una de ellas amarillo, y azulado, el de la otra, lo cual dificulta muchísimo la comparación de sus intensidades. Sin embargo, cuando la diferencia de los matices no es muy distinta, ha notado M. Foucault que observando la pantalla algunos momentos, con los ojos entrecerrados, llega una ocasión en que al parecer las dos mitades de la pantalla poseen el mismo matiz.

*Fotómetro de M. Govi.* -Últimamente ha propuesto en Florencia M. Govi, para corregir el inconveniente que acabamos de señalar, un nuevo fotómetro que ha denominado *fotómetro analizador*, y en el cual sólo se verifica la comparación entre rayos de una misma refrangibilidad. Para conseguir este resultado, los haces producidos por las luces que se han de comparar, antes de proyectarse sobre un vidrio sin pulimento, o sobre una pantalla de papel almidonado, cruzan un prisma que los descompone; de suerte, que sobre la pantalla se forman dos espectros de igual longitud y tangentes por sus bordes, comparándole después entre sí las partes del mismo matiz, en los dos espectros.

*Fotómetro de Wheatstone.* -La pieza más importante de este fotómetro es una esfera bruñida de acero P ([fig. 263](#)), montada sobre el borde de un disco de corcho, sostenido por un piñón o que engrana interiormente con una rueda de mayor diámetro. Ésta se fija en una pequeña caja cilíndrica de cobre que se tiene con una mano, mientras que con la otra se hace girar un manubrio A que trasmite el movimiento, a un eje central y al piñón o. Entonces gira éste siguiendo el contorno interior de la rueda mayor, al mismo tiempo que sobre sí mismo; la esfera participa de este doble movimiento y describe una curva en forma de rosetón ([fig. 264](#)).

Tratemos de comparar la intensidad de dos luces M y N. Se coloca entre ellas el fotómetro, se le hace girar rápidamente, y los puntos brillantes que producen la reflexión de las dos luces sobre dos puntos opuestos de la esfera, dan origen entonces a dos fajas luminosas dispuestas conforme se ve en la figura 264. Si una de ellas es más intensa que la otra, como por ejemplo, la que procede de la luz M, se acerca el instrumento a la otra luz, hasta que ambas fajas ofrezcan el mismo brillo. Midiendo entonces la distancia del fotómetro a cada una de las dos luces, sus intensidades son proporcionales a los cuadrados de las distancias.

▽△

## Capítulo II

▽△

### Reflexión de la luz, espejos

424. Leyes de la reflexión de la luz. -Cuando un rayo luminoso encuentra una superficie pulimentada, se refleja siguiendo las mismas leyes que el calórico:

- 1.<sup>a</sup> *El ángulo de reflexión es igual al de incidencia.*
- 2.<sup>a</sup> *El rayo incidente y el reflejado están en un mismo plano perpendicular a la superficie reflejante.*

Las palabras *rayo incidente*, *rayo reflejado*, *ángulo de incidencia* y *ángulo de reflexión* se toman en el mismo sentido que en el párrafo 364, por lo cual es inútil su definición.

1.<sup>a</sup> *Demostración.* -Las dos leyes anteriores se demuestran por medio de un círculo graduado ([fig. 265](#)) cuyo plano es vertical. Dos reglas de cobre, móviles alrededor del centro, poseen una de ellas la pantalla de vidrio deslustrado P, la otra, una pieza opaca N agujereada en su centro. En la extremidad de esta última regla existe un espejo M que se puede inclinar más o menos, permaneciendo siempre perpendicular al plano del círculo graduado. Finalmente, en el centro de este último hay un espejito plano *m* de metal, que le es exactamente perpendicular.

Al efectuar el experimento, se recibe un haz de luz solar  $S$  sobre el espejo  $M$ , que se inclina de manera que la luz reflejada pase al través de la pantalla  $N$  y caiga en el centro del espejo  $m$ . El haz luminoso experimenta allí una segunda reflexión, y acepta una dirección  $mP$ , que se determina haciendo avanzar el vidrio  $P$  hasta que la imagen de la abertura  $N$  vaya a formarse en el centro. El limbo marca entonces los números de grados comprendidos en los arcos  $AN$  y  $AP$ , y se nota que son iguales estos números, lo cual demuestra que el ángulo de reflexión  $AmP$  es igual al de incidencia  $AmM$ .

Queda demostrada la segunda ley por la disposición misma del aparato, supuesto que el plano de los rayos  $mM$  y  $mP$  es paralelo al plano del círculo graduado, y de consiguiente, perpendicular al espejo  $m$ .

2.<sup>a</sup> *Demostración.* -También se puede demostrar la ley de la reflexión de la luz por el siguiente experimento, que ofrece mayor precisión que el anterior, pero que es más difícil de repetir en una clase. Dispónese verticalmente un círculo graduado  $M$  (fig. 266), en cuyo centro existe un anteojo móvil según un plano paralelo al limbo; luego se coloca, a una distancia conveniente, un vasito lleno de mercurio, para que haga las veces de un espejo plano perfectamente horizontal. Dispuesto esto, se dirige por el anteojo una visual  $AE$  a una estrella notable de primera o de segunda magnitud; después se inclina el anteojo, de manera que pueda recibir un rayo  $AD$ , procedente de la misma estrella, después de haberse reflejado en  $D$  sobre la superficie brillante del mercurio. Hecho esto, se nota que los dos ángulos formados por los rayos  $EA$  y  $DA$  con la horizontal  $AH$ , son iguales; de donde se deduce fácilmente que el ángulo de incidencia  $E'DE$  es igual al de reflexión  $EDA$ . En efecto, si se tira la perpendicular  $DE$  a  $AH$ , el triángulo  $AED$  es isósceles, y los ángulos  $ADE$  y  $AED$  son iguales; pero los dos rayos luminosos  $AE$  y  $DE'$ , siendo paralelos a causa de la gran distancia de la estrella, los ángulos  $AED$  y  $EDE'$  serán iguales como alternos internos, y por consiguiente,  $EDE' = EDA$ , que es lo que se quería demostrar.

▽△

## Reflexión de la luz sobre las superficies planas

425. Espejos, imágenes. -Llámanse *espejos* unos cuerpos de superficie pulimentada, de metal o de vidrio, que ofrecen por reflexión los objetos que se les presentan. El sitio en que estos objetos aparecen es su *imagen*.

Según su forma, se dividen los espejos en *planos*, *cóncavos*, *convexos*, *esféricos*, *parabólicos*, *cónicos*, etc.

426. Formación de las imágenes en los espejos planos. -La determinación de la posición y del tamaño de las imágenes se reduce siempre a la investigación de las imágenes de una serie de puntos. Sea, por lo tanto, en primer lugar, un punto único  $A$  situado delante de un espejo plano  $MN$  (fig. 267), y  $AB$  un rayo cualquiera que parta de dicho punto, y que encuentre al espejo, se reflejará en la dirección  $BO$ , formando el ángulo de reflexión  $DBO$  igual al de incidencia  $ABD$ .

Si se baja desde  $A$  una perpendicular  $AN$  sobre el espejo, y si se prolonga al rayo  $OB$  por debajo del espejo basta que encuentre a dicha perpendicular en un punto  $a$ , se forman dos triángulos  $ABN$  y  $BNa$  que son iguales, porque tienen un lado común  $BN$ , comprendido entre dos ángulos iguales, a saber: los  $ANB$  y  $BNa$  que son rectos, y los  $ABN$  y  $NBa$ , iguales entre sí, pues ambos lo son al  $OBM$ .

De la igualdad de estos triángulos resulta que  $aN$  es igual a  $AN$ , es decir, que un rayo cualquiera  $AB$  acepta, después de la reflexión, una dirección tal que, prolongándole por debajo del espejo, va a cortar a la perpendicular  $Aa$ , en un punto  $a$ , situado precisamente a la misma distancia del espejo que el  $A$ . Pero esta propiedad no es peculiar del rayo  $AB$ , sino que se aplica a cualquiera otro  $AC$  que parta de  $A$ . Dedúcese de aquí la consecuencia importante, de que todos los rayos emitidos por el punto  $A$  y reflejados sobre el espejo, *siguen, después de su reflexión, la misma dirección que si hubiesen partido todos del punto  $a$* . Por ser así se engaña la vista, que cree ver el punto  $A$  en  $a$ , como si realmente existiese. De consiguiente, en los espejos planos, *la imagen de un punto se forma detrás del espejo, a una distancia igual a la del punto dado, y sobre la perpendicular bajada de este punto al espejo.*

Es evidente que se obtendrá la imagen de un objeto cualquiera construyendo, según la regla anterior, la imagen de cada uno de sus puntos, o por lo menos la de los que basten para determinar su posición y su forma. La [fig. 268](#) manifiesta la construcción que hay que hacer para obtener la imagen *ab* de un objeto cualquiera AB.

De esta construcción se deduce inmediatamente que, en los espejos planos, *la imagen es del mismo tamaño que el objeto*, porque si se coloca el trapecio ABCD sobre el DCab, se ve con la mayor facilidad que coinciden, y que el objeto AB se confunde con su imagen.

Dedúcese igualmente de la citada construcción que, en los espejos planos, *la imagen es simétrica con el objeto*, y no invertida, dando a la palabra simétrica el mismo valor que en geometría, en cuya ciencia se dice que dos puntos son simétricos con relación a un plano, cuando se hallan situados en una misma perpendicular a este plano y cada uno, a igual distancia de cada lado del plano; condiciones que satisfacen sucesivamente todos los puntos del objeto AB y de su imagen en la [fig. 268](#).

427. Imágenes virtuales o imágenes reales. En la dirección de los rayos reflejados por los espejos, hay que distinguir dos casos, pues aquéllos pueden ser divergentes o convergentes, después de reflejarse. En el primer caso no se encuentran los rayos reflejados; pero si se considera que se prolongan por el otro lado del espejo, concurren en un punto ([fig. 267](#) y [268](#)). Afectado el ojo cual si partiesen de este punto los rayos, ve en él una imagen, que no deja de ser una ilusión, pues en realidad no existe, porque los rayos luminosos no pasan al otro lado del espejo. De aquí proviene el nombre de *imagen virtual*, es decir, que tiende a producirse, pero que no se forma en realidad. Tales son siempre las imágenes que ofrecen los espejos planos.

En el segundo caso, en el cual los rayos reflejados son convergentes, como veremos en breve en los espejos cóncavos, dichos rayos concurren hacia un punto situado delante del espejo y en el lado mismo en que se encuentra el objeto. Allí forman una imagen que se denomina *imagen real*, para expresar que realmente existe, pues puede recibírsela sobre una pantalla y obrar químicamente sobre ciertas sustancias. En resumen, puede decirse que *las imágenes reales son las que forman los mismos rayos reflejados, y las imágenes virtuales, las que originan sus prolongaciones*.

428. Imágenes múltiples en los espejos de vidrio. -Los espejos metálicos sólo ofrecen una superficie reflejante, y, por lo mismo, no dan más que una imagen, pero no sucede lo mismo en los de vidrio, porque producen muchas que se observan con facilidad mirando oblicuamente en un espejo, la imagen de una vela. Vese una primera imagen poco intensa, luego una segunda muy visible, y detrás de ésta otras muchas cuya intensidad decrece sucesivamente hasta que llegue a anularse.

Explícase este fenómeno por las dos superficies reflejantes que presentan los espejos de vidrio. Cuando los rayos luminosos encuentran la primera superficie, una parte de ellos se refleja dando la imagen *a* ([fig. 269](#)), formada por la prolongación de los rayos *bE* reflejados por esta superficie; y el resto de los rayos penetra en el vidrio, se refleja en *c* sobre la capa del estaño amalgamado que cubre la cara posterior del espejo, y vuelve al ojo en la dirección *dH*, dando la imagen *a'*. Ésta, que dista de la primera el doble del espesor del espejo, es más intensa, porque la capa metálica refleja más que el vidrio. En cuanto a las otras imágenes, son cada vez más débiles, porque los rayos que las originan no emergen sino después de una serie de reflexiones sucesivas sobre las dos caras interiores del espejo.

Como esta multiplicidad de imágenes perjudicaría la observación, en muchos instrumentos de óptica, se da la preferencia al empleo de los espejos metálicos.

429. Imágenes múltiples sobre dos espejos planos. -Cuando un objeto se halla situado entre dos espejos que forman un ángulo recto o agudo, da varias imágenes cuyo número aumenta con la inclinación de los espejos. Si el uno es perpendicular al otro, se ven tres imágenes ([fig. 270](#)). Los rayos *O'C* y *O'D*, que parten del punto *O*, dan, después de una sola reflexión, el uno la imagen *O'*, y el otro la *O''*, y el rayo *OA*, que ha sufrido dos reflexiones en *A* y en *B*, produce la tercera imagen *O'''*.

Cuando el ángulo de los espejos es de 60 grados, surgen 5 imágenes; y si es de 45 grados, 7 imágenes. El número de éstas continúa creciendo así a medida que disminuye el ángulo del espejo; y cuando es nulo, es decir, en el caso de ser paralelos los espejos, el número de las imágenes es teóricamente infinito. Proviene

esta multiplicidad de imágenes, de que los rayos luminosos sufren sucesivamente de un espejo a otro, un número creciente de reflexiones.

En la propiedad de los espejos inclinados se funda el *kaleidóscopo*, que consta de un tubo de cartón con dos espejos inclinados entre sí según 45 grados, o bien con tres espejos inclinados según un ángulo de 60 grados. Situando en su extremo objetos muy irregulares, como musgo, oropel, encaje, etc., entre dos discos de vidrio, siendo el exterior deslustrado, al mirar por el otro extremo, se ven estos objetos y sus imágenes simétricamente dispuestas, constituyendo un conjunto muy variado, y a menudo muy agradable.

430. Reflexión irregular. -La reflexión que se efectúa en la superficie de los cuerpos pulimentados, siguiendo las dos leyes anteriormente enunciadas (424), se designa con el nombre de *reflexión regular* o de *reflexión especular*; pero esta cantidad de luz reflejada, dista mucho de representar toda la incidente. Ésta, cuando es opaco el cuerpo reflejante, se divide realmente en tres partes, a saber: una que se refleja con regularidad, otra *irregularmente*, y la tercera que se pierde, absorbida por el cuerpo reflejante, como el calórico que se hace latente en los cambios de estado. Si el cuerpo que recibe los rayos incidentes es transparente, existe además una cuarta fracción de luz que se trasmite al través de aquél.

La luz reflejada irregularmente se designa con el nombre de *luz difusa*, y es la que nos hace ver los cuerpos. En efecto, la que lo efectúa con regularidad, no da la imagen del cuerpo que la refleja, sino la del que la emite. Por ejemplo, si se proyecta en una cámara oscura un haz de luz solar sobre un espejo bien pulimentado, cuanto mayor sea la regularidad con la cual refleje esta luz, tanto menos visible será en las diversas partes del recinto; porque la vista que en este caso recibe el haz reflejado, no ve al espejo, sino tan sólo la imagen del sol. Disminúyase en cambio el poder reflector del espejo derramando en su superficie polvo muy fino, y se aumentará la cantidad de luz difusa, debilitándose la imagen solar, siendo visible el espejo desde todas las partes del recinto.

431. Intensidad de la luz reflejada. -Para cuerpos de igual naturaleza, la intensidad de la luz reflejada regularmente, crece con el grado de pulimento y con el ángulo que los rayos incidentes forman con la normal a la superficie reflejante. Por ejemplo, si se mira muy oblicuamente un pliego de papel blanco situado delante de una vela, se ve por reflexión una imagen de la llama, lo cual no se verifica cuando recibe la vista rayos menos oblicuos.

Para cuerpos de diferente naturaleza, pulimentados con igual cuidado, siendo constante el ángulo de incidencia, varía la intensidad con la sustancia, y también con el medio en que se halla sumergido el cuerpo reflejante. Por ejemplo, el vidrio pulimentado, introducido en el agua, pierde parte de su poder reflejante.

▽△

## Reflexión de la luz sobre las superficies curvas

432. Espejos esféricos. -Se ha visto ya (425) que existen muchas especies de espejos curvos; pero los de uso más frecuente son los esféricos y los parabólicos.

Denomínanse *espejos esféricos* aquéllos cuya curvatura es la de una esfera, pudiéndose suponer su superficie engendrada por la revolución de un arco MN ([fig. 271](#)), que gira alrededor del radio CA que une la parte media del arco con su centro. Según se efectúe la reflexión en la cara interna o en la externa del espejo, así se dice que éste es *cóncavo* o *convexo*. El centro C de la esfera hueca de que forma parte el espejo, es el *centro de curvatura* o el *centro geométrico*, y el punto A, el *centro de figura*. La recta indefinida AL, tirada por los centros A y C, es el *eje principal* del espejo; y cualquiera recta que pase por C, mas no por A, es un *eje secundario*. El ángulo MCN, formado por la unión del centro con los bordes del espejo es su *apertura*. Denomínase, por fin, *sección principal* o *sección meridiana* de un espejo, la que se obtiene cortándole por un plano que pase por el eje principal. Sólo hablaremos nosotros de las líneas situadas en una misma sección principal de los espejos.

La teoría de la reflexión de la luz sobre los espejos curvos se deduce muy sencillamente de las leyes de la reflexión sobre los planos, considerando la superficie de los primeros como formada por una infinidad de superficies planas infinitamente pequeñas, que son sus *elementos*. La *normal* a la superficie curva, en un punto dado, es entonces la perpendicular al elemento correspondiente, o, lo que es igual, al plano tangente que lo contiene. Demuéstrase en geometría que, en las esferas, todas las normales pasan por el centro de curvatura, lo cual permite trazar fácilmente la normal en un punto cualquiera de un espejo esférico.

433. Focos de los espejos esféricos cóncavos. -En los espejos curvos, reciben el nombre de *focos*, los puntos a los cuales concurren los rayos reflejados o sus prolongaciones. Existen, pues, dos clases de focos: focos reales y focos virtuales.

*Focos reales.* -Consideremos desde luego el caso en el cual sean los rayos luminosos paralelos al eje principal, lo cual supone el cuerpo luminoso situado a una distancia infinita, y sea GD uno de estos rayos ([fig. 271](#)). Según la hipótesis emitida anteriormente, respecto a considerar los espejos curvos como formados por una serie de elementos planos infinitamente pequeños, el rayo GD se refleja sobre el elemento que corresponde al punto D, según las leyes de reflexión sobre los espejos planos (424); es decir, que siendo CD la normal al punto de incidencia D, el ángulo de reflexión CDF es igual al de incidencia GDC, y se encuentra en la misma sección meridiana. Fácil es deducir de aquí que el punto F, donde el rayo reflejado encuentra el eje principal, divide muy aproximadamente el radio de curvatura AC en dos partes iguales. En efecto, en el triángulo DFC, los lados DF y CF son iguales por ser opuestos a ángulos iguales, porque los ángulos DCF y FDC, son los dos iguales al CDG; el primero como alterno interno, y el segundo por las leyes de la reflexión. Por otra parte, FD se acerca tanto más a ser igual a FA cuanto menor es el arco AD. Podemos considerar, pues, cuando consta este arco de un corto número de grados, las rectas AF y FC como sensiblemente iguales, y el punto F como el medio de AC. Mientras no pase de 8 a 10 grados la abertura MCN del espejo, cualquiera otro radio HB paralelo al eje, va de esta suerte, después de la reflexión, a pasar muy aproximadamente por el punto F. Vemos, pues, que cuando un haz de rayos paralelos se proyecta sobre un espacio cóncavo, todos estos radios después de la reflexión, van a concurrir sensiblemente a un mismo punto situado a igual distancia del centro de curvatura y del espejo. Este punto notable es el *foco principal* del espejo, y la distancia FA, es la *distancia focal principal*.

Como todos los rayos paralelos al eje van a concurrir sensiblemente a un mismo punto F, conviene observar que, recíprocamente, si se coloca en F un objeto luminoso, los rayos emitidos toman después de la reflexión las direcciones DG, BH..., paralelas al eje principal, porque entonces, los ángulos de reflexión pasan a ser de incidencia, y vice-versa, pero permaneciendo siempre iguales.

Supongamos ahora el caso en que los rayos luminosos que caen sobre el espejo son emitidos por un punto L ([fig. 272](#)), situado sobre el eje principal, y a una distancia tal, que no sean paralelos, sino divergentes, los rayos incidentes. El rayo incidente LK forma entonces con la normal CK un ángulo de incidencia LKC, menor que el SKC, que constituye con la misma normal el rayo SK, paralelo al eje, y por lo mismo, el ángulo de reflexión correspondiente al rayo LK, deberá ser también menor que el CKF que corresponde al SK. El rayo LK tiene que encontrar, pues, después de la reflexión, el eje en el punto *l*, situado entre el centro C y el foco principal F. Mientras no excede de un corto número de grados la abertura del espejo, todos los rayos emitidos del punto L van, después de reflejados, a concurrir sensiblemente al mismo punto *l*, que es el que se denomina *foco conjugado*, para indicar el enlace que media entre los puntos L y *l*, enlace tal, que son recíprocos entre sí, es decir, que si se trasportase a *l* el punto luminoso, su foco conjugado estaría en L, y entonces sería *lK* el rayo incidente, y *KL*, el reflejado.

Por la inspección de la [figura 272](#) se reconoce fácilmente que, cuando el objeto L se acerca o se aleja del centro C, su foco conjugado efectúa lo mismo con él, porque crecen o decrecen a un tiempo los ángulos de incidencia y de reflexión.

Si el objeto L va a coincidir con el centro C, es nulo el ángulo de incidencia, y como debe sucederle otro tanto al de reflexión, vuelve sobre sí mismo el rayo reflejado, y el foco coincide con el objeto. Si el cuerpo luminoso pasa más allá del centro C, entre este punto y el foco principal, el conjugado pasa a su vez al otro lado del centro, y se aleja de él a medida que el punto luminoso se acerca al foco principal. Por fin, cuando coincide aquél con este, los rayos paralelos no se encuentran, por ser paralelos al eje, y de consiguiente, no hay foco.

*Focos virtuales.* - Pasemos a considerar finalmente, el caso en que el objeto se halla en L ([fig. 273](#)), entre el foco principal y el espejo. Un rayo cualquiera LM, emitido desde L, forma entonces con la normal CM un ángulo de incidencia LMC, mayor que FMC, y el de reflexión debe ser también mayor que el CMS. Síguese de aquí, que el rayo reflejado ME es divergente con relación al eje AK. Como sucede lo propio con todos los rayos emitidos desde el punto L, estos rayos no se encuentran, y no forman, por lo tanto, foco conjugado; pero, si se les supone prolongados por el otro lado del espejo, irán a concurrir sus prolongaciones sensiblemente en un mismo punto *l*, situado sobre el eje; de suerte que el ojo que los recibe, experimenta la misma impresión que si hubiesen sido emitidos aquellos rayos desde el punto *l*. Prodúcese, pues, en este punto un foco virtual enteramente análogo al que presentan los espejos planos (427).

Obsérvese, en los diferentes casos que acabamos de considerar, que es constante la posición del foco principal, mientras que son variables así la del conjugado como la del virtual. Por último, *el foco principal y el foco conjugado se hallan situados siempre en el mismo lado que el objeto con relación al espejo; mientras que el foco virtual siempre se halla al lado opuesto del espejo.*

Hasta ahora se ha supuesto situado el punto luminoso en el mismo eje principal, y en tal caso se forma el foco sobre este eje; pero si se encuentra aquél en un eje secundario LB ([fig. 274](#)), aplicando a este eje los mismos razonamientos que al otro, se nota que el foco del punto L se forma en otro *l* situado sobre el eje secundario, y que, según la distancia del punto L, así dicho foco puede ser principal, conjugado o virtual. Obsérvese, por lo demás, que los ejes secundarios, lo mismo que el principal, representan siempre un rayo luminoso incidente, pero que se confunde con la normal, y por lo mismo, con el rayo reflejado.

434. Focos en los espejos convexos. -En los espejos convexos sólo existen focos virtuales. Sean, en efecto, varios rayos SI, TK... ([fig. 275](#)), paralelos al eje principal de un espejo convexo. Estos rayos, después de su reflexión, toman direcciones divergentes IM, KH..., que, prolongadas, van a concurrir a un punto F, que es el *foco virtual principal del espejo*. Podría demostrarse por medio del triángulo CKF, de igual modo que en los espejos cóncavos que el punto F es sensiblemente la parte media del radio de curvatura CA.

Si, en vez de ser paralelos al eje, parten los rayos luminosos incidentes de un punto L, situado sobre el eje a una distancia finita, se reconoce fácilmente que es aún virtual el foco, pero que va a formarse en *l*, entre el foco principal y el espejo.

435. Determinación del foco principal. -Es indispensable a menudo, conocer el radio de curvatura en las aplicaciones de los espejos cóncavos o convexos. Esta investigación se reduce a la del foco principal, porque, colocado este foco en medio del radio, basta para encontrarle duplicar la distancia focal.

Para encontrar el foco, cuando el espejo es cóncavo, se expone éste a los rayos solares, de manera que les sea paralelo su eje principal; y luego, con una placa de vidrio deslustrado, se busca el sitio en que más intensa sea la imagen, y allí se encuentra el foco principal. Midiendo la distancia de este punto al espejo, y duplicándola, se obtiene el radio del espejo.

Si el espejo es convexo, se le cubre con papel, cuidando de dejar en éste, a igual distancia del centro de figura A, y en un mismo plano meridiano ([fig. 276](#)), dos pequeñas aberturas circulares en H y en I, que descubran el espejo. Colócase en seguida delante de éste una pantalla MN, con un agujero en su centro de sección circular, mayor que la distancia HI. Si se recibe entonces sobre el espejo un haz de rayos solares SH y SI, paralelos al eje, se refleja la luz en H y en I, sobre las partes en que está descubierto el espejo, y va a formar sobre la pantalla dos imágenes brillantes en *h* y en *i*. Alejando o bien acercando la pantalla MN, se encuentra una posición en que el intervalo *hi* es duplo de HI; y entonces, la distancia AD de la placa al espejo representa la distancia focal principal. En efecto, los triángulos FHI y *Fhi* son semejantes, por lo que  $HI/hi = FA/FD$ ; pero HI es la mitad de *hi*, luego FA es también la mitad de FD. De consiguiente, AD es igual a AF; y como, por otra parte, FA es la distancia focal principal, por ser paralelos al eje los rayos SH y S'I, el doble de AD debe representar el radio de curvatura del espejo.

436. Formación de las imágenes en los espejos cóncavos. -Se ha supuesto hasta ahora que el objeto luminoso o iluminado, situado delante de los espejos, era simplemente un punto; pero si tiene alguna extensión, podemos concebir para cada uno de sus puntos un eje secundario, y determinar así una serie de focos reales o virtuales, cuyo conjunto compondrá la imagen real o virtual del objeto. Vamos a ver cómo

se determinan la posición y el tamaño de estas imágenes en los espejos cóncavos y en los convexos, fundándonos en las construcciones que han servido para encontrar los focos (433 y 434).

*Imagen real.* -Sea, en primer lugar, un espejo cóncavo, y supongamos que el objeto AB ([fig. 277](#)) se halla situado más allá del centro. Para obtener la imagen o el foco de un punto cualquiera A, hay que principiar por tirar el eje secundario AE de este punto; y luego, trazando desde el punto A un rayo incidente AD, se baja al punto de incidencia la normal DC, y se construye el ángulo de reflexión CDA igual al de incidencia ADC. El punto *a*, en el cual el rayo reflejado corta al eje secundario AE, es el foco conjugado del punto A, porque cualquiera otro rayo AH, procedente de este punto, va a concurrir en *a*. Si se tira el eje secundario BI del punto B, los rayos emitidos desde éste van a reunirse, después de la reflexión, en *b*, formando aquí el foco conjugado de B. Las imágenes de todos los puntos del objeto AB van a agruparse así entre *a* y *b*, y por lo tanto, *ab* es la imagen completa de AB. En vista de lo expuesto acerca de los focos (433), *esta imagen es real, invertida y más pequeña que el objeto, encontrándose situada entre el centro de curvatura y el foco principal.* Puede verse de dos maneras esta imagen, o bien colocando el ojo en la prolongación de los rayos reflejados, en cuyo caso se percibe una imagen aérea, o bien recibiendo los rayos sobre una pantalla que refleja la luz en todas direcciones, proyectándola hacia el ojo.

Recíprocamente, si el objeto luminoso o iluminado, cuya imagen se busca, se encuentra en *ab*, entre el foco principal y el centro, se forma en AB su imagen, que es real, encontrándose invertida, pero mayor que el objeto, y *tanto más, cuanto más próximo al foco se encuentra el objeto ab.*

Si éste se halla situado en el mismo foco principal, no se produce imagen alguna, porque entonces los rayos emitidos de cada punto forman, después de la reflexión, otros tantos haces respectivamente paralelos al eje secundario trazado por el punto desde el cual han sido emitidos (433), y ya no pueden constituir focos ni imágenes.

Cuando el objeto AB tiene todos sus puntos fuera del eje principal ([fig. 278](#)), se encuentra con facilidad, repitiendo la construcción anterior, que la imagen del objeto AB surge en *ab*.

*Imagen virtual.* -Si el objeto AB ([fig. 279](#)), cuya imagen se busca, se halla entre el foco principal y el espejo, los rayos incidentes AD, AK, que toman después de la reflexión las direcciones DI y KH, van a formar, prolongándose en *a*, una imagen virtual del punto A. De igual manera la imagen B se produce en *b*; y así es que el ojo ve en *ab* la imagen de AB. *Esta imagen es virtual, recta y mayor que el objeto.*

Resumiendo lo que precede, se ve que, según la distancia del objeto, dan origen los espejos cóncavos a dos especies de imágenes, o bien no forman ninguna, lo cual se comprueba colocándonos delante de un espejo cóncavo, pues a cierta distancia vemos nuestra propia imagen invertida y menor, que es la real; más próximos se vuelve confusa y desaparece al llegar al foco; y, más cerca aún, reaparece la imagen no invertida y mayor, que es la imagen virtual.

437. Formación de las imágenes en los espejos convexos. -Sea un objeto AB ([fig. 280](#)), situado delante de un espejo convexo, a una distancia cualquiera. Si se tiran los ejes secundarios AC y BC, resulta de lo dicho (434) sobre la construcción de los focos, en los espejos convexos, que todos los rayos emitidos del punto A son divergentes después de la reflexión, y que sus prolongaciones van a concurrir en un punto *a*, que es la imagen virtual del punto A. Así también los rayos emitidos del punto B constituyen en *b* una imagen virtual de este punto. El ojo que recibe los rayos divergentes DE, KH..., ve, pues, en *ab* una imagen de AB. Resulta de esta construcción que, sea cual fuere la posición de un objeto delante de un espejo convexo, *la imagen es siempre virtual, no invertida y menor que el objeto.*

438. Regla general para la construcción de las imágenes en los espejos. -Las diferentes construcciones que hemos efectuado para el trazado de las imágenes, así en los espejos cóncavos como en los convexos ([fig. 277](#), [279](#) y [280](#)), pueden reasumirse en la regla siguiente:

*Para construir la imagen de un punto:* 1.º se tira el eje secundario de este punto; 2.º se traza desde el punto dado al espejo un rayo incidente cualquiera; 3.º se une el punto de incidencia con el centro del espejo por medio de una recta que representa lo normal, y que da a conocer al mismo tiempo el ángulo de incidencia; 4.º se tira desde el punto de incidencia, en el otro lado de la normal, una recta que forme

con ella un ángulo igual al de incidencia. Esta última recta, que representa al rayo reflejado, prolongada hasta encontrar al eje secundario, da, como sitio de la imagen, el punto mismo en que corta a este eje.

Aplicando la misma construcción a cada uno de los puntos de un objeto, se tendrá siempre su imagen, la cual será real o virtual, según sean los mismos rayos reflejados los que cortan al eje secundario delante del espejo, o bien sus prolongaciones, que lo efectúan detrás del mismo.

439. Fórmulas relativas a los espejos esféricos. -La relación que media entre la posición relativa de un objeto y la de su imagen en los espejos esféricos, se puede representar por medio de una fórmula muy sencilla. Consideremos, al efecto, primero un espejo cóncavo, y representemos por  $R$  su radio de curvatura, por  $p$  la distancia  $LA$  del objeto  $L$  (fig. 281) al espejo, y por  $p'$  la distancia  $IA$  de la imagen al mismo espejo. En el triángulo  $LMI$ , como la normal  $MC$  divide el ángulo  $LMI$  en dos partes iguales, se puede aplicar el teorema de geometría que dice, que en todo triángulo la bisectriz de un ángulo divide al lado opuesto en dos segmentos, que son entre sí como los dos lados del ángulo, esto es, que  $CI/CL=IM/LM$ , de donde  $CI \times LM=CL \times IM$ .

Si el arco  $AM$  no pasa de 5 a 6 grados, las líneas  $ML$ , y  $MI$  son sensiblemente iguales a  $AL$  y  $AI$ , es decir,  $p$  y  $p'$ . Por otra parte,  $CI=CA-AI=R-p'$ , y  $CL=AL-AC=p-R$ . Sustituyendo estas diversas cantidades en la igualdad que precede, resulta:  $(R-p')p=(p-R)p'$  o bien  $Rp-pp'=pp'-Rp$ , y trasponiendo y reduciendo:  $Rp+Rp'=2pp'$  [1].

Si se dividen todos los términos de esta igualdad por  $pp'R$ , y si se suprimen los factores comunes, acepta la forma bajo la cual se la considera de ordinario y que es:

$$1/p + 1/p' = 2/R \quad [2].$$

Resolviendo la ecuación [1] con relación a  $p'$ , resulta  $p' = pR/2p-R$  [3], fórmula que da a conocer la distancia de la imagen al espejo, cuando se conoce la del objeto y el radio de curvatura.

440. Discusión de la fórmula de los espejos. -Busquemos ahora los diferentes valores que acepta  $p'$ , según los que se dan a  $p$  en la fórmula [3].

1.º Supongamos que el objeto luminoso o iluminado se encuentra en el eje a una distancia infinita, en cuyo caso son paralelos los rayos incidentes. Para interpretar el valor que en este caso adquiere  $p'$ , hay que dividir por  $p$  los dos términos de la fracción  $pR=2p-R$ , lo cual da por resultado  $p' = R/2 - R/p$  [4]. Introduciendo en esta fórmula la condición de ser  $p$  infinito, es nula la fracción  $R/p$ , y se tiene  $p' = R/2$ ; es decir, que se forma la imagen en el foco principal, como debe acontecer, porque los rayos incidentes constituyen entonces un haz paralelo al eje.

2.º Si se acerca el objeto al espejo, decrece  $p$ , mengua el denominador de la fórmula [4], y aumenta, por lo mismo, el valor de  $p'$ ; de consiguiente, se aproxima la imagen al centro al mismo tiempo que el objeto, pero hallándose siempre comprendida entre el foco principal y el centro, pues mientras  $p > R$ , se tiene:

$$R/2 - R/p > R/2 \text{ y } < R.$$

3.º Si coincide el objeto con el centro, lo cual se expresa haciendo  $p=R$ , resulta  $p'=R$ , es decir, que la imagen coincide con el objeto.

4.º Si el objeto luminoso pasa entre el centro y el foco principal, tenemos  $p < R$ , y de la fórmula [4] se deduce que  $p'$ , es  $> R$ ; es decir, que la imagen se forma entonces en el otro lado del centro. Cuando llega el objeto al foco principal, se tiene  $p=R/2$ , lo cual da  $p' = R/0 = \infty$  es decir, que la imagen se forma en el infinito. En efecto, los rayos reflejados son entonces paralelos al eje.

5.º Por último, si pasa el objeto entre el foco principal y el objeto, se tiene  $p < R/2$ ; y como el denominador de la fórmula es entonces negativo, le sucede otro tanto a  $p'$ , lo cual indica que la distancia  $p'$ , de la imagen al espejo, debe contarse en el eje en sentido contrario a  $p$ . Efectivamente, la imagen es entonces virtual, y se halla situada al otro lado del espejo (433).

Introduciendo en la fórmula [2] la condición de ser  $p'$  negativo, se transforma en  $1/p - 1/p' = 2/R$ , que comprende los casos de las imágenes virtuales en los espejos cóncavos.

En los casos de ser los espejos convexos, como siempre es virtual la imagen (437),  $p'$  y  $R$  tienen el mismo signo, supuesto que la imagen y el centro están a un mismo lado del espejo, y  $p$  es de signo contrario, pues se encuentra en el otro lado el objeto. Introduciendo esta condición en la fórmula [2], resulta  $1/p' - 1/p = 2/R$  [5], como fórmula relativa a los espejos convexos. Por lo demás, se la podría encontrar directamente empleando las mismas consideraciones geométricas que dan la fórmula [2] de los espejos cóncavos.

Obsérvese que las diferentes fórmulas que anteceden no son rigurosas, pues se apoyan en hipótesis que tampoco lo son, cual es la de ser las rectas  $LM$  y  $IM$  (fig. 281) iguales a  $LA$  y a  $IA$ , lo cual sólo es cierto en el límite, esto es, cuando vale cero el ángulo  $MCA$ . Estas fórmulas son tanto más exactas, cuanto menor es la abertura del espejo.

441. Cálculo de la magnitud de las imágenes. -Por medio de las fórmulas anteriores, se puede calcular fácilmente la magnitud de una imagen, conocida la magnitud del espejo, su radio y la distancia del objeto. En efecto, si se representa éste por  $ED$  (fig. 282), su imagen por  $bd$  y si se supone conocida la distancia  $KA$  y el radio  $AC$ , se calcula  $Ao$  por medio de la fórmula [3] del párrafo 439. Conocida ya  $Ao$ , se deduce de ella  $oC$ . Como los dos triángulos  $BCD$  y  $dCb$  son semejantes, se tiene, entre sus bases y sus alturas, la proporción  $bd/BD = Co/CK$ , de la cual se deduce la magnitud  $bd$  de la imagen.

442. Aberración de esfericidad, cáusticas. -En la teoría que acabamos de dar de los focos y de las imágenes en los espejos esféricos, se ha observado ya que los rayos reflejados no van a concurrir sensiblemente en un punto único, sino en tanto que la abertura del espejo no excede de 8 a 10 grados [433]. Si la abertura es mayor, los rayos reflejados próximos a los bordes van a encontrar al eje más cerca del espejo que los que se han reflejado a una pequeña distancia del centro de curvatura. De aquí resulta en las imágenes una falta de limpieza, que se designa con el nombre de *aberración de esfericidad* por reflexión, a fin de distinguirla de la aberración de esfericidad por refracción que ofrecen las lentes (467).

Cortándose los rayos reflejados sucesivamente dos a dos, según se ve en la parte superior del eje  $FL$  (fig. 283), sus puntos de intersección forman, en el espacio, una superficie brillante, que se llama *cáustica por reflexión*. La curva  $FM$  representa una de las ramas de la sección meridiana de esta superficie.

443. Aplicaciones de los espejos. -Todos conocen las aplicaciones de los espejos planos en la economía doméstica, los cuales son también de frecuente uso, en muchos aparatos de física, para dar a la luz una dirección determinada. Si es la luz solar la que quiere dirigirse, es preciso que sea móvil el espejo para que conserven los rayos reflejados una dirección constante, pues se requiere un movimiento que compense el cambio de dirección que sin cesar aceptan los rayos incidentes, por efecto del movimiento diurno aparente del sol. Se obtiene este resultado por medio de un movimiento de relojería que hace variar la inclinación del espejo por hallarse fijo éste en un eje: dicho aparato se denomina *helióstato*. Se ha utilizado también la reflexión de la luz para medir con gran precisión los ángulos de los cristales, con los instrumentos denominados *goniómetros* de reflexión.

Numerosas son igualmente las aplicaciones de los espejos cóncavos, pues sirven para aumentar las imágenes, como acontece en los de afeitarse. Los ustorios nos son conocidos ya (366), y continúan sirviendo en los telescopios los espejos cóncavos. Por fin, éstos tienen una importante aplicación, como reflectores, para proyectar la luz a grandes distancias, colocando en su foco un manantial luminoso; pero para este uso deben preferirse los espejos parabólicos.

444. Espejos parabólicos. -Los *espejos parabólicos* son espejos cóncavos cuya superficie se engendra por la revolución de un arco de parábola  $AM$ , que gira alrededor de su eje  $AX$  (fig. 284).

Hemos visto anteriormente (442) que, en los espejos esféricos, los rayos paralelos al eje no concurren más que aproximadamente al foco principal; resulta, por consiguiente, que un manantial de luz colocado en el foco de estos espejos, no puede enviar sus rayos reflejados de suerte que sean rigurosamente paralelos al eje. Pero este defecto no existe en los espejos parabólicos, que son más fáciles de construir que los esféricos, pero que son muy adecuados para reflectores. En efecto, conocemos la propiedad que posee la

parábola de que si en un punto cualquiera M de dicha curva se tira la tangente TT', esta forma ángulos iguales con el radio vector FM, y la paralela al eje ML. Por consiguiente, en esta clase de espejos, todos los rayos paralelos al eje van, después de la reflexión, a concurrir rigurosamente al foco F del espejo; y recíprocamente, colocado un manantial luminoso, en este foco, los rayos de luz, después de reflejados, originan un haz luminoso rigurosamente paralelo al eje. De aquí resulta que, la luz así reflejada, tiende a conservar la misma intensidad hasta una gran distancia, porque, según hemos visto (422), la causa que más debilita la intensidad de los rayos luminosos, es su divergencia.

Esta propiedad de los espejos parabólicos se ha utilizado en los carruajes públicos y en los trenes del ferro-carril, proveyendo las lámparas de reflectores parabólicos. Estas clases de lentes se han usado también por mucho tiempo en los faros, pero muy luego veremos que hoy se da la preferencia a las lentes.

Cortando por un plano perpendicular al eje, y que pase por el foco, dos espejos parabólicos iguales, y reuniéndolos por sus intersecciones ([fig. 285](#)), de modo que coincidan sus focos, se obtiene un sistema de reflectores, con el cual una sola lámpara ilumina a la vez en dos direcciones opuestas. Éste es el sistema que se aplica a las escaleras, para alumbrarlas a la vez en toda su longitud.

▽△

## Capítulo III

▽△

### Refracción sencilla, lentes

445. Fenómeno de la refracción. -La *refracción* es una desviación que sufren los rayos luminosos cuando pasan oblicuamente de un medio a otro, como por ejemplo, del aire al agua o de aquélla a cualquiera otro medio. Decimos *oblicuamente*, porque si el rayo luminoso es perpendicular a la superficie que separa los dos medios, no se desvía y continúa propagándose en línea recta.

Si el *rayo incidente* es SO ([fig. 286](#)), el *refractado* será el OH, que es la dirección que acepta la luz en el segundo medio, y los ángulos SOA y HOB, que forman estos rayos con la recta AB, que es la normal a la superficie que separa los dos medios, se denominan, el uno *ángulo de incidencia*, y el otro *ángulo de refracción*. Según se acerque o se aleje de la normal el rayo refractado, se dice que el segundo medio el más o menos *refringente* que el primero.

El cálculo demuestra que el sentido de la refracción depende de la velocidad relativa de la luz en los dos medios. En el sistema de las ondulaciones, el medio más refringente es aquél en el cual es menor la velocidad de propagación.

La luz incidente, que ha de pasar de un medio a otro, no penetra jamás por completo en éste; una de sus partes se refleja en la superficie que separa los dos medios, y la otra penetra en el segundo.

En los medios no cristalizados, como el aire, los líquidos y el vidrio común, el rayo luminoso, simple en la incidencia, continúa siéndolo después de la refracción; pero en ciertos cuerpos cristalizados, como el espato de Islandia y el cristal de roca, da origen el rayo incidente a dos rayos refractados. El primer fenómeno constituye la *refracción simple*, el segundo se designa con el nombre de *doble refracción*. Sólo hablaremos ahora de la refracción sencilla, dejando para más adelante (527) la teoría de la doble refracción.

446. Leyes de la refracción simple. -Cuando un rayo luminoso se refracta pasando de un medio a otro, dotado de distinto poder refringente, se cumplen estas dos leyes:

1.<sup>a</sup> Sea cual fuere la oblicuidad del rayo incidente, el seno del ángulo de incidencia y el del ángulo de refracción se hallan en una relación constante para dos medios iguales, pero variable si cambian éstos.

2.<sup>a</sup> Los rayos incidente y refractado se encuentran en un mismo plano perpendicular a la superficie que separa los dos medios.

Conócense estas leyes con el nombre de *leyes de Descartes*, que fue el primero que las formuló. Para demostrarlas, se emplea el mismo aparato que para las leyes de la reflexión (424). Reemplázase, al efecto, el espejo plano, situado en el centro del círculo graduado por un vaso semi-cilíndrico de vidrio, lleno de agua, de manera que la superficie del líquido se encuentre exactamente a la altura del centro del círculo (fig. 287). Si se inclina entonces el espejo M de suerte que dirija hacia el centro un rayo reflejado MO, se refracta éste al entrar en el agua; pero sale de ella sin refracción, porque a la salida es su dirección normal a la pared curva del vaso B. A fin de seguir la marcha del rayo refractado PO, se le recibe en una pantalla P que se mueve con objeto de que la imagen de la abertura de la placa N vaya a formarse en su centro. Por fin, en todas las posiciones de las pantallas N y P, los senos de los ángulos de incidencia y de refracción están representados y medidos por dos reglas I y R, movibles alrededor de un eje, divididas en milímetros y equilibradas de manera que queden constantemente horizontales, es decir, perpendiculares al diámetro AD.

Leyendo en las dos reglas I y R las longitudes de los senos de los ángulos MOA y DOP, se encuentran números que varían con la posición de las pantallas, pero cuya relación es constante, es decir, que si el seno de incidencia se hace dos, tres veces mayor, le sucede otro tanto al de refracción, lo cual demuestra la primera ley. En cuanto a la segunda ley, queda demostrada por la posición misma del aparato, pues el plano del limbo graduado es perpendicular a la superficie del líquido en el vaso semi-cilíndrico.

447. Índices de refracción. -La relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción, se denomina *índice de refracción*. Varía según los medios, y así es que vale  $\frac{4}{3}$  del aire al agua y  $\frac{3}{2}$  del aire al vidrio.

Si se consideran los medios en un orden inverso, es decir, si la luz se propaga del agua al aire, o del vidrio al aire, se nota que sigue *el mismo camino*, pero en sentido contrario; pues entonces PO es el rayo incidente, y OM el refractado. Por lo tanto, la relación que representa el índice de refracción, está a su vez invertida; y será  $\frac{3}{4}$  del agua al aire, y  $\frac{2}{3}$  del vidrio al aire.

448. Efectos producidos por la refracción. -Por efecto de la refracción parece que los cuerpos sumergidos en un medio más refringente que el aire, se acercan a la superficie de separación; y por el contrario, parecería que se alejaban de la misma, si lo estuviesen en uno menos refringente. Sea, por ejemplo, un objeto L introducido en una masa de agua (fig. 288). Al pasar los rayos LA, LB..., desde este líquido al aire, se separan de la normal en un punto de incidencia, y aceptan las direcciones AC, BD..., cuyas prolongaciones concurren sensiblemente a un punto L' situado en la perpendicular LK. El ojo que recibe estos rayos ve, pues, el objeto L en L'. Cuanto más oblicuos son los rayos LA, LB..., más alto parece el objeto.

Se explica por el mismo efecto que un bastón, introducido oblicuamente en el agua, parezca roto (fig. 289), y que se halle más cerca de la superficie de lo que en realidad lo está.

Por un efecto de refracción nos parece igualmente que, los astros se encuentran a mayor altura en nuestro horizonte. En efecto, como las capas de la atmósfera van siendo más densas a medida que nos aproximamos al suelo; y como en un mismo gas crece el poder refringente con la densidad (458), resulta de aquí que, al entrar en la atmósfera, y al propagarse en ella los rayos luminosos, se quiebran (fig. 290), describiendo una curva que llega hasta el ojo, y en la dirección de la tangente a esta curva vemos el astro S', en vez de verlo en S. En nuestros climas, la refracción atmosférica sólo hace parecer medio grado más altos los astros.

449. Ángulo límite, reflexión total. -Cuando un rayo luminoso pasa de un medio a otro menos refringente, como del agua al aire, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia (447); de suerte que, si se propaga la luz en una masa de agua, de S a O (figura 291), existe siempre un valor respecto al ángulo de incidencia al cual corresponde uno de refracción AOR que es recto, o lo que es lo mismo, el rayo refractado OR se presenta paralelo a la superficie del agua.

Este ángulo SOB se denomina *ángulo límite*, porque, para cualquiera otro ángulo de incidencia mayor, tal como POB, el rayo incidente PO no puede originar ningún rayo refractado. En efecto, como el ángulo AOR aumenta con el SOB, el rayo OR va dirigido por OQ, es decir, que no hay refracción en el punto O, sino una reflexión interior que se designa con el nombre de *reflexión total*, porque la luz incidente es reflejada entonces casi en su totalidad. Del agua al aire vale el ángulo límite  $48^{\circ} 35'$ ; y del vidrio al aire  $41^{\circ} 48'$ .

Compruébase la reflexión interior por medio del experimento que sigue: se coloca un objeto A delante de un vaso de vidrio lleno de agua ([fig. 292](#)), y mirando en seguida desde el otro lado del vaso la superficie del líquido de abajo hacia arriba, se ve en *a*, encima del líquido, la imagen del objeto A, la cual está formada por los rayos reflejados en m.

450. Espejismo. -El *espejismo* es una ilusión de óptica que hace percibir, en la superficie del suelo o en la atmósfera, la imagen invertida de los objetos lejanos. Obsérvase con frecuencia este fenómeno en los países cálidos, particularmente en las llanuras arenosas de Egipto. En estas localidades ofrece el terreno a menudo el aspecto de un lago tranquilo, sobre el cual se reflejan los árboles y las poblaciones inmediatas. Desde la más remota antigüedad se ha observado este fenómeno; pero Monge fue el primero que lo explicó en la expedición a Egipto.

El espejismo es un fenómeno de refracción que resulta de la densidad desigual de las capas de la atmósfera, cuando se hallan dilatadas por su contacto con el terreno muy calentado. Siendo entonces las capas menos densas las más inferiores, un rayo luminoso que se dirige de un objeto elevado A hacia el suelo, atraviesa capas cada vez menos refringentes, pues no tardaremos en ver (458) que un gas es tanto menos refringente, cuanto menor es su densidad. De aquí resulta que crece el ángulo de incidencia de capa en capa, y al fin se transforma en ángulo límite, más allá del cual, en la refracción, surge la reflexión interior (449). Proyéctase entonces el rayo luminoso hacia arriba ([figura 293](#)), y sufre una serie de refracciones sucesivas en sentido contrario a las primeras, porque va atravesando capas más y más refringentes. Llega, pues, el rayo luminoso al ojo del observador según la dirección que aceptaría si hubiese partido de un punto de situación inferior a la superficie del terreno, y por eso se ve una imagen invertida del objeto que la emitió, cual si se hubiese reflejado en el punto O sobre la superficie del agua tranquila.

Observan a veces los navegantes, en la atmósfera, la imagen invertida de las costas o de los buques lejanos; hecho que origina igualmente el espejismo, pero que se produce en sentido contrario del primero, y tan sólo cuando la temperatura del mar es inferior a la del aire, porque entonces las capas inferiores de la atmósfera son las más densas a causa de su contacto con la superficie de las aguas.

▽△

## Trasmisión de la luz al través de los medios diáfanos

451. Medios terminados por caras paralelas. -Cuando la luz cruza un medio terminado por caras paralelas, los rayos *emergentes*, es decir, los que salen, son paralelos a los incidentes.

Para demostrarlo, sean MN ([fig. 294](#)) un cristal de caras paralelas, SA un rayo incidente, DB el emergente, *i* y *r* los ángulos de incidencia y de refracción al entrar el rayo, y por último, *i'* y *r'* los mismos ángulos al salir. En A sufre la luz una primera refracción, cuyo índice es  $\text{sen } i / \text{sen } r$ ; y en D se refracta de nuevo, siendo entonces el índice  $\text{sen } i' / \text{sen } r'$ . Hemos visto (447) que el índice de refracción del vidrio al aire es el mismo que el del aire al vidrio invertido; luego  $\text{sen } i' / \text{sen } r' = \text{sen } r / \text{sen } i$ . Pero siendo paralelas las dos normales AG y DE, los ángulos *r* e *i'* son iguales por alternos-internos. De consiguiente, como son iguales los numeradores de las dos razones citadas, les sucede otro tanto a los denominadores, de donde se deduce que los ángulos *r'* e *i* son iguales, y por lo mismo, DB es paralelo a SA.

452. Prismas. -Se denomina *prisma*, en óptica, todo medio transparente limitado por dos caras planas inclinadas entre sí. La intersección de estas dos caras es una línea recta llamada *arista* del prisma, y el ángulo que comprenden, es su *ángulo refringente*. Toda sección perpendicular a la arista se denomina

*sección principal.* Los prismas que se usan suelen ser prismas triangulares rectos, de cristal (fig. 295), y su sección principal es un triángulo (fig. 296). En esta sección el punto A toma el nombre de *vértice* del prisma, y la recta BC es su *base*; expresiones que, geoméricamente, no convienen al prisma, sino al triángulo ABC.

453. Trasmisión de los rayos en los prismas. -Conocidas las leyes de la refracción, fácilmente se determina la marcha de la luz en los prismas. Sea, en efecto, un punto luminoso O (fig. 296), contenido en el plano de la sección principal ABC de un prisma, y OD un rayo incidente. Este rayo se refracta en D, acercándose a la normal, supuesto que entra en un medio más refringente; y en K sufre una nueva refracción, pero separándose de la normal, por pasar al aire, que es menos refringente que el cristal. Refractase, pues, la luz dos veces en el mismo sentido, y el ojo que recibe el rayo emergente KH ve el objeto O en O', es decir, que los *objetos, vistos al través de un prisma, aparecen desviados hacia su vértice*. La desviación que imprime así el prisma a la luz, se mide por el ángulo OEO', que forman entre sí los rayos incidente y emergente. Este ángulo se denomina *ángulo de desviación*.

Nótase, además, que los objetos vistos al través de los prismas aparecen iluminados con los brillantes colores del arco iris. Pronto describiremos este fenómeno con el nombre de *dispersión* (470).

454. Condición de emergencia en los prismas. -Los rayos luminosos que se han refractado en la primera cara de un prisma, no pueden salir por la segunda, sino en tanto que el ángulo refringente del prisma es menor que el duplo del ángulo límite de la sustancia que constituye el prisma.

En efecto, representando por LI (fig. 297) el rayo incidente sobre la primera cara, por IE el refractado, por PI y PE las normales, se sabe que el rayo IE no puede salir por la segunda cara, sino mientras el ángulo de incidencia IEP es menor que el ángulo límite (449). Aumentando el ángulo de incidencia NIL, le sucede otro tanto al EIP, pero disminuye el IEP. Por lo mismo, cuanto más se acerca la dirección del rayo LI a ser paralela a la cara AB, más tiende a emitir otro emergente por la segunda cara.

Si LI es paralelo a AB, el ángulo  $r$  es igual al ángulo límite  $l$  del prisma, porque posee su valor máximo. Por otra parte, el ángulo EPK, exterior al triángulo IPE, es igual a  $r+i'$ ; pero los ángulos EPK y A son iguales por tener sus lados perpendiculares, y de consiguiente,  $A=r+i'$  y también  $A=l+i'$ ; supuesto que en el caso en cuestión  $r=l$ . De consiguiente, si  $A=2l$  o  $A>2l$ , tendremos  $i'=l$ , o  $i'>l$ , de suerte que no es posible la emergencia por la segunda cara, sino tan sólo, reflexión interior y emergencia por la tercera cara BC. Con mayor razón aun, sucederá lo mismo con rayos cuyo ángulo de incidencia sea menor que LIN, supuesto que acabamos de ver que el ángulo  $i'$  va entonces creciendo. Así, pues, en el caso en que el ángulo refringente del prisma es igual a  $2l$ , o bien mayor, ningún rayo luminoso puede pasar al través de las caras del ángulo refringente.

Como el ángulo límite del cristal vale  $41^{\circ} 48'$ , el doble de este ángulo es menor que  $90^{\circ}$ , de lo cual se deduce que no pueden verse los objetos al través de un prisma de vidrio cuyo ángulo refringente sea recto. Teniendo el ángulo límite del agua el valor de  $48^{\circ} 35'$ , puede pasar la luz al través del ángulo recto de un prisma hueco formado por tres cristales y lleno de agua.

En el caso en que el ángulo A sea menor que  $2l$ , hay siempre emergencia, en la segunda cara, de parte de la luz que cae sobre la primera, y la cantidad de luz que entonces pasa depende de la incidencia de los rayos directos LI. Comprendido el ángulo A entre  $l$  y  $2l$ , pueden salir parte de los rayos incluidos en el ángulo NIB; pero todos los del ángulo NIA experimentan la reflexión total en la cara AC. Si  $A>0$  y  $<l$ , pueden pasar todos los rayos comprendidos en el ángulo NIB y parte de los del NIA.

455. Desviación mínima. -Cuando se recibe un haz de luz solar al través de una abertura A practicada en la corredera de una cámara oscura (fig. 298), se nota que va a proyectarse el haz en la dirección de una recta AC sobre una pantalla alejada. Pero si se interpone un prisma vertical entre el orificio y la pantalla, se desvía el haz hacia la base del prisma, y va a proyectarse en D, lejos del Punto C. Si se hace girar entonces el pie que sostiene al prisma, de manera que disminuya el ángulo de incidencia, se ve que el disco luminoso D se acerca al punto C hasta cierta posición E, a partir de la cual vuelve sobre sí mismo, aun cuando se continúe haciendo girar al prisma en el mismo sentido. Hay, pues, una desviación EBG menor que todas las demás; y por el cálculo se demuestra que esta *desviación mínima* se verifica cuando son iguales los ángulos de incidencia y de emergencia.

Se puede determinar, por el cálculo, el ángulo de desviación mínimo, una vez conocidos el ángulo de incidencia y el refringente. En efecto, como en la desviación mínimo el ángulo de emergencia  $r'$ , es igual al de incidencia  $i$  (fig. 297), es necesario que  $r=i'$  pero se ha visto (454) que  $A=r+i'$ , luego  $A=2r$  [1]. Si se representa por  $d$  el ángulo de desviación mínimo /DL, por ser este ángulo exterior al triángulo DIE, se tiene la igualdad  $d=i-r+r'-i'=2i-2r=2i-A$  [2], la cual da el ángulo  $d$  dados los  $i$  y  $A$ .

De las fórmulas [1] y [2] se deduce una tercera que sirve para calcular el índice de refracción de un prisma cuando se conocen su ángulo refringente y su desviación mínimo.

Efectivamente, como el índice de refracción es la relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción, si se le representa por  $n$ , se tiene  $n=\text{sen } i/\text{sen } r$ , y reemplazando  $i$  y  $r$  por sus valores deducidos de las fórmulas [1] y [2], resulta

$$n=\text{sen}(A+d/2)/\text{sen } A/2 \text{ [3].}$$

456. Medida del índice de refracción de los sólidos. -Por medio de la fórmula [3] se calcula con facilidad el índice de refracción, cuando se conocen los ángulos  $A$  y  $d$ .

Para determinar primero el ángulo  $A$ , se da la forma de prisma triangular a la sustancia trasparente cuyo índice se desea averiguar, y luego se mide el ángulo  $A$  del prisma por medio de un goniómetro (443).

En cuanto al ángulo  $d$ , se le mide del modo siguiente: se recibe sobre el prisma un rayo LI emitido por un objeto lejano (fig. 299), y se da vuelta al prisma de modo que se obtenga la desviación mínimo ED. Midiendo entonces con un círculo provisto de anteojo el ángulo EDL', que forma el rayo refractado DE con el DL', que viene directamente del objeto, se obtiene el ángulo de desviación mínimo, suponiendo que el objeto está bastante lejano para que los dos rayos LI y L'D sean sensiblemente paralelos. Sólo falta ya sustituir los valores de  $A$  y de  $d$  en la fórmula [3] para deducir de ella el valor del índice  $n$ .

Este procedimiento, debido a Newton, no es aplicable más que a los cuerpos transparentes; pero Wollaston dio otro para calcular el índice de refracción de un cuerpo opaco, por medio de la determinación de su ángulo límite.

457. Medida, del índice de refracción de los líquidos. -M. Biot ha aplicado el método de Newton, es decir, el del mínimo de desviación, a la investigación del índice de refracción de los líquidos. Al efecto, se practica, en un prisma de vidrio PQ (figura 300), una cavidad cilíndrica O de unos dos centímetros de diámetro, y que vaya de la cara de incidencia a la de emergencia. Se cierra esta cavidad por medio de dos láminas de vidrio de caras bien paralelas que se aplican sobre las del prisma. Una pequeña abertura B, que se cierra perfectamente con un tapón esmerilado, sirve para introducir el líquido. Después de determinar el ángulo refringente y la desviación mínimo del prisma líquido comprendido en la cavidad O, se introduce el valor de estos ángulos en la fórmula [3] del párrafo 455, y se obtiene el índice.

458. Medida del índice de refracción de los gases. -Por el método de Newton también determinaron los señores Biot y Arago el índice de refracción de los gases. Consta el aparato de un tubo de vidrio AB (fig. 301), tallado a bisel en sus extremidades y cerrado por dos láminas de vidrio de caras paralelas, e inclinadas entre sí de 143 grados. Se halla en comunicación este tubo, por una parte, con la campana H, en la cual hay un barómetro de sifón; y por la otra, con una llave que permite hacer el vacío en el aparato e introducir en seguida en él diferentes gases. Hecho ya el vacío en el tubo AB, se procura que le atraviese un rayo de luz SA que se separa de la normal la cantidad  $r-i$  en la primera incidencia, y se acerca a  $i'-r'$ , en la segunda, de manera que, sumadas estas dos desviaciones, dan la desviación total  $d=r-i+i'-r'$ . En el caso de la desviación mínimo, es  $i=r'$  y  $r=i'$ , de donde  $d=A-2i$ , supuesto que  $r+i'=A$  (454). El índice del vacío al aire, que es evidentemente  $\text{sen } r/\text{sen } i$ , reconoce, pues, por valor

$$\text{sen } A/2/\text{sen } (A-d/2) \text{ [4].}$$

Basta, pues, conocer el ángulo refringente  $A$  y el de desviación mínimo  $d$ , para poder deducir el índice de refracción del vacío al aire, género de índice que se designa con el nombre de *índice absoluto* o de *índice principal*.

Para obtener el índice absoluto de un gas que no sea el aire, se le hace pasar al aparato después de efectuar en éste el vacío; y midiendo en seguida los ángulos  $A$  y  $d$ , la fórmula [4] da a conocer el índice de refracción del gas al aire. Conociendo ya el índice del vacío al aire, la relación de estos dos índices da el de refracción del vacío al gas propuesto, esto es su índice absoluto.

Por medio de este aparato manifestaron los señores Biot y Arago que el índice de refracción de los gases es siempre muy pequeño, comparado con los de los sólidos y de los líquidos; y que, para un mismo gas, el *poder refractivo* es proporcional a la densidad, llamando poder refractivo de una sustancia al cuadrado de su índice de refracción menos una unidad, es decir, la expresión  $n^2-1$ . El cociente del poder refractivo por la densidad, se llama *poder refringente*.

*Tabla de los índices absolutos de refracción.*

SUSTANCIAS.	ÍNDICES.	SUSTANCIAS.	ÍNDICES.
Diamante.	1,755	Alcohol.	1,374
Rubí.	1,779	Albúmina.	1,360
Espato de Islandia, refr. ord.	1,6543	Éter.	1,358
- refr. estr.	1,4833	Humor acuoso.	1,3366
Flint-glass.	1,605	Cristalino.	1,884
Cuarzo refr. ord.	1,558	Humor vítreo.	1,3394
- refr. estr.	1,548	Agua.	1,3358
Cristal de Saint-Gobain.	1,543	Hielo.	1,310
Crown-glass.	1,534	Aire.	1,0003

▽△

## Lentes, sus efectos

459. Diferentes especies de lentes. -Denominanse *lentes* unos medios transparentes que, atendida la curvatura de su superficie, poseen la propiedad de hacer converger o divergir los rayos luminosos que los atraviesan. Según sea esta curvatura, así se dice que las lentes son esféricas, cilíndricas, elípticas o parabólicas. Las esféricas son las únicas que se usan en los instrumentos de óptica, y son generalmente de *crown-glass*, vidrio que no contiene plomo, o de *flint-glass*, que lo contiene, y que es más refringente que el crown.

Combinando las superficies esféricas entre sí o con otras planas, se forman seis especies de lentes, cuyas secciones representamos en la [figura 302](#). Cuatro de ellas constan de dos superficies esféricas, y dos, de una plana y otra esférica.

La primera, A, se llama *bi-convexa*; la segunda, B, *plano-convexa*; la tercera, C, *cóncavo-convexa convergente*, la cuarta, D, *bi-cóncava*; la quinta, E, *plano-cóncava*; y la última, F, *cóncavo-convexa divergente*. La lente C también se denomina *menisco convergente*, y la F, *menisco divergente*.

Las tres primeras, que son más gruesas en el centro que en los bordes, son *convergentes*, y *divergentes* las últimas, más delgadas en el centro que en los bordes. En el primer grupo basta considerar la lente bi-convexa, y en el segundo la bi-cóncava, pues las propiedades de éstas se aplican a las otras del grupo respectivo.

En las lentes cuyas dos caras son esféricas, los centros de dichas superficies se llaman *centros de curvatura*, y la recta indefinida tirada por dichos dos centros, es el *eje principal*. En una lente plano-cóncava o plano-convexa, el eje principal es la perpendicular bajada desde el centro de la cara esférica a la plana.

A fin de poder comparar la marcha de los rayos luminosos en las lentes con la que se nota en los prismas, se hace la misma hipótesis que para los espejos curvos (432), es decir, que se suponen las superficies de las lentes constituidas por una serie de elementos planos infinitamente pequeños; y la normal es entonces, en un punto cualquiera, la perpendicular al plano tangente que contiene al elemento correspondiente. En geometría se demuestra que todas las normales a una misma superficie esférica van a pasar por su centro. En la hipótesis citada, pueden concebirse siempre, en los puntos de incidencia y de emergencia dos superficies planas más o menos inclinadas entre sí, y que producen de esta suerte el efecto del prisma. Continuando esta comparación, podemos asemejar las tres lentes A, B, C, a una serie de prismas reunidos por sus bases, y las D, E, F, a una serie de prismas reunidos por sus vértices; y esto explica por qué las primeras deben aproximar los rayos, y alejarlos las segundas, supuesto que ya hemos visto que, cuando un rayo luminoso atraviesa un prisma, se desvía hacia la base (453).

460. Focos en las lentes bi-convexas. -En las lentes, lo mismo que en los espejos, los *focos* son unos puntos a los cuales van a concurrir los rayos refractados o sus prolongaciones. Las lentes bi-convexas presentan las mismas especies de focos que los espejos cóncavos, a saber: focos reales y focos virtuales.

*Focos reales.* -Consideremos desde luego, como lo hemos efectuado respecto a los espejos, el caso en que los rayos luminosos que se proyectan sobre la lente, sean paralelos a su eje, como lo indica la [figura 303](#). En este caso, todo rayo incidente LB, aproximándose a la normal en el punto de incidencia B, y separándose de ella en el punto de emergencia D, se refracta dos veces hacia el eje, al cual corta en F. Como todos los rayos paralelos al eje se refractan de la misma manera, van a pasar sensiblemente por el mismo punto F, mientras el arco BE no exceda de 10 a 12 grados. Este punto es el *foco principal*, y la distancia FA, la distancia *focal principal*, que es constante para una misma lente, pero variable con el radio de curvatura y el índice de refracción. En las lentes ordinarias, que son de crown, el foco principal coincide aproximadamente con el centro de curvatura.

Consideremos en la actualidad el caso en que el objeto luminoso se encuentre más alejado de la lente que su foco principal, pero a una distancia bastante pequeña para que todos los rayos incidentes formen un haz divergente. En este caso, sea L ([fig. 304](#)) el punto de donde emanan los rayos luminosos: si se compara la marcha del rayo divergente LB con la del SB, paralelo al eje, se reconoce que el primero forma con la normal un ángulo  $L B n$  mayor que el  $S B n$ , y su ángulo de refracción ha de ser también mayor, manera que, después de haber atravesado la lente, encuentra al eje en un punto  $l$  más lejano que el foco principal F. Como todos los rayos que parten del punto L van a concurrir sensiblemente al mismo punto  $l$ , este último es el *foco conjugado* del punto L. Esta denominación expresa aquí, lo mismo que en los espejos, la relación que existe entre los dos puntos L y  $l$ , relación tal, que, si se lleva a  $l$  el punto luminoso, pasa recíprocamente a L el foco.

A medida que se aproxima a la lente el objeto L, aumenta la divergencia de los rayos emergentes y se aleja el foco  $l$ ; y cuando el objeto L coincide con el foco principal, los rayos emergentes, en el otro lado de la lente, son paralelos al eje, y entonces no hay foco, o, lo que es lo mismo, se forma en el infinito. En tal caso, siendo paralelos los rayos refractados, decrece con mucha lentitud la intensidad de la luz, en términos de que un solo farol puede alumbrar entonces a grandes distancias. Basta para esto colocarle en el foco de una lente bi-convexa ([fig. 305](#)).

*Focos virtuales.* -En las lentes bi-convexas, el foco es virtual cuando el objeto luminoso L se halla situado entre la lente y el foco principal ([fig. 306](#)), pues, formando los rayos incidentes LI con la normal ángulos mayores que los que constituyen los rayos FI emitidos desde el foco principal, resulta de aquí que, después de la emergencia, los primeros se apartan del eje más que los últimos, y forman un haz divergente HK, GM. Estos rayos no pueden, pues, dar origen a ningún foco real; pero sus prolongaciones concurren en un mismo punto  $l$  situado sobre el eje. Este punto es el foco virtual de L (427).

461. Focos en las lentes bi-cóncavas. -Con las lentes bi-cóncavas no se forman más que focos virtuales, sea cual fuere la distancia del objeto. Supongamos, en primer lugar, un haz de rayos paralelos al eje: un rayo cualquiera SI ([fig. 307](#)) se refracta en el punto de incidencia I, acercándose a la normal CI; y en el punto de emergencia G se refracta de nuevo, pero separándose de la normal GC', de suerte, que se quiebra dos veces en el mismo sentido para alejarse del eje CC'. Verificándose lo propio con cualquiera otro rayo S'KMN, resulta de esto que, después de haber atravesado la lente, forman los rayos un haz divergente GH, MN. No puede existir, pues, en ella foco real; pero las prolongaciones de estos rayos se encuentran en un punto F, que es el foco virtual principal.

En el caso de partir los rayos de un punto L ([fig. 308](#)), situado sobre el eje, se ve, por la misma construcción, que se forma un foco virtual en  $l$ , entre el principal y la lente.

462. Determinación experimental del foco principal de las lentes. -Para determinar el foco principal de una lente bi-convexa, basta exponerla a los rayos solares, cuidando de que su eje principal les sea paralelo. Recibiendo entonces, sobre una lámina de vidrio deslustrado, el haz emergente, se determina con facilidad el punto en que concurren los rayos. Este punto es el foco principal.

Si la lente es bi-cóncava, se cubre la cara  $aDb$  ([fig. 309](#)) con un cuerpo opaco, con negro de humo por ejemplo, dejando, en un mismo plano meridiano y a igual distancia del eje, dos pequeños discos  $a$  y  $b$ , no ennegrecidos, que dan paso a la luz; y luego se recibe sobre la otra cara de la lente, paralelamente al eje, un haz de luz solar, avanzando o alejando la lámina P sobre la cual caen los rayos emergentes, hasta que las imágenes A y B de las pequeñas aberturas  $a$  y  $b$  disten entre sí doble que  $ab$ . El intervalo DI es entonces igual a la distancia focal FD, a causa de la semejanza de los triángulos  $Fab$  y  $FAB$ .

463. Centro óptico, ejes secundarios. -En toda lente existe un punto denominado *centro óptico*, situado sobre el eje, y que posee la propiedad de que todos los rayos luminosos que pasan por él no sufren la desviación angular, es decir que el rayo emergente es paralelo al incidente. Para demostrar la existencia de este punto en una lente bi-convexa, tiremos a sus dos superficies dos radios de curvatura paralelos CA y C'A' ([fig. 310](#)). Los dos elementos planos que corresponden a la superficie de la lente, en A y A', son paralelos entre sí por ser perpendiculares a dos rectas paralelas, y por lo mismo puede admitirse que el rayo refractado KAA'K' se propaga en un medio de caras paralelas. Por lo tanto, el rayo que va a A con la debida inclinación, para que después de refractado siga la dirección AA', debe salir paralelo a su primera dirección (451); y el punto O, en que la recta AB' corta al eje, es, pues, el centro óptico. Para determinar la posición de este punto, en el caso de ser igual la curvatura de ambas caras, que es lo regular, basta tener presente que son iguales los triángulos COA y C'OA', y que  $OC=OC'$ , con lo que se conoce el punto O. Si son desiguales las curvaturas, son semejantes los triángulos COA y C'OA', deduciéndose de ellos CO o C'O, y de consiguiente, el punto O.

En las lentes bi-cóncavas o cóncavo-convexas, se determina el centro óptico por medio de la misma construcción que acabamos de describir. En las lentes que tienen una cara plana, se encuentra dicho punto en la intersección misma del eje con la cara curva.

Toda recta PP' ([fig. 311](#)) que pasa por el centro óptico, mas no por los centros de curvatura, es un *eje secundario*. Según la propiedad del centro óptico, todo eje secundario representa un rayo luminoso que pasa por este punto; porque, atendido el pequeño espesor de las lentes, se puede admitir que los rayos que pasan por el centro óptico continúan en línea recta, es decir, que se desprecia la escasa desviación que sufren los rayos, sin que por esto dejen de permanecer paralelos cuando atraviesan un medio de caras paralelas ([fig. 294](#)).

Mientras los ejes secundarios no forman con el principal más que un pequeño ángulo, se les puede aplicar todo cuanto se ha dicho hasta ahora de este último; es decir, que los rayos emitidos de un punto P ([fig. 311](#)), situado sobre un eje secundario PP', van a concurrir, con corta diferencia, a un mismo punto P' de este eje, y según la distancia del punto P a la lente sea mayor o menor que la distancia focal principal; así el foco que de esta suerte se forma es conjugado o virtual. Este principio es la base de todo cuanto vamos a exponer acerca de la formación de las imágenes.

464. Formación de las imágenes en las lentes bi-convexas. -En las lentes, lo mismo que en los espejos, la imagen de un objeto es el conjunto de los focos de cada uno de sus puntos; de donde resulta que las imágenes que producen las lentes son reales o virtuales en los mismos casos que los focos, y que su construcción se reduce a buscar una serie de puntos, conforme se ha visto ya en los espejos (436).

1.º *Imagen real*. -Supongamos primero el caso en que, siendo bi-convexa la lente, el objeto AB ([fig. 312](#)) se halla situado más allá del foco principal. Si se tira el eje secundario Aa del punto extremo A, cualquier rayo AC, emitido de este punto, se refracta en C y en D, dos veces en el mismo sentido, acercándose al eje secundario que va a cortar en  $a$ . Como los otros rayos emitidos del punto A van, según lo dicho en el párrafo anterior, a concurrir también a  $a$ , este punto es el foco conjugado del A. Si se tira ahora el eje secundario del punto B, se nota igualmente que los rayos que éste emite van a formar su foco en  $b$ ; y

como los puntos situados entre A y B tienen evidentemente su foco entre  $a$  y  $b$ , se forma en  $ab$  una imagen *real e invertida* del objeto AB.

Para ver esta imagen, es preciso recibirla sobre una pantalla blanca que la refleje, o situar el ojo según la dirección de los rayos emergentes.

Recíprocamente, si  $ab$  fuese el objeto luminoso o iluminado que emite rayos, iría a formarse en AB su imagen. Síguense de aquí dos importantes consecuencias, que deben tenerse presentes para la teoría de los instrumentos de óptica que más adelante describiremos: 1.<sup>a</sup> *Si un objeto, por muy grande que sea, dista bastante de una lente bi-convexa, la imagen real e invertida que de él se obtiene es muy pequeña, está muy aproximada al foco principal, y un poco más allá de este punto con relación a la lente.* 2.<sup>a</sup> *recíprocamente, si un objeto muy pequeño se halla situado cerca del foco principal, algo anterior respecto a este punto, la imagen que va a formarse a gran distancia es muy amplificada, y tanto más, cuanto más cerca se encuentra el objeto del foco principal.* Estos dos principios se comprueban experimentalmente con la mayor facilidad, recibiendo, sobre una pantalla, en la oscuridad, la imagen de la llama de una vela colocada sucesivamente a distancias variables más allá de una lente bi-convexa.

2.º *Imagen virtual.* -Si el objeto AB ([fig. 313](#)) se halla entre la lente y su foco principal, tirando el eje secundario Oa del punto A, cualquier rayo AC, después de haberse refractado dos veces, sale divergente con relación a este eje, supuesto que el punto A se encuentra situado a una distancia menor que la focal (460). Este rayo, prolongado en sentido contrario a su dirección va, pues, a cortar el eje Oa en un punto  $a$ , que es el foco virtual del A. Tirando el eje secundario del punto B, se nota también que el foco virtual de este punto se forma en  $b$ . Se tiene, pues, en  $ab$  la imagen de AB. *Esta imagen es recta, virtual y mayor que el objeto.*

El aumento es tanto más considerable, cuanto más convexa es la lente, y cuanto más cerca está el objeto del foco principal. Pronto veremos cómo puede calcularse éste aumento por medio de las fórmulas relativas a las lentes (469). Las lentes bi-convexas, empleadas así como vidrios de aumento, se denominan *lentes o microscopios simples* (482).

465. Formación de las imágenes en las lentes bi-cóncavas. -Las lentes bicóncavas, así como los espejos convexos, no dan más que imágenes virtuales, sea cual fuere la distancia del objeto.

Sea, en efecto, un objeto AB ([fig. 314](#)), situado delante de una de las lentes citadas. Si se principia por tirar el eje secundario del punto A, todos los rayos AC, AI, emitidos desde este punto, se refractan dos veces en el mismo sentido para separarse del eje AO; de suerte que el ojo que recibe los rayos emergentes DE y GH, cree que parten del punto en que sus prolongaciones van a encontrar en  $a$  al eje secundario AO. De igual manera, trazando el eje secundario del punto B, los rayos que éste emite forman un haz divergente, cuyas direcciones prolongadas concurren en  $b$ . El ojo nota, pues, en  $ab$  una imagen virtual de AB, *la cual es siempre recta y menor que el objeto.*

466. Regla general para la construcción de las imágenes en las lentes. -Formularemos aquí, para la construcción de las imágenes en las lentes, una regla análoga a la que ya hemos dado para los espejos (438); pero antes conviene observar que, así como un punto situado sobre el eje principal tiene su imagen sobre este eje, de igual manera uno situado sobre un eje secundario cuenta también su imagen sobre este último. Obsérvese, además, que sólo los rayos emanados de un mismo punto dan la imagen en aquél en el cual se cortan, pues los rayos que parten de puntos distintos no producen jamás imagen por su intersección. Ahora bien, considerando primero el caso de una lente bi-convexa, y suponiendo el objeto más allá del foco principal, se obtiene la imagen por medio de la siguiente construcción:

1.º *Por el punto dado y por el centro óptico de la lente se traza un eje secundario;* 2.º *tírese un rayo incidente desde el punto dado a la lente;* 3.º *únase el punto de incidencia con el centro de curvatura por medio de una recta que represente la normal;* 4.º *acérquese a la normal el rayo refractado la cantidad marcada por el índice de refracción del aire al vidrio;* 5.º *trácese la normal del punto de emergencia, y* 6.º *y último, tírese el rayo emergente, separándole de la normal la cantidad que indica el índice de refracción del vidrio al aire. El rayo emergente que así se obtiene, va a cortar al eje secundario en un punto que es el sitio de la imagen real del punto dado.* Aplicando la misma construcción a cada punto de un objeto situado delante de una lente, se obtendrá siempre su imagen.

Si se halla el objeto entre la lente y el foco principal, no varían las construcciones, surgiendo la sola diferencia de que no son los rayos emergentes los que encuentran a los ejes secundarios, sino sus prolongaciones. Lo propio debe advertirse en las lentes bi-cóncavas.

467. Aberración de esfericidad, cáusticas. -En la teoría de los focos y de las imágenes que producen las diferentes especies de lentes esféricas se ha admitido hasta aquí, que los rayos emanados de un mismo punto, después de refractados, concurrían muy sensiblemente a un punto único. Así sucede efectivamente cuando la abertura de la lente, es decir, el ángulo que se obtiene uniendo sus bordes con el foco, no pasa de 10 a 12 grados. Si la abertura es mayor, los rayos que atraviesan la lente cerca de los bordes tienen su punto de concurso a menor distancia que los que la atraviesan cerca del eje, esto es, se produce un fenómeno análogo al que se ha observado en los espejos (442) con el hombre de aberración de esfericidad por reflexión, y que se designa aquí con el de *aberración de esfericidad por refracción*. Las superficies brillantes que entonces se forman en el espacio por la intersección de los rayos refractados, se denominan *cáusticas por refracción*.

La aberración de esfericidad perjudica la limpieza de las imágenes; pero se corrige este defecto de las lentes colocando delante diafragmas con una abertura central que deje pasar los rayos que se dirigen hacia el centro, pero interceptando los que tienden a refractarse hacia los bordes. Por lo demás, combinando dos lentes de curvaturas convenientes, se consigue corregir la aberración de esfericidad.

468. Fórmulas relativas a las lentes. -En toda lente puede traducirse en ecuación la relación que existe entre la distancia de la imagen, la del objeto, los radios de curvatura y el índice de la sustancia que constituye la lente. En el caso en que sea bi-convexa la lente, llamemos P al punto luminoso situado sobre el eje (fig. 315), PI un rayo incidente, IE su dirección en el interior de la lente, EP' el rayo emergente, de suerte que P' es el foco conjugado de P. Sean, además, C'I y CE las normales a los puntos de incidencia y de emergencia, y hagamos IPA=a, EP'A'=b, ECA'=g, IC'A=d, NIP=i, EIO=r, IEO=i', N'EP'=r'.

Siendo exteriores los ángulos i y r', el uno al triángulo PIC', y el otro al CEP', se tiene i=a+d y r'=g+b, de donde i+r'=a+b+g+d [1]. En el punto I se tiene sen i=n sen r, y en E sen r'=n sen i' (447); pero suponiendo el arco AI de pequeño número de grados, les sucede otro tanto a los ángulos i, r, i' y r', y es posible reemplazar en la fórmula anterior los senos por sus arcos, es decir, i=nr y r'=ni' de donde i+r'=n(r+i'). Por otra parte los dos triángulos IOE y COC', tienen igual el ángulo O, y por lo tanto, r+i'=g+d, de donde i+r'=n(g+d). Sustituyendo este valor en la ecuación [1], se obtiene n(g+d)=a+b+g+d o d(n-1)(g+d)=a+b [2].

Ahora bien, si se concibe que los arcos a y g se hallen descritos desde los puntos P y C como centros con un radio igual a la unidad, y si desde el punto P se traza el arco dA con el radio PA, se tienen las proporciones a/Ad=1/PA, y g/A'E=1/CA'; de donde se deduce:

$$a=Ad/AP \text{ y } g=A'E/CA', \text{ o } a=AI/p \text{ y } g=A'E/R,$$

haciendo AP=p, CA'=R, y reemplazando el arco Ad por el AI, que le es sensiblemente igual. Si se suponen en la otra cara de la lente los arcos b y d, descritos también con un radio igual a la unidad, y el A'n, con el radio P'A', haciendo C'A=R' y A'P'=p', se obtiene igualmente

$$d=AI/R \text{ y } b=A'n/P'A'=A'E/p'.$$

Introduciendo estos valores en la ecuación [2], resulta

$$(n-1)(A'E/R+AI/R')=AI/p+A'E/p'.$$

Si se admite que los arcos A'E y AI sean iguales, lo que se aproxima tanto más a la verdad, cuanto menos se separan del eje los rayos incidentes, se puede suprimir el factor común, y resulta

$$(n-1)(1/R+1/R')=1/p+1/p' [3].$$

Tal es la fórmula de las lentes bi-convexas. Si p=∞, será

$$1/p' = (n-1)(1/R + 1/R'),$$

designando entonces por  $p'$  la distancia local principal. Representando ésta por  $f$ , se obtiene

$$1/f = (n-1)(1/R + 1/R') \quad [4],$$

ecuación que con la mayor facilidad puede darnos el valor de  $f$ . Atendiendo a la fórmula [4], toma la [3] la forma  $1/p + 1/p' = 1/f$  [5], que es bajo la cual se la considera ordinariamente.

Cuando la imagen es virtual, muda de signo  $p'$ , y la fórmula [5] se transforma

$$1/p - 1/p' = 1/f \quad [6].$$

En las lentes bi-convexas  $p'$ , y  $f$  conservan el mismo signo<sup>(4)</sup>, pero no  $p$ , y entonces<sup>(5)</sup> la fórmula [5] pasa [a] ser  $1/p - 1/p' = -1/f$  [7].

Por lo demás, la fórmula [7] puede obtenerse por los mismos razonamientos que hemos expuesto.

469. Medida del aumento. -El aumento que da una lente, se deduce con la mayor facilidad de la fórmula [6], que se aplica a la imagen virtual. En efecto, siendo AB el objeto, y formándose en  $ab$  su imagen (fig. 313), si se concibe una recta de A a B y otra de  $a$  a  $b$ , resultan dos triángulos semejantes Oab y OAB, que dan la proporción:  $ab/AB = p'/p$ . El AD aumento no es más que la relación  $ab/AB$ , que puede representarse también por la  $p'/p$ . De consiguiente, basta deducir esta última de la ecuación  $1/p - 1/p' = 1/f$ , que conduce a esta:

$$p'/p = f/f - p.$$

El aumento es, pues, igual  $f/f - p$ .

▽△

## Capítulo IV

▽△

### Dispersión y acromatismo

470. Descomposición de la luz blanca, espectro solar. -El fenómeno de la refracción no es tan sencillo como hasta ahora hemos supuesto; pues la *luz blanca*, es decir, la que nos llega del sol, al pasar de un medio a otro, no sólo se desvía, sino que *se descompone en muchas especies de luces*, fenómeno que se conoce con el nombre de *dispersión*.

Para demostrar que la luz blanca se descompone por efecto de la refracción, se recibe en una cámara oscura un haz de luz solar SA (fig. 316), al través de un pequeño orificio practicado en la corredera. Este haz tiende a formar en K una imagen redonda e incolora del sol; pero si se interpone en su paso un prisma de flint-glass P, dispuesto horizontalmente, al entrar y al salir de éste, el haz se refracta hacia la base, y, en vez de una imagen redonda e incolora, se recibe en una pantalla lejana una imagen H, que en la dirección horizontal tiene la misma dimensión que el haz primitivo, pero oblonga en el sentido vertical, y colorada con las hermosas tintas del arco iris. Esta imagen colorada se denomina *espectro solar*. Hay, en realidad, en el espectro una infinidad de colores; pero sólo se distinguen siete principales, dispuestos, a contar desde el más refrangible, en el orden siguiente: *violado, añil, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo*. No todos tienen en el espectro igual extensión, pues el violado es el más ancho, y el anaranjado el más estrecho.

Con prismas diáfanos de diferentes sustancias, o con prismas de vidrio huecos, llenos de diversos líquidos, se obtienen constantemente espectros formados por los mismos colores y en el mismo orden; pero siendo igual el ángulo refringente, la longitud del espectro varía con la sustancia que constituye el prisma. Los que le dan más extensión se llaman *dispersivos*, y la dispersión se mide por la diferencia de los índices de refracción de los rayos extremos del espectro. Para el flint-glass llega a 0,0433 esta diferencia; para el crown-glass a 0,0246; de suerte que la dispersión del primero es doble de la del segundo.

En prismas de una misma sustancia decrece la dispersión con el ángulo refringente; porque si fuese nulo este ángulo, serían paralelas las caras de incidencia y de emergencia, y no se descompondría la luz.

En los espectros que dan las luces artificiales no se observan otros colores que los del espectro solar, y su orden es el mismo, pero en general faltan algunos. También se modifica mucho su intensidad relativa. El matiz que domina en una llama artificial, es el mismo que domina en su espectro. Las llamas amarillas, rojas, verdes, dan espectros en los cuales el color dominante es el amarillo, el rojo, y el verde.

Para producir un espectro solar cuyos siete colores principales estén distintamente separados, no debe exceder de algunos milímetros el diámetro del orificio que da paso a la luz solar; y si el ángulo refringente del prisma vale 60 grados, la pantalla que reciba el espectro ha de distar de 5 a 6 metros.

471. Los colores del espectro son simples y desigualmente refrangibles. -Si se aísla uno de los colores del espectro, interceptando los demás por medio de una pantalla E ([fig. 317](#)), y si se le hace pasar al través de un segundo prisma B, aún se observa una desviación; pero la luz queda idénticamente la misma; es decir, que la imagen recibida en la pantalla R es roja, si se dejó pasar el haz rojo, y azul si fue el azul; quedando así demostrado que los colores del espectro son *simples*, esto es, indescomponibles por el prisma.

Además, los colores del espectro son desigualmente *refrangibles*; es decir, que poseen índices de refracción distintos. La forma prolongada del espectro bastaría para demostrar la desigual refrangibilidad e los colores simples, pues es evidente que el violado, que es el que más se desvía hacia la base del prisma ([fig. 316](#)), es también el más refrangible, y el rojo, o sea el menos desviado, el menos refrangible. Pero es fácil demostrar, además, la desigual refrangibilidad de los colores simples por medio de varios experimentos. Citaremos los dos siguientes:

1.º Se pegan sobre un cartón negro, a continuación una de otra, dos tiritas estrechas de papel, roja la primera y violada la segunda; y mirándolas luego al través de un prisma, se ven desviadas las dos, pero con desigualdad, pues la roja lo está menos que la violada; lo cual demuestra que los rayos rojos son los menos refractados.

2.º El segundo experimento se efectúa con los prismas cruzados de Newton. Sobre un primer prisma A ([fig. 318](#)), dispuesto horizontalmente, se recibe un haz de luz blanca S que, cuando no atraviesa más que el prisma A, va a formar el espectro  $rv$  sobre una pantalla distante; pero, si se coloca verticalmente detrás del primero un segundo prisma B, para que le cruce el haz refractado, se desvía entonces el espectro  $vr$  hacia la base del prisma vertical. Mas entonces, en vez de ser paralelo a sí mismo, conforme se notaría si se refractasen con igualdad todos los colores del espectro, lo efectúa oblicuamente en  $r'v'$ ; viéndose así que, a partir del rojo hacia el violeta, son los colores más y más refrangibles.

Estos diversos experimentos demuestran que el índice de refracción

varía para cada color; y además, que no todos los rayos de un mismo color tienen igual índice. En efecto, en la zona roja, por ejemplo, los rayos que corresponden a la extremidad del espectro están menos refractados que los próximos a la zona anaranjada. En los cálculos de los índices de refracción (456), se ha convenido en tomar por índice de una sustancia el del rayo amarillo, en el espectro formado por dicha sustancia.

472. Recomposición de la luz blanca. -Descompuesta la luz blanca, faltaba saber si se la podía reproducir reuniendo los diversos haces separados por el prisma. Por varios procedimientos puede verificarse esta recomposición.

1.º Si se recibe el espectro sobre un segundo prisma de ángulo refringente igual al del primero, y vuelto en sentido contrario ([fig. 320](#)), reúne este último prisma los diferentes colores del espectro, y el haz emergente E, paralelo al incidente S es incoloro.

2.º Se recibe el espectro sobre una lente bi-convexa L ([fig. 319](#)), y, colocando una pantalla blanca en su foco, se recoge en él una imagen blanca del sol. Un globo de vidrio lleno de agua produciría el mismo efecto que la lente.

3.º Se hace llegar el espectro a un espejo cóncavo ([fig. 321](#)), y en el foco, sobre una lámina de vidrio deslustrado, se forma una imagen blanca.

4.º Se recompone también la luz, por medio de un bonito experimento, que consiste en recibir los siete colores del espectro respectivamente sobre siete pequeños espejos de vidrio, de caras bien paralelas, a fin de que no descompongan la luz, y que puedan inclinarse en todos sentidos para proyectar la luz reflejada al punto que se desee ([fig. 322](#)). Dirigiendo convenientemente estos espejos, se hacen caer primero sobre el techo, por ejemplo, los siete haces reflejados, de modo que formen siete imágenes distintas, roja, anaranjada, amarilla... Luego, moviendo los espejos de manera que las siete imágenes vayan a sobreponerse con exactitud, se obtiene entonces una imagen única, que es blanca.

5.º Por último, se demuestra que los siete colores del espectro forman el blanco por medio del disco de Newton, que es de cartón, de unos 35 centímetros de diámetro, en el cual así el centro como los bordes están cubiertos con papel negro, y en el intervalo se pegan varias tiras de papel rojas, anaranjadas, amarillas, verdes, azules, añiles y violetas, que van del centro a la circunferencia, de suerte que imitan circularmente cinco espectros sucesivos por la naturaleza de los colores y por su extensión relativa ([fig. 323](#)). Dando a este disco un movimiento rápido de rotación, recibe simultáneamente la retina la impresión de los siete colores del espectro, y entonces aparece blanco el disco ([fig. 324](#)), o por lo menos blanco agrisado, porque los colores que lo cubren no son exactamente los del espectro.

473. Teoría de Newton sobre la composición de la luz y sobre el color de los cuerpos. -Newton fue el primero que descompuso la luz blanca por medio del prisma, recomponiéndola después. De los diversos experimentos que hemos dado a conocer, dedujo que la luz blanca no es homogénea, sino que consta de siete luces desigualmente refrangibles, que denominó luces *simples* o *primitivas*, y que, en virtud de su diferente refrangibilidad, se separan al atravesar el prisma.

Según esta teoría, los cuerpos descomponen también la luz por reflexión, no dependiendo su color propio más que de su poder reflejante respecto a los distintos colores simples. Los que los reflejan todos, en las proporciones que tienen en el espectro, son los blancos, en cambio los negros no reflejan ninguno. Entre estos dos límites extremos se presentan una infinidad de matices, según reflejan los cuerpos más o menos ciertos colores simples y absorban los demás. De suerte que los cuerpos no son colorados por sí mismos, sino por la clase de luz que reflejan. En efecto, si en una cámara oscura se ilumina sucesivamente un mismo cuerpo con cada una de las luces del espectro, no se nota en él color propio, pues como no puede reflejar más que la especie de luz que recibe, aparece rojo, anaranjado, amarillo... según el haz en el cual se halla situado. El color de los cuerpos varía también con la naturaleza de la luz. Tal es lo que puede notarse con la luz del gas y de las velas, que, por dominar en ellas el amarillo, comunican este matiz a los objetos que iluminan.

Tal es la teoría de Newton sobre la composición de la luz y la coloración de los cuerpos. Casi todos los físicos la admiten. Algunos, sin embargo, no aceptan siete colores simples. M. Brewster, profesor de Edimburgo, sólo reconoce tres, que son: el rojo, el amarillo y el azul. Habiendo analizado el espectro solar, mirándolo al través de las sustancias coloradas que no dan paso más que a ciertos colores absorbiendo los otros, notó este sabio que en todos los puntos del espectro había rojo, amarillo y azul. Fundado en esto, supuso que el espectro solar constaba de tres espectros superpuestos, de igual extensión, rojo el uno, amarillo el otro y azul el tercero, y que todos tres tienen su máximo de intensidad en diferentes puntos, resultando de aquí las diversas tintas. Los físicos franceses no han adoptado esta teoría.

474. Colores complementarios. -Denominó Newton *colores complementarios*, los que, reunidos, forman el blanco. El verde es complementario del rojo violado, el azul del anaranjado, el violeta del amarillo. Un color cualquiera tiene siempre su color complementario, porque, no siendo blanco, le faltan algunos de

los colores del espectro para formar la luz blanca. La mezcla de éstos debe dar, pues, uno complementario del primero.

475. Propiedades del espectro. -Distínguense en los colores del espectro propiedades iluminantes, caloríficas y químicas.

1.º *Propiedades luminosas.* -De los experimentos de Fraunhofer y de Herschell se deduce que en el amarillo existe el máximo de intensidad de la luz y el mínimo en el violeta.

2.º *Propiedades caloríficas* -La intensidad del calor refractado, juntamente con los rayos solares, varía en el espectro. Leslie fue el primero que patentizó que crece del violeta al rojo; Herschell puso el máximo en la faja oscura que termina el rojo; y Bérard, en el mismo rojo. Seebeck explicó esta diferencia en los resultados, por la naturaleza del prisma refringente. Con un prisma de agua, encontró el máximo en el amarillo; con uno de alcohol, en el amarillo anaranjado; y por fin, con uno de crown, en el rojo.

Melloni ha confirmado los experimentos de Seebeck por medio de su termo-multiplicador, observando, además, que el máximo de calor se aleja tanto más del amarillo hacia el rojo, cuanto más diatérmica es (375) la sustancia del prisma. Con uno de sal gema, que es el cuerpo más diatérmico, está el máximo enteramente más allá del rojo.

3.º *Propiedades químicas.* -En muchísimos fenómenos actúa la luz solar como un agente químico. Por ejemplo, el protocloruro de mercurio y el cloruro de plata se ennegrecen por la acción de la luz; el fósforo diáfano se vuelve opaco; y los principios colorantes de origen vegetal se destruyen. Basta igualmente la luz para determinar combinaciones, como la del cloro con el hidrógeno; y por fin, contribuye en primer término para la producción de la materia verde en las plantas. Sin embargo, no todos los diversos colores del espectro poseen la misma acción química; pues Scheele demostró que el rayo violado obra más enérgicamente que los otros sobre el cloruro de plata. Wollaston observó igualmente, que esta acción se extendía fuera del espectro visible, con la misma intensidad que en el violeta, circunstancia que le hizo suponer que, además de los rayos que actúan sobre la retina, hay otros que no se ven y que son más refrangibles. Los rayos que poseen la propiedad de determinar reacciones entre los elementos de los cuerpos, han recibido el nombre de *rayos químicos*.

M. Edmundo Becquerel ha descubierto también en el espectro, dos especies de rayos, que llama *continuos* los unos, y *fosforogénicos* los otros. Los primeros no ejercen acción química por sí mismos, pero la continúan una vez comenzada; y los segundos vuelven luminosos a ciertos cuerpos, el sulfuro de bario, por ejemplo, en la oscuridad, después de expuesto por algún tiempo a la luz solar. M. Ed. Becquerel, notó que el espectro fosforogénico se extiende desde el añil hasta mucho más allá del violeta.

476. Rayas del espectro. -No son continuos los diversos colores del espectro solar. Faltan los rayos para muchos grados de refrangibilidad, resultando de aquí, en toda la extensión del espectro, muchas fajas oscuras muy estrechas, denominadas *rayas del espectro*. Para observarlas, se recibe un haz de luz solar por una abertura muy angosta de la cámara oscura; y a la distancia de 3 a 4 metros, se mira dicha abertura al través de un prisma de flint sin estrías y con las aristas paralelas a los bordes de la hendidura. Obsérvanse entonces varias rayas negras muy tenues, paralelas a las aristas del prisma, y muy desigualmente espaciadas. Si se mira el espectro con una lente acromática, pueden llegar a contarse hasta seiscientas rayas, pero hay siete más visibles que las restantes, y denominadas *rayas de Fraunhofer*, por ser éste el nombre del físico que primero las observó. Con la luz solar tienen posiciones fijas estas rayas, de suerte que puede medirse con precisión el índice de cada color simple. En los espectros de una luz artificial o de la de las estrellas, varía la posición relativa de las rayas; y con la luz eléctrica, reemplazan rayas brillantes a las oscuras.

La [figura 325](#) representa el espectro originado por la luz solar, pero en el cual se han conservado las rayas principales. Las siete rayas fijas se encuentran marcadas en B, C, D, E, F, G, H. Los puntos B y C se encuentran en el rojo; D, en el color amarillo anaranjado; E, en el verde; F, en el azul; G, en el añil, y H en el violeta. Existen además otras rayas notables, tales como *a* en el rojo, y *b*, en el verde.

477. Colores de los objetos vistos al través de los prismas. -Cuando se mira un cuerpo al través de un prisma, parece que las porciones de su contorno paralelas a las aristas se hallen coloreadas con las tintas

del espectro. Este fenómeno se explica por la desigual refrangibilidad de los rayos luminosos reflejados por el cuerpo. Si se mira, por ejemplo, una faja muy estrecha de papel blanco pegada sobre cartón negro, con un prisma cuyas aristas le sean paralelas, aparece coloreada esta faja con todos los colores del espectro, encontrándose el violeta el más desviado hacia el vértice. En este experimento, la luz blanca, reflejada por la tira de papel, se descompone al pasar por el prisma, y la violada, que es la más refrangible, se desvía más, por lo que aparece a mayor altura.

Si, en vez de ser estrecha la faja de papel, cuenta cierta latitud, queda blanca en toda su parte media, y sus bordes paralelos a las aristas del prisma son los únicos coloreados, de violeta con mezcla de azul, y de añil los que se hallan más próximos al vértice, y de rojo con mezcla de anaranjado y amarillo los que menos distan de la base. Se explica este fenómeno suponiendo dividida la tira de papel en porciones paralelas muy estrechas, pues cada una de estas dará, como en el primer caso, un espectro completo. Como el segundo espectro está algo más bajo que el primero, el tercero más que el segundo, y así de los demás, resulta de aquí una superposición sucesiva de todos los colores simples que produce el blanco, menos hacia los bordes, en los cuales no es completa la superposición, permaneciendo aislados, el violeta por un lado, y el rojo por otro.

El prisma nos ofrece un medio para analizar el color de un cuerpo, pues se corta una tirita estrecha de éste, se la pega sobre un fondo negro y se la ilumina enérgicamente. Mirándola entonces, a la distancia de uno o dos metros, con un prisma, se descompone en sus elementos la luz reflejada sobre el cuerpo, y se ve cuáles son los colores simples de que consta su color propio. Así se ha averiguado que el color de todos los cuerpos es compuesto. Los pétalos de las flores, por ejemplo, ofrecen siempre un espectro matizado de varios de los colores del espectro solar.

478. Aberración de refrangibilidad. -Las lentes que acabamos de describir (459) tienen el inconveniente de dar, a cierta distancia del ojo, imágenes de contornos irisados. Este defecto, sensible sobre todo en las convergentes, depende de la desigual refrangibilidad de los colores simples (474), y se designa con el nombre de *aberración de refrangibilidad*. En efecto, como podemos comparar las lentes a una serie de prismas de caras infinitamente pequeñas, reunidos por sus bases, no sólo refractan la luz, sino que la descomponen de la propia manera que el prisma. Resulta de esta dispersión, que las lentes tienen en realidad, siete focos distintos, uno para cada color del espectro. En las convergentes, por ejemplo, los rayos rojos, que son los menos refrangibles, van a formar su foco en un punto  $r$ , situado sobre el eje de la lente ([fig. 326](#)), mientras que los violados, que se refractan más, concurren en uno más cercano. Entre estos dos límites se forman los focos anaranjado, amarillo, verde, azul y añil. La aberración de refrangibilidad es tanto más sensible, cuanto más convexas son las lentes y cuanto más lejano del eje está el punto de incidencia de los rayos que las atraviesan porque entonces se hallen más inclinadas entre sí las caras de incidencia y de emergencia. Réstanos dar a conocer de qué modo se corrige la aberración de refrangibilidad en los instrumentos de óptica.

479. Acromatismo. -Combinando varios prismas de diferente ángulo refringente (452) y de sustancias desigualmente dispersivas (470), se ha conseguido refractar la luz blanca sin descomponerla. Igual resultado se obtiene con lentes de distintas sustancias pero de curvaturas convenientemente combinadas. Como los contornos de los objetos vistos al través de los prismas o de las lentes así formadas no aparecen irisados, se dice que son *acromáticas*, denominándose acromatismo, el fenómeno de la refracción de la luz sin dispersión.

La observación del fenómeno de la dispersión de los colores con prismas de agua, de esencia de trementina y de crown-glass, indujo a Newton a admitir que era proporcional la dispersión a la refracción, deduciendo de este hecho que no era posible la refracción sin dispersión, y de consiguiente, que era imposible el acromatismo. Más de medio siglo trascurrió hasta hacerse evidente el error de Newton. El inglés Hall construyó por primera vez, en 1733, varias lentes acromáticas, pero no dio al público su descubrimiento. El óptico Dollond, de Londres, demostró en 1757, que yuxtaponiendo dos lentes, bi-convexa de crown-glass la una, y cóncavo-convexa, pero de flint, la otra ([fig. 327](#)), se obtenía una lente sensiblemente acromática.

Para explicar este resultado, sean dos prismas BFC y CDF yuxtapuestos y vueltos en sentido contrario ([fig. 328](#)). Si suponemos primero que consten de una misma sustancia estos prismas, como el ángulo refringente CFD del segundo es menor que el BCF del primero, producirán ambos prismas el mismo efecto que uno único BAF, es decir, que no sólo se desviará, sino que se descompondrá la luz blanca que

los atraviese. Por el contrario, si el primer prisma BCF fuese de crown y el segundo de flint, se puede anular la dispersión sin oponerse a la refracción. Efectivamente, siendo el flint más dispersivo que el crown y disminuyendo la dispersión producida por un prisma con el ángulo refringente de éste (470), resulta que, reduciendo convenientemente este ángulo CFD del prisma de flint con relación al BCF del de crown, se llega a igualar el poder dispersivo de estos prismas, y como, según su posición, se efectúa la dispersión en sentido contrario, llega a compensarse, es decir, que los rayos emergentes EO van a ser sensiblemente paralelos, y dan, por lo tanto, luz blanca. Con todo, como la relación de los ángulos BCF y CFD, que conviene al paralelismo de los rayos rojos y violados, por ejemplo, no sirve para los intermedios, es claro que con dos prismas no se puede, en realidad, acromatizar más que dos de los rayos del espectro. Para obtener el acromatismo perfecto se necesitarían siete prismas de sustancias desigualmente dispersivas y de ángulos refringentes convenientemente determinados.

Respecto a la refracción, no queda corregida al mismo tiempo que la dispersión, pues esto sería preciso que variase el poder refractivo de los cuerpos, conforme supuso Newton, en la misma relación que su poder dispersivo, lo cual no es exacto. Por lo tanto el rayo emergente EO no se emite paralelo al incidente SI, y hay una desviación sin descomposición sensible.

Se forman las lentes acromáticas con dos lentes de sustancias desigualmente dispersivas. Una de ellas A, de flint, es cóncavo-convexa divergente ([fig. 327](#)), y la otra B, bi-convexa, de crown-glass, y con una cara que puede coincidir exactamente con la cara cóncava de la primera. Lo mismo con las lentes que con los prismas, se necesitarían siete vidrios para obtener el acromatismo perfecto; pero bastan dos en todos los instrumentos de óptica, dándoles la curvatura necesaria para acromatizar los rayos rojos y los amarillos.

480. Absorción de la luz por los medios transparentes. -No se conoce sustancia alguna perfectamente transparente, pues el vidrio, el agua, y el mismo aire debilitan gradualmente la luz que los cruza, y si poseen un espesor suficiente, pueden debilitarla bastante estos medios, para que deje de actuar sobre la retina. Se observa, en efecto, que muchas estrellas no visibles desde las llanuras, aun cuando esté muy puro el cielo, lo son al subir a altísimas montañas.

Esta pérdida gradual que experimenta la luz al atravesar los medios diáfanos, se denomina *absorción*, y reconoce por causa la reflexión sobre las moléculas de los cuerpos transparentes. Si todos los rayos simples fuesen igualmente transmisibles al través de los medios diáfanos, serían éstos incoloros; pero jamás acontece así, lo cual nos manifiesta que como los cuerpos diatérmanos no se dejan atravesar igualmente por los diversos rayos caloríficos (281), de la propia manera los diáfanos permiten el paso con mayor facilidad, a cierta clase de rayos luminosos que a los demás. El medio toma entonces el color para el cual es más diáfano; y por eso nos parece azul el aire en grandes masas, y verde una lámina gruesa de vidrio El vidrio colorado de rojo por el protóxido de cobre, no da paso más que a los rayos rojos, y absorbe todos los demás, aunque sea muy delgado.

Por un efecto de absorción, los rayos solares son menos intensos cuando se halla este astro en el horizonte, que cuando se encuentra en el cenit, porque entonces es mucho más considerable el espesor de la atmósfera.

△

## Capítulo V

▽△

### Instrumentos de óptica

481. Diversos instrumentos de óptica. -Denomínanse instrumentos de óptica unas combinaciones de lentes, o de lentes y de espejos, que pueden dividirse en tres grupos, según los usos para los cuales se destinan, a saber: 1.º los instrumentos que no tienen más objeto que amplificar las imágenes de los cuerpos que no es fácil examinar a la simple vista por sus pequeñísimas dimensiones, son los *microscopios*; 2.º los que sirven

para observar los astros o los objetos muy lejanos, son los *telescopios* o los *anteojos terrestres*, y 3.º los que se han apropiado para producir sobre una pantalla imágenes reducidas o amplificadas, que se pueden utilizar en el dibujo o manifestar a numerosos observadores: tales son la *cámara lúcida*, o *clara*, la *oscura*, el *daguerrotipo*, la *linterna mágica*, la *fantasmagoría*, el *megascopo*, el *microscopio solar* y el *microscopio fotoeléctrico*. Los dos primeros grupos no ofrecen más que imágenes virtuales, y el último reales; exceptuando la cámara clara.

482. Microscopio simple. -Existen dos especies de microscopios, que son: el simple y el compuesto. El *simple* consta de una sola lente convergente, o de muchas lentes superpuestas que obran como una sola. Se ha visto ya (464, 2.º) que, en el microscopio simple o lente, el objeto que se observa se halla situado entre ésta y su foco principal, y que entonces la imagen es virtual, directa y ampliada ([figura 313](#)).

Diferentes disposiciones se han dado al microscopio simple; la de la [fig. 329](#) representa la que admitió Raspail. Un sostén horizontal que puede subir o bajar por medio de una barra dentada y de un piñón con botón D, posee una capsulita A en cuyo centro se halla engastada una lente *o* más o menos convexa. Debajo está el porta-objeto fijo B, que sostiene al objeto situado entre dos láminas de vidrio C. Como ha de estar muy iluminado el objeto, se recibe la luz difusa de la atmósfera sobre un reflector cóncavo de vidrio M, que se inclina de manera que los rayos reflejados vayan a proyectarse sobre el objeto. Se usa este microscopio aplicando el ojo muy cerca de la lente, que se sube o baja hacia el objeto, hasta encontrar la posición en que con más limpieza se presenta la imagen.

Varias lentes de recambio permiten variar el aumento, pero entre ciertos límites, si desea conservarse bien distinta la imagen. Con el microscopio simple se obtiene un aumento muy claro hasta 120 veces en diámetro. Se puede determinar por medio del cálculo el aumento (469), o bien de un modo experimental, sirviéndose del micrómetro (484).

483. Microscopio compuesto. -El *microscopio compuesto*, reducido a su mayor sencillez, consta de dos vidrios lenticulares convergentes, el uno de foco corto, llamado *objetivo*, porque está vuelto hacia el objeto, y el otro menos convergente, denominado *ocular*, porque se encuentra cerca del ojo del observador.

La [figura 330](#) representa la marcha de los rayos luminosos y la formación de la imagen en el microscopio compuesto, reducido a dos vidrios. Situado un objeto AB muy cerca del foco principal del objetivo M, pero un poco más allá con relación a este vidrio, una imagen *ab* real, invertida y muy ampliada, va a formarse al otro lado del objetivo (464, 1.º). La distancia de los dos cristales M y N es tal, que la imagen *ab* se halla entre el ocular N y su foco F. Resulta de aquí que, para el ojo situado en E, que mira esta imagen con el ocular, produce este último vidrio el efecto del microscopio simple o lente (464, 2.º), y sustituye a la imagen *ab* una segunda imagen *a'b'*, que es virtual y está nuevamente ampliada. Esta segunda imagen, recta con relación a la primera, es invertida relativamente al objeto. Puede decirse, pues, en último término, que el microscopio, compuesto no es más que el microscopio simple aplicado, no ya al objeto, sino a su imagen ampliada por una primera lente.

484. Aumento, micrómetro. Llámase *aumento*, en todo instrumento de óptica, la relación del tamaño absoluto de la imagen con el del objeto. El aumento, en el microscopio compuesto, es el producto de los aumentos respectivos del objetivo y del ocular, es decir, que, si el primer vidrio aumenta 20 veces y el otro 10, el aumento definitivo es de 200. Depende el aumento de la mayor o menor convexidad del objetivo y del ocular, así como de la distancia de estos dos vidrios combinada con la del objeto al objetivo. Ha llegado a 1500 y más el aumento que ha experimentado el diámetro del objeto; pero entonces pierde la imagen en claridad lo que gana en extensión. Para obtener imágenes claras y bien iluminadas, no debe exceder el aumento de 500 a 600 en diámetro, lo cual da en superficie, una imagen 250 a 360 mil veces mayor que el objeto.

El aumento se mide experimentalmente por medio del *micrómetro*, que consiste en una laminita de vidrio, sobre la cual se han trazado con diamante rayas paralelas, distantes entre sí  $\frac{1}{10}$  o  $\frac{1}{100}$  de milímetro. Se coloca el micrómetro delante del objetivo, y luego, en vez de recibir directamente en el ojo los rayos que emergen del ocular O, se proyectan sobre una lámina de vidrio de caras paralelas A ([fig 331](#)), inclinada según 45 grados, sobre la cual se aplica la vista de modo que se vea cómo se forma por reflexión la imagen de las rayas del micrómetro sobre una escala dividida en milímetros, trazada sobre una pantalla E. Contando entonces el número de divisiones de la escala que corresponde a cierto número de rayas de la imagen, se deduce el aumento. Por ejemplo, si la imagen ocupa en la escala 45 milímetros y comprende 15 rayas del micrómetro, suponiendo que el intervalo entre éstos sea de  $\frac{1}{100}$  de milímetro, el tamaño absoluto del objeto será  $\frac{15}{100}$  de milímetro; y como el de la imagen vale 45 milímetros, el aumento será el cociente de 45 por  $\frac{15}{100}$ , o 300. En este experimento, debe mediar entre el ojo y la pantalla E una distancia igual a la de la vista distinta, distancia que varía para cada observador, pero que, por término medio, es de 25 a 30 centímetros. Se determina también el aumento del microscopio por medio de la cámara lúcida, que describiremos en breve (492).

Conocido el aumento de un microscopio, es fácil deducir del mismo el grueso absoluto de los objetos situados delante del objetivo. En efecto, siendo el aumento el cociente del tamaño de la imagen por el del objeto, es claro que para obtener el de este último bastará dividir el tamaño de la imagen por el aumento. De esta suerte, fácilmente se averigua el diámetro de los glóbulos de la sangre, y en general de todos los objetos microscópicos.

485. Microscopio compuesto de Amici. -Hasta ahora sólo hemos dado a conocer (483) el principio del microscopio compuesto; pero en la actualidad debernos describir los principales accesorios de este aparato. Inventado hacia el año de 1620, ha recibido sucesivamente numerosos perfeccionamientos. Las modificaciones más importantes sólo datan de 30 años a esta parte, y se deben principalmente a M. Amici, en Italia, y a M. Carlos Chevalier, en Francia.

La [figura 332](#) representa, en sus partes esenciales, el microscopio conocido con el nombre de *microscopio de Amici* o *microscopio de C. Chevalier*. En los microscopios antiguos, el tubo H estaba siempre vertical y las lentes no eran acromáticas. M. Amici fue el primero que adoptó una disposición que permite, según se desee, que permanezca el tubo horizontal o vertical; y por primera vez, en 1823, aplicó M. C. Chevalier las lentes acromáticas al microscopio. El dibujo, al cual nos contraemos, representa el microscopio en la posición horizontal, que, en general, fatiga menos la vista, pero

también puede colocarse verticalmente. Se quita, al efecto, el tubo acodillado G, montando en su lugar sobre el objetivo E el gran tubo H, que posee el ocular. Por último, se puede dar igualmente al microscopio una posición inclinada, sacando un tornillo *m* que fija el aparato por su parte inferior, y haciendo mover todo el sistema sobre una charnela *a*, que une el microscopio con una columna cilíndrica que le sirve de apoyo.

Sobre un vástago rectangular paralelo a esta columna, se ve el *portaobjetos* B, el cual puede subir o bajar por medio de un piñoncito que engrana con una barra dentada, y que se pone en movimiento por un botón D. El objeto *o* que se quiere observar se halla situado entre dos láminas de vidrio C, colocadas sobre el porta-objetos. Un reflector cóncavo M, de vidrio, recibe la luz difusa de la atmósfera, y la refleja sobre el objeto que se encuentra así muy iluminado, condición indispensable a causa del aumento. Cuenta en su centro el porta-objetos una abertura que se ve al través de las láminas C, y que da paso a la luz proyectada por el reflector.

La [fig. 333](#) demuestra la posición de los vidrios y la marcha de los rayos en el microscopio. El objetivo E consta de una, de dos o de tres lentes acromáticas, como la representada en K, cuyas distancias focales principales son de 8 a 10 milímetros. El ocular AH ofrece dos lentes plano-convexas A y H, acromáticas o no. Fácil es seguir la marcha de la luz. Los rayos luminosos, después de reflejados sobre el espejo M, van a concurrir hacia el objeto, dirigiéndose luego hacia el objetivo E. Al cruzar éste, encuentran un prisma rectangular P, de cristal, sobre cuya hipotenusa experimentan una reflexión total (449). Tomando entonces la dirección del tubo GA, van a caer los rayos luminosos sobre la lente H, y forman, más allá, una imagen *a* real y amplificada del objeto. La última lente A funciona en seguida como microscopio simple, para sustituir a esta primera imagen otra virtual y amplificada *bc*, según indica la figura.

La lente intermedia H, llamada *ocular de Campani*, reconoce por objeto reunir los rayos demasiados oblicuos que no caerían sobre el ocular A y aumenta el *campo* del microscopio, haciendo la imagen más pequeña y más clara. Sirve también este vidrio para corregir el defecto de acromatismo que en mayor o menor escala presenta el objetivo. Los diafragmas *m* y *n* corrigen la aberración de esfericidad, interceptando los rayos que tienden a atravesar las lentes, próximos en demasía a sus bordes. A fin de anular toda reflexión interior que podría perjudicar la limpieza de las imágenes, se ennegrecen interiormente las paredes del tubo.

Según sea transparente u opaco el objeto, así se ilumina de distinto modo el microscopio. En el primer caso se efectúa, según hemos dicho, por medio de un reflector situado en la parte inferior del portaobjetos; en el segundo, se hace uso de una lente L, sostenida por el porta-objetos; y que concentra los rayos S' sobre el objeto.

Finalmente, posee el aparato muchos oculares y objetivos, a fin de aumentar o disminuir el aumento. Se obtiene también un aumento más débil, suprimiendo una y hasta dos de las lentes del objetivo.

El microscopio ha originado los descubrimientos más importantes de la botánica, de la zoología y de la fisiología. Se ha comprobado la existencia de animales hasta entonces desconocidos, en el vinagre, en la pasta de harina, en las frutas secas y en ciertos quesos; y han quedado patentes la circulación y los glóbulos de la sangre. Numerosas

son también las aplicaciones industriales del microscopio. Por ejemplo, él nos ofrece los medios de reconocer las diferentes especies de féculas, las falsificaciones harto frecuentes en las harinas, en los chocolates, etc.; y nos permite notar también en los tejidos, la presencia del algodón, de la lana y de la seda.

486. Anteojo astronómico. -El *anteojo astronómico* sirve para observar los astros, y consta de un objetivo y de un ocular convergentes, como el microscopio. El objetivo M ([fig. 334](#)) da del astro que se mira una imagen invertida  $ab$ , situada entre el ocular N y su foco principal; y este ocular, que hace el efecto de una lente de aumento, ofrece en seguida una imagen  $a'b'$  virtual, recta y muy amplificada de la imagen  $ab$ . Vese, pues, que el anteojo astronómico guarda bastante analogía con el microscopio; pero con la diferencia de que en este último, por hallarse el objeto muy cerca del objetivo, se forma la imagen mucho más allá del foco principal, y es muy amplificada (464, 1.º), de suerte que hay aumento por parte del objetivo y del ocular, mientras que en el anteojo astronómico, distando mucho el astro, son paralelos los rayos incidentes, y va a formarse la imagen en el foco principal del objetivo en menor escala que el objeto. El aumento sólo depende del ocular, y por eso ha de ser esta lente muy convergente.

La [fig. 335](#) representa un anteojo astronómico montado sobre un pie, según se fabrican en los talleres de los señores Lerebours y Secrétan. En su parte superior existe un pequeño anteojo llamado *indicador*. Los anteojos de gran poder amplificante no son, por su poco campo, de uso cómodo para buscar un astro, y por eso se mira primero con el indicador, cuyo campo es más vasto, es decir, que mayor extensión del cielo, observándose luego con el telescopio.

El cálculo manifiesta que, en el anteojo astronómico, el aumento es sensiblemente igual a  $CF/OF$  ([fig. 334](#)), siendo F el foco del objetivo M, y pudiendo suponerse que coincide aproximadamente con el foco del ocular N, de lo cual se deduce que el aumento es tanto más considerable, cuanto menos convergente es el objetivo y más el ocular. En un buen anteojo, no pasa el aumento de 1000 a 1200.

Cuando sirve el anteojo astronómico para medir con precisión, por ejemplo, la distancia de los astros al cenit, su ascensión recta o su paso por el meridiano, se le añade una *retícula*. Así se llaman dos hilos muy finos de metal o de seda, dispuestos en cruz en una abertura circular de una laminita metálica ([fig. 336](#)). Debe encontrarse la retícula en el sitio mismo en que se produce la imagen invertida que da el objetivo, y el punto de cruzamiento de los hilos en el eje óptico mismo del anteojo, que viene a ser así *la línea de mira*.

487. Anteojo terrestre. -El *anteojo terrestre* o de *larga vista* sólo difiere del astronómico en que las imágenes son directas. Se obtiene este resultado por medio de dos lentes convergentes P y Q ([fig. 337](#)), situadas entre el objetivo M y el ocular R. Si suponemos el objeto en AB, a mayor distancia que la que puede representar el grabado, va a formarse su imagen invertida y muy pequeña, en  $ba$ , al otro lado del objetivo. La segunda lente P se halla a una distancia tal, que su foco principal coincide con la imagen  $ab$ ; de donde resulta que los rayos luminosos que pasan por  $b$ , por ejemplo, aceptan, después de haber cruzado la lente P, una dirección paralela al eje secundario  $bO$  (460, 2.º y 463). De igual manera, los rayos que pasan por  $a$  toman una dirección paralela al eje  $aO$ . Después de haberse cruzado estos diversos rayos en H, atraviesan una tercera lente Q, cuyo foco principal coincide con el punto H. El haz  $BbH$  va a concurrir, pues,

en  $b'$ , sobre un eje secundario  $Ob'$ , paralelo a su dirección (463); y el AaH concurre del mismo modo en  $a'$ , produciéndose en  $a'b'$  una imagen recta del objeto AB. Esta imagen es la que se mira, como en el anteojo astronómico, con un ocular convergente R, situado de modo que se comporta como una lente de aumento, es decir, que su distancia a la imagen  $a'b'$  sea menor que su distancia focal principal, de donde resulta que da en  $a''b''$  una imagen virtual, directa y amplificada de la imagen  $a'b'$ . Las lentes P y Q, que no sirven más que para dar la posición directa a la imagen, están fijas en un tubo de cobre, a una distancia constante e igual a la suma de sus distancias focales principales. En cuanto al objetivo M, es móvil en un tubo, y puede acercarse o alejarse de la lente P, de modo que la imagen  $ab$  vaya siempre a formarse en el foco de esta lente, sea cual fuere la distancia del objeto. La distancia de la lente R puede variar también, en términos de que la imagen  $a''b''$  se forme a la distancia de la vista distinta (508).

El anteojo terrestre puede reemplazar al astronómico; pero es menester otro ocular que amplifique mucho más que en aquél. Con todo, los astrónomos prefieren el anteojo de dos lentes, porque absorbe menos luz.

En el anteojo terrestre el aumento es el mismo que en el astronómico, si bien suponiendo que tengan igual convexidad las lentes P y Q que sirven para dar la posición directa a las imágenes.

488. Oculares. -Hasta ahora, con la idea de simplificar la construcción de las imágenes, hemos supuesto generalmente que constaba el ocular de una lente convergente, según se ve en las [figuras 330, 334 y 337](#). Pero esto jamás sucede, ni en los microscopios, ni en los anteojos; porque con un ocular sencillo son considerables las aberraciones de esfericidad (467) y de refrangibilidad (478). Por eso es preciso construir oculares de muchas lentes. Según el número y la disposición de éstas, se admiten tres especies principales de oculares, que son el de Campani, el de Ramsden y el de Dollong.

Ocular de Campani. -El ocular de Campani, ([fig. 338](#)) consta de dos lentes plano-convexas, con las caras planas vueltas hacia el eje. El primer lente Q recibe los rayos que salen del objetivo, y concurre con él para dar en  $ab$  una imagen real e invertida del objeto situado más allá del objetivo. El ojo mira en seguida esta imagen con la lente R, que hace el oficio de un microscopio simple.

Se usa el ocular de Campani en los microscopios y en los anteojos astronómicos cuando carecen de retícula, es decir, cuando sólo sirven como anteojos de observación, y no como de paso, o murales. En este ocular la distancia focal de la lente R es igual al tercio de la Q, y la de las dos lentes Q y R vale la semi-suma de sus distancias focales.

Ocular de Ramsden. -El ocular de Ramsden ([fig. 339](#)) consta de dos lentes plano-convexas, cuyas convexidades se miran. La imagen real e invertida  $ab$  que da el objeto, se forma delante de la lente Q, y las dos lentes Q y R actúan juntas como un microscopio simple. Las distancias focales de las dos lentes son iguales, y están separadas entre sí por un intervalo igual a los dos tercios de sus distancias focales.

Se utiliza el ocular de Ramsden, en los anteojos astronómicos con retícula.

Ocular de Dollong. -Como en los *anteojos terrestres* o de *larga vista* ha de ser derecha la imagen, no pueden servir los oculares de Campani y de Ramsden, pues dan siempre, según sabemos, imágenes invertidas. Se obtienen éstas derechas, y al mismo tiempo acromáticas, por medio de un ocular cuádruple atribuido a Dollong.

Este ocular ([fig. 340](#)) consta de cuatro lentes plano-convexas. Las dos primeras Q y R tienen sus caras planas vueltas hacia el objetivo, y las otras dos S y T hacia el ojo. Siendo  $ab$  la imagen real e invertida que ofrece el objetivo, concurren las lentes Q, R y S a dar de esta primera imagen otra  $a'b'$  real y directa, que el ojo mira en seguida con la lente T. La tercer lente es la que, al combinarse con la R, contribuye

particularmente a atenuar las aberraciones de refrangibilidad y de esfericidad, haciendo menos divergentes los haces.

El hábil óptico M. Secrétan ha conseguido construir anteojos terrestres muy perfectos, acromatizando, además del objetivo, las lentes R y T, que son las que reciben los rayos incidentes en su mayor dispersión; y como ya se hallan muy reunidos cuando llegan a las Q y S, no hay inconveniente alguno en dejarlos de acromatizar.

Respecto a la disposición de las lentes Q, R, S, T entre sí, y en punto a la relación de distancias locales, ha adoptado M. Secrétan la regla empírica siguiente:

Representando por  $q$ ,  $r$ ,  $s$ ,  $t$ , las distancias locales respectivas de estas lentes, por  $d$  la de Q a R, por  $d'$ , la de R a S, por  $d''$  la de S a T, eligió para las lentes Q, R, S, T, vidrios cuyas distancias focales fuesen respectivamente entre sí, como los números 10, 11, 12 y 9, en seguida tomó  $d=2/3(q+r)$ ,  $d'=1/2(q+r+s+t)$ , y  $d''=2/3(s+t)$ .

Mediante esta combinación, obtiene M. Secrétan anteojos de larga vista, notables por la extensión del campo que abrazan, por su corta longitud y por la pureza de las imágenes.

489. Anteojo de Galileo. -El *anteojo de Galileo*, o el *anteojo de teatro*, es el más sencillo, porque sólo se compone de dos lentes, que son: un objetivo convergente M, y un ocular divergente R ([fig. 341](#)), ofreciendo inmediatamente una imagen derecha.

Estando representado el objeto por la recta AB, tiende a formarse su imagen en  $ba$ , invertida, real y más pequeña; pero, al atravesar el ocular R, se refractan los rayos emitidos de los puntos A y B, separándose respectivamente de los ejes secundarios  $bO'$  y  $aO'$ , que corresponden a los puntos  $b$  y  $a$  de la imagen. Resulta de aquí que estos rayos, prolongados en sentido contrario a su dirección, van a concurrir sobre estos ejes en  $a'$  y en  $b'$ ; y el ojo que los recibe ve, pues, en  $a'b'$ , una imagen derecha y amplificada, que parece más aproximada porque se ve según un ángulo  $a'O'b'$  mayor que el  $AO'B$  bajo el cual se ve el objeto. En cuanto al aumento, que es igual a la relación del ángulo  $a'O'b'$  con el  $AO'B$ , no excede comúnmente de dos a tres.

La distancia del ocular R a la imagen  $ab$  es sensiblemente igual a la distancia focal principal de este ocular, por lo que la separación de las dos lentes es la diferencia de sus distancias locales respectivas, por cuya razón el anteojo de Galileo es muy corto y muy portátil. Posee la ventaja de hacer ver los objetos en su verdadera posición, y además, como sólo consta de dos lentes, absorbe poca luz; pero, a causa de la divergencia de los rayos emergentes, es pequeño su campo, siendo necesario para utilizarlo, que se aplique el ojo muy próximo al ocular. Éste puede acercarse o alejarse del objeto, en términos de que la imagen  $a'b'$  se forme siempre a la distancia de la vista distinta.

Los *gemelos* o los anteojos de teatro son enteramente iguales al que acabamos de describir, sin más diferencia que la de ser dobles, a fin de formar una imagen en cada ojo, circunstancia que aumenta su brillo.

El anteojo de Galileo fue el primero que sirvió para observar los astros, y con él llegó a descubrir este ilustre astrónomo las montañas de la luna, los satélites de Júpiter y las manchas del sol.

Se ignora la época de la invención de los anteojos, pues unos atribuyen el descubrimiento a Rogerio Bacon, en el siglo XIII; otros a J. B. Porta, a fines del XVI, y

algunos, por fin, al holandés Jacobo Mecio, quien por casualidad había observado, hacia 1609 que combinando dos lentes, cóncavo el uno y convexo el otro, se veían mayores y más cercanos los objetos.

490. Telescopios. -Los *telescopios* son los instrumentos que sirven para ver los objetos lejanos, y particularmente los astros. El anteojo astronómico y el de Galileo son, por lo tanto, telescopios. Tal es el nombre que en un principio recibieron, pues se les designaba con el de *telescopios por refracción* o *telescopios dióptricos*; pero actualmente se entiende por telescopios unos aparatos en los cuales se utiliza al mismo tiempo la reflexión y la refracción, por medio de espejos y de lentes, para ver los objetos lejanos. Se han construido muchas especies de telescopios, pero los más conocidos son los de Gregory, de Newton y de Herschell.

1.º *Telescopio de Gregory*. -La [figura 342](#) representa un telescopio de Gregory montado sobre un pie, alrededor del cual puede girar e inclinarse más o menos. La [figura 343](#) manifiesta su corte longitudinal. Este telescopio, que se inventó hacia el año de 1650, consta de un largo tubo de cobre, cerrado en una de sus extremidades por un grande espejo cóncavo metálico M, que cuenta en su centro una abertura circular, por la cual pasan los rayos que se dirigen al ocular. Cerca de la otra extremidad del tubo existe un segundo espejo cóncavo N, metálico también, algo más ancho que la abertura central del grande espejo, y de un radio de curvatura mucho menor que el de éste. Los ejes de estos espejos coinciden con el del tubo. Estando en O el centro de curvatura del mayor, y en *ab* su foco, los rayos, tales como SA, emitidos por el astro, se reflejan sobre el espejo mayor, y van a formar en *ab* una imagen invertida y muy pequeña del astro. La distancia de los espejos y su curvatura respectiva son tales, que la imagen se halla entre el centro *o* y el foco *f* del espejo más chico; de donde resulta que los rayos, después de reflejados por segunda vez en N, forman en *a'b'* una imagen amplificada e invertida de *ab* (436), y de consiguiente, derecha con relación al astro. Por último, se mira esta imagen con un ocular P, de una o de dos lentes, para que la amplifique de nuevo y la haga ver en *a''b''*.

Como los objetos que se observan no siempre se hallan situados a la misma distancia, puede variar de posición el foco del espejo grande, y de consiguiente, el del pequeño. Además, no siendo igual para todos los ojos la distancia de la vista distinta, debe existir la posibilidad de poder situarse la imagen *a''b''* a diferentes distancias. A fin de tomar en consideración estas variaciones, es necesario alejar o acercar el espejo pequeño del grande, y al efecto existe un botón A ([fig. 342](#)), por medio del cual se hace girar una varilla que pone en movimiento, mediante el paso de un tornillo, una pieza B a la cual se halla fijo el espejo menor.

2.º *Telescopio de Newton*. -El telescopio de Newton difiere muy poco del de Gregory; el espejo mayor no se halla agujereado, y el pequeño, que es plano, se encuentra inclinado lateralmente según 45 grados hacia un ocular situado sobre uno de los lados del tubo del telescopio. La dificultad que presentan en su construcción los espejos metálicos había hecho abandonar generalmente los telescopios de Gregory y de Newton, cuando ha conseguido platear M. Foucault los espejos de vidrio con notable perfección, sin perder nada absolutamente en el grado de su pulimento. Al obtener este resultado, le ocurrió al momento al ilustre físico al cual nos referimos, la idea de aplicar dichos espejos al telescopio de Newton, que ha vuelto a usarse merced a este perfeccionamiento. Su

primer espejo sólo contaba 10 centímetros de diámetro, pero, después los ha construido sucesivamente de 33, de 42 y en la actualidad los fábrica de 80 centímetros de diámetro.

La [figura 343](#) representa un telescopio de Newton montado sobre su pie paraláctico, y la [figura 344](#) da a conocer su corte horizontal, el cual indica de qué suerte los rayos luminosos reflejados sobre el espejo parabólico plateado M, van a encontrar un pequeño prisma *mn*, que reemplaza al espejo plano inclinado según 45 grados, que se empleaba en el antiguo telescopio de Newton. Después de haber experimentado la reflexión total sobre la hipotenusa *mn*, los rayos van a formar en *ab* una imagen muy pequeña del astro que se observa. Esta imagen se examina en seguida con un ocular de cuatro lentes, dispuesto en uno de los costados del telescopio, y que según la intensidad de su aumento y la dimensión del espejo plateado, puede ofrecernos un aumento que varíe de 50 a 800.

En este instrumento el espejo hace las veces de objetivo sin ninguna aberración de refrangibilidad (478). Respecto a las aberraciones de esfericidad, veremos en breve cómo ha conseguido M. Foucault hacerlas desaparecer por medio de varias correcciones sucesivas que efectúa en el espejo.

Los espejos de vidrio de los nuevos telescopios se obtienen en la fábrica de Saint Gobain. Desde luego se desbastan y se amoldan a la curva esférica, en los talleres de M. Sautter, dedicados a la construcción de los faros, terminándose después en los de M. Secrétan; pero hasta hoy sólo M. Foucault ha podido darles su último grado de precisión, que obtiene este sabio renombrado, por su trabajo personal al pulirlos, por una serie sucesiva de pruebas ópticas y de correcciones parciales, consiguiendo de esta suerte el que no ofrezcan el menor defecto en su superficie, lo cual ocurre cuando es ésta la de un paraboloide. Sin embargo, M. Foucault ha notado que para corregir las aberraciones de esfericidad, originadas por el ocular, no debían contar los espejos con que ha dotado a la ciencia óptica, una superficie rigurosamente parabólica, y sí terminarse por una superficie experimental, que actuando de concierto con el sistema de lentes amplificadores del ocular, asegure la perfección de la imagen que resulta.

Después de haber pulimentado el espejo, es preciso platear su superficie cóncava: para efectuar esta operación recurre M. Foucault al procedimiento de Drayton, si bien algo modificado, inmergiendo el espejo en un baño de plata de una composición bastante compleja; a saber: agua destilada, alcohol puro, nitrato de plata fundido, nitrato amónico, amoníaco, goma gálbano, y esencia de clavo. El contacto del vidrio pulimentado reduce este baño; la plata se depone, y al cabo de 20 a 25 minutos, adquiere un espesor conveniente la capa de plata. Aunque ésta, así obtenida, se encuentra ya pulimentada y reflectante, se la dota de un pulimento perfecto por un frotamiento prolongado con una piel dada de óxido de hierro. Según la opinión de M. Foucault los espejos plateados, así pulimentados, reflejan el 75 por 100 de la luz incidente.

Los telescopios con espejos de vidrios plateados y parabólicos, poseen sobre los antiguos telescopios con espejos esféricos de metal, la triple ventaja de ofrecer imágenes más puras, de ser de un peso menor y de contar una longitud más reducida, puesto que su distancia focal sólo es de seis veces el diámetro del espejo.

Expuestos estos detalles, pasemos a describir el aparato en su conjunto. El cuerpo del telescopio, que es de madera, posee la forma octogonal ([fig. 345](#)). Su extremo G se halla abierto y en el otro se encuentra el espejo. A contar desde este último y aproximadamente al tercio de su longitud, se encuentran fijos dos gorriones que se apoyan en dos cojinetes, sustentados por dos montantes de madera A y B, los cuales se hallan fijos en una mesa giratoria PQ, que da vueltas por medio de rodillos, sobre un plato fijo RS, orientado paralelamente al ecuador. En el contorno de la mesa giratoria existe un círculo de cobre dividido en 360 grados, y en la parte inferior, fijo en la mesa giratoria, se encuentra un engrane circular en el cual se ajusta un husillo sin fin V. Determinando la marcha de éste en cualquier sentido, por medio del manubrio *m*, se hace girar la mesa PQ y con ella el telescopio. Un nonius *x* adaptado al plato fijo RS, indica las fracciones de grado. Finalmente, sobre el eje de los gorriones se encuentra montado un círculo graduado O, que corresponde al círculo horario del astro que se observa, y que sirve por lo tanto para medir la *declinación* del mismo; es decir, su distancia angular al ecuador, sirviendo los grados trazados alrededor de la mesa RS para medir la *ascensión recia*, es decir, el ángulo que forma el círculo horario del astro, con un círculo horario elegido arbitrariamente.

Para fijar el telescopio en *declinación*, una pieza de cobre E, unida al montante A, posee una pinza en la cual resbala el limbo O, y que se aprieta por el tornillo de botón *r*. Finalmente, en el costado del aparato existe el ocular *o* montado sobre una placa de cobre de corredera, que posee igualmente el pequeño prisma *mn*, representado en el corte del aparato ([fig. 344](#)). Para situar la imagen en un punto adecuado, basta con adelantar o con hacer retroceder dicha placa por medio de una cremallera y de un botón *a*. El manubrio *n* sirve para *conectar* o *desconectar* el husillo V. El dibujo de la [figura 345](#) se ha sacado de un telescopio, cuyo espejo sólo cuenta 16 centímetros de diámetro y cuyo aumento es de 150 a 200.

Con el nuevo telescopio de vidrio plateado, se han realizado importantes observaciones, y es probable que el de 80 centímetros de diámetro, que se construye en estos momentos, será el germen de brillantes descubrimientos astronómicos.

3.º *Telescopio de Herschell*. -El telescopio de Herschell, atribuido también a Lemaire, consta de un solo reflector cóncavo M ([fig. 346](#)), y de un ocular *o*. Se halla inclinado el reflector sobre el eje, de manera que la imagen del astro que se observa va a formarse en *ab*, al lado del telescopio, cerca del ocular *o*, que da en seguida la imagen amplificada *a'b'*. Como no se reflejan más que una sola vez los rayos en este telescopio, es menor que en los dos anteriores la pérdida de luz, y la imagen se presenta más clara. El aumento es, como en el anterior, la relación de la distancia focal principal del espejo con la del ocular.

Los telescopios de reflexión se adoptaron en una época en que no sabía corregirse, en los objetivos, la aberración de refrangibilidad; pero, luego que se han construido objetivos acromáticos, se usan generalmente los telescopios dióptricos, es decir, de refracción únicamente, como los anteojos descritos (486, 487, 489).

491. Cámara oscura. -La *cámara oscura*, según indica su nombre, es una cámara completamente cerrada, menos por un orificio que deja paso a los rayos de luz ([fig. 255](#)). Entonces todos los objetos exteriores, cuyos rayos pueden atravesar el orificio, se

pintan en la pared opuesta con dimensiones reducidas y con sus colores naturales, pero hallándose invertidas las imágenes.

El físico napolitano Porta dio a conocer, en 1560, el fenómeno que produce un haz luminoso al penetrar en una cámara oscura. Poco después observó el mismo físico que, si en el orificio de la cámara oscura se fija una lente bi-convexa, y se coloca en el foco de ésta una pantalla blanca, la imagen gana extraordinariamente en brillo, en limpieza y en colorido, siendo admirable por su verdad. Estas imágenes se presentan tanto mejor iluminadas, cuanto mayor es la lente, aumentando sus dimensiones con la distancia focal.

Para servirse de la cámara oscura en el arte del dibujo, se le prestan diversas formas que la hagan portátil y que corrijan la inversión de las imágenes. La [figura 347](#) representa la *cámara oscura de corredera*. Consiste en una caja rectangular de madera, en la cual penetran los rayos luminosos R al través de una lente B, tendiendo a formar una imagen en la pared opuesta O, que debe distar de la lente B una longitud igual a su distancia local. Pero, como los rayos encuentran un espejo de vidrio M inclinado según 45 grados, mudan de dirección, y la imagen se forma en una pantalla de vidrio deslustrado N. Colocando sobre esta lámina un pliego de papel de calcar, es fácil recorrer con fidelidad los contornos de la imagen. La pantalla A intercepta la luz que ilumina la imagen y que impediría verla.

Consta la caja de dos partes que pueden penetrar una en otra, de modo que, tirando más o menos de la anterior, puede ir a formarse la imagen, después de la reflexión, exactamente sobre la lámina N, sea cual fuere la distancia del objeto que quiera dibujarse.

La [figura 348](#) representa otra clase de cámara oscura, conocida con el nombre de *cámara oscura de prisma*. En un estuche de cobre A existe un prisma triangular P ([figura 349](#)), que sirve a la vez de lente convergente y de espejo, pues, siendo plana una de sus caras, tienen las otras una curvatura tal, que por sus refracciones combinadas a la entrada y a la salida de los rayos, producen el efecto de un menisco convergente C ([fig. 302](#)). Resulta de aquí que los rayos emitidos por un objeto AB, después de haber penetrado en el prisma y experimentado en la cara *cd* la reflexión total, van a formar en *ab* una imagen real de AB.

Ahora bien; correspondiendo el tablero B ([fig. 348](#)) al foco del prisma contenido en el estuche A, se produce la imagen de los objetos exteriores en un pliego de papel que se extiende sobre este tablero. Hallándose envuelto todo por una cortina negra, y colocándose debajo el dibujante, se halla por completo en la oscuridad. Se quita el tablero cuando así se desea y se doblan los pies por medio de charnelas, de suerte que es muy portátil este aparato, del cual somos deudores a M. C. Chevalier.

492. Cámara clara. -La *cámara clara* ó *cámara lúcida* es un aparatito que sirve para obtener la imagen fiel de un paisaje, de un monumento o de cualquiera otro objeto. Wollaston fue quien ideó el primer aparato de este género, en 1804. La cámara clara de este físico consiste en un pequeño prisma de vidrio de cuatro caras, cuya sección perpendicular a las aristas representa la [fig. 350](#). El ángulo A es recto, el C de 135 grados, y cada uno de los B y D de 67 y medio. Se apoya este prisma sobre un pie, en el cual puede subir, descender y girar más o menos alrededor de un eje paralelo a sus

aristas. Vueltos la cara AB hacia el objeto cuya imagen se busca, caen los rayos casi perpendiculares sobre esta cara, penetrando en ella sin refracción sensible, y experimentando la reflexión total sobre la cara BC; porque, siendo normal a ésta la línea  $ab$ , se reconoce fácilmente que el ángulo de incidencia  $Lna$  y el  $B$  son iguales, por tener sus lados perpendiculares; y, supuesto que el  $B$  reconoce por valor  $67$  grados y medio, el  $anL$ , es mayor que el ángulo límite del vidrio ( $449$ ), que es la condición necesaria para que se efectúe la reflexión total. Llegados a  $o$  los rayos, sufren también la reflexión total, y salen muy cerca del vértice  $D$ , siguiendo una dirección sensiblemente perpendicular a la cara  $DA$ , de suerte que el ojo que recibe estos rayos, ve en  $L'$  la imagen del objeto  $L$ . Siguiendo entonces los contornos de la imagen con un lápiz, se obtiene un dibujo muy exacto; pero la dificultad, y no pequeña, está en ver a un tiempo la imagen y la punta del lápiz, porque los rayos que proceden del objeto dan una imagen que dista más del ojo que del lápiz. Se corrige este defecto interponiendo entre el ojo y el prisma una lente  $I$ , que da la misma convergencia a los rayos que emanan del lápiz y a los que origina el objeto; pero aun así es preciso aplicar el ojo muy próximo al borde del prisma, de modo que la abertura pupilar se halle dividida en dos partes, una de las cuales ve la imagen, y la otra el lápiz.

M. C. Chevalier ha introducido mejoras importantes en la cámara clara de Wollaston. Como la imagen o el lápiz cesa de ser visible distintamente, cuando es demasiado desigual la luz que los ilumina, ha adaptado al instrumento unos vidrios de color, que se interponen, ya en el lado del objeto, ya en el del lápiz, y que, interceptando parte de la luz, presta mayor uniformidad a su distribución.

M. Amici ha ideado una cámara clara que es preferible a la de Wollaston, pues permite al ojo mayor campo, sin dejar de ver la imagen y el lápiz, circunstancia que no se cumple en el aparato que acabamos de describir. La cámara clara de Amici se compone de un prisma rectangular  $ABC$  (fig. 351), de vidrio, con una de las caras del ángulo recto vuelto hacia el objeto que se mira, perpendicular otra a una lámina de vidrio inclinada  $mn$ . Los rayos  $LI$  emitidos por el objeto, y que penetran en el prisma, sufren la reflexión total en su lado mayor, y salen siguiendo la dirección  $KH$ . Reflejándose entonces parcialmente sobre la lámina de vidrio, forman en  $L'$ , para el ojo que los recibe, una imagen virtual del objeto  $L$ . El ojo que ve esta imagen, puede percibir perfectamente al mismo tiempo un lápiz al través de la lámina de vidrio, con lo cual salen los dibujos con suma precisión.

▽△

## Fotografía

493. Daguerrotipo. -El *daguerrotipo*, así denominado en memoria del nombre de su inventor, es un aparato que sirve para fijar, sobre sustancias *sensibles* a la luz, las imágenes que forman las lentes convergentes en la cámara oscura (491). El arte de producir así las imágenes de los objetos por la acción de la luz, ha recibido el nombre de *fotografía*. Hoy día se conoce la fotografía sobre placas metálicas, sobre papel y sobre vidrio.

El célebre químico sueco Scheele había observado, en 1770, que el cloruro de plata, que se conserva blanco en la oscuridad, se ennegrece por la acción de la luz. Merced a esta propiedad del cloruro de plata, ya se podían reproducir grabados; porque si sobre un pliego de papel, cubierto por esta sustancia, se aplica un grabado y se expone el todo a la luz solar, de modo que intercepte ésta las partes negras del grabado, sólo se ennegrece el papel clorurado en los puntos que corresponden a los claros del dibujo, quedando los otros blancos. En la copia así obtenida están, pues, invertidas las tintas, es decir, que las oscuras son claras, y vice-versa. Tiene, además, esta copia el defecto de no poder conservarse más que en la oscuridad, porque luego que se expone a la luz se ennegrece por completo y desaparece.

Había, pues, que producir imágenes sin inversión de claro y oscuro, y además fijarlas, es decir, hacerlas insensibles, una vez formadas, a la acción de la luz. Charles, en Francia, Wedgwood y Davi, en Inglaterra, trataron de resolver este problema; pero al fin alcanzaron este resultado Niépce y Daguerre. Después de constantes y no interrumpidas investigaciones desde 1814 a 1829, consiguió el primero de dichos físicos formar, sobre una placa de cobre cubierta por una capa de plata, una imagen inalterable a la luz, y en la cual las tintas claras u oscuras ocupaban el mismo sitio que en el objeto. Pero, según el procedimiento de Niépce, en el cual la sustancia impresionable era el betún de Judea, sumergido en seguida en una mezcla de petróleo y de aceite de espliego, debía prolongarse durante 10 o 12 minutos la acción de la luz, circunstancia completamente impracticable respecto a los retratos.

Niépce comunicó, en 1829, su procedimiento a Daguerre, conocido ya por la invención del *diorama*, y que a su vez se dedicaba igualmente hacía muchos años a las mismas investigaciones; pero sólo después de diez años de continuas tareas dio a conocer Daguerre, en 1839, el admirable descubrimiento que tanto llamó la atención en Francia y en el extranjero. Ya hacía tres años que Niépce había muerto, y por lo tanto no pudo recoger la parte de gloria que con tanta justicia le correspondía, en el descubrimiento que nos ocupa.

Cinco operaciones principales constituyen el procedimiento de Daguerre, a saber: 1.º el pulimento de la placa delgada, de cobre cubierta con una capa de plata, sobre la cual debe formarse la imagen; 2.º la deposición sobre esta placa de la *capa sensible*, es decir, de la sustancia que la hace impresionable a la luz; 3.º la exposición de la placa, en la cámara oscura, a la acción de la luz; 4.º la exposición de la misma placa a los vapores mercuriales que hacen aparecer la imagen, y 5.º la fijación de la imagen.

El pulimento de la placa es una operación muy interesante, como que de ella depende el éxito de la operación. Se principia con algodón ligeramente impregnado de alcohol y espolvoreado con trípoli; y se termina en seguida, con rojo de Inglaterra y con un bruñidor de cuero. Ya pulimentada la placa, se expone, durante unos dos minutos, en una pequeña caja rectangular, al vapor del iodo que reacciona sobre la plata de la placa, y que la trasforma, superficialmente tan sólo, en ioduro de plata. Se conoce que se halla suficientemente iodurada la placa, cuando adquiere un hermoso color amarillo de oro que principia a pasar al rojo en los bordes. En este caso ya puede recibir la placa la acción de la luz, pero tan sólo para tomar vistas o efectuar copias; pues para los retratos es inútil, por ser necesaria, para que la impresione, la acción de la luz durante 8 a 10 minutos. Hay que someterla, por lo tanto, a la acción de sustancias *aceleratrices*, es decir, que exalten la sensibilidad de la capa de ioduro, en términos de que la imagen no

tarde más que algunos segundos en formarse. Estas sustancias son una disolución acuosa de bromo, o de bromuro sólido de cal. Se expone la placa a la acción de los vapores de una de las dos sustancias enumeradas, durante 30 segundos o un minuto, hasta que adquiera un color tan rojo como sea posible, pero sin pasar al violeta. Bromurada ya la placa, se la lleva a la caja que contiene el iodo, en donde se la deja *exactamente* la mitad del tiempo que permaneció en ella por primera vez.

Dispuesta así la placa, es muy impresionable a la acción de la luz. Por lo mismo se practican todas estas operaciones en un sitio de escasa luz, y luego de terminadas, se deja tapada la placa en un bastidor de madera, en el cual se cubre, por el lado plateado, con una pantalla de madera de corredera, dispuesta de suerte que pueda correrse cuando se quiera, y por el otro, con un pequeño postigo de gozne que se dobla sobre la plancha manteniéndola fija sobre el bastidor. En tal estado se sitúa la placa en una pequeña cámara oscura portátil de madera ([fig. 352](#)), que es la que vulgarmente se denomina daguerrotipo.

Esta pieza, que consta de una parte fija C y de otra móvil B, es una verdadera cámara oscura de corredera (491). Se coloca en un tubo de cobre A el objetivo, que es una lente convergente acromática, que se acerca o se aleja por medio de una barra dentada, y de un piñoncito que se hace girar con la mano por medio de un vástago con botón D. La pared opuesta al objetivo es una lámina de vidrio deslustrado, fija en un marco E, que se quita cuando conviene. Si se desea sacar un retrato, se sienta el modelo o el original a 4 o 5 metros delante del objetivo, y luego se tira de la caja móvil B hasta que la imagen que se produce, invertida sobre la lámina de vidrio, aparezca con limpieza, lo cual se verifica cuando la lámina se encuentra en el foco, circunstancia que acaba de conseguirse alejando o acercando el objetivo por medio del botón D. En los retratos se procura situar los ojos de la persona que se retrata en el foco, por ser la parte más central del rostro.

Encontrado ya el foco, sin mover la cámara, se quita el marco E la pantalla de vidrio, y se pone en su lugar el bastidor con la placa iodurada; retirando finalmente la pantalla de corredera, que cubre la cara plateada de la placa, la imagen que se formaba sobre el vidrio va a efectuarlo actualmente en aquélla. Entonces produce la luz su misteriosa acción, dibujando sobre la placa una imagen invisible. El tiempo de la exposición varía con el objetivo, con la preparación de la capa sensible y con la intensidad de la luz, de modo que puede variar entre 8 y 50 segundos. Si se prolonga demasiado la exposición a la luz, será blanca la prueba, y negra, si ha sido muy corta.

Llegado el momento de que cese la acción de la luz, el cual sólo se conoce con una gran práctica, se tapa de nuevo la placa con la pantalla de corredera, y se saca el marco en el cual se encuentra en completa oscuridad la placa, circunstancia que es igualmente indispensable antes de introducirla en la cámara oscura. En este momento no se nota en la placa vestigio alguno de la imagen, de suerte que, para que se haga ésta visible, hay que exponerla a la acción de los vapores de mercurio, según una inclinación de 45 grados, en la parte superior de una caja de madera dispuesta al efecto, y en cuyo fondo, que es de palastro, existe una cavidad llena de mercurio. Éste, elevado a una temperatura de 60 a 75 grados, por medio de una pequeña lámpara de alcohol, emite vapores mercuriales, que se depositan con abundancia, en forma de imperceptibles gotitas, sobre las partes que han estado muy iluminadas, y a los pocos minutos se forma una amalgama de plata y de mercurio, que da los blancos, mientras que el resto

permanece negro por el mismo efecto del pulimento de la placa. Entonces es visible la imagen, y puede permanecer expuesta a la luz. Con todo, la placa aún se halla cubierta, sobre todo en las sombras, por una capa de ioduro de plata, que da a la prueba un tono rojizo o violáceo, que desaparece lavándola con una disolución de hiposulfito de sosa; pero la imagen no resiste la más leve fricción, lo cual tiende a probar que no se han amalgamado la plata y el mercurio.

A fin de corregir este defecto, queda aún por efectuar la operación que reconoce por objeto fijar la imagen, lavando la placa en una débil disolución de cloruro de oro y de hiposulfito de sosa. En esta operación se disuelve parte de la plata, mientras que una porción del oro se combina con el mercurio y con la plata de la placa. La amalgama de mercurio y de plata que constituye los blancos de la prueba, aumenta entonces en solidez y en brillo al combinarse con el oro, resultando de aquí que crece notablemente la intensidad de los claros de la imagen. A M. Fizeau somos deudores del empleo del cloruro de oro, que es el principal adelanto efectuado en el descubrimiento de Daguerre.

La [fig. 353](#) representa un corte del *objetivo*, es decir, del aparato que sirve para concentrar la luz sobre la placa y producir en ella la imagen. Consistía primero en una sola lente bi-convexa y acromática; pero no se tardó en adoptar objetivos de dos lentes acromáticas que se designan con el nombre de objetivos de vidrios combinados. Operan con más velocidad que los objetivos de un solo vidrio, tienen una distancia focal menor, y permiten encontrar con mayor facilidad el foco, lo cual se efectúa acercando o alejando la lente B, que está vuelta hacia el objeto, de la lente A, por medio de una barra dentada y de un piñón D.

494. Fotografía sobre papel. -En el procedimiento de Daguerre, que acabamos de describir, se producen inmediatamente las imágenes sobre placas metálicas; pero no así en la fotografía sobre papel, que comprende dos partes distintas. En la primera se obtiene una imagen cuyas tintas están invertidas, es decir, que las partes más claras aparecen como las más oscuras sobre el papel, y recíprocamente: ésta es la *imagen negativa*. En la segunda parte, sirve la primera imagen para formar una segunda cuyas tintas están nuevamente invertidas, y se encuentran, de consiguiente, en su orden natural: ésta es la *imagen positiva*.

La prueba negativa se puede obtener sobre vidrio o sobre papel, pero se consigue hoy generalmente sobre el primero para los retratos, y sobre el segundo para los paisajes.

*Pruebas negativas sobre vidrio.* -Se limpia una lámina de vidrio frotándola con un trapo empapado, primero con fiemo diluido en alcohol, luego con alcohol sólo, y por fin se la frota con piel de gamuza. De la limpieza de la lámina depende en gran parte el éxito feliz de la operación.

Encontrándose la lámina muy limpia, y dispuesta horizontalmente, se vierte en ella colodión líquido que contenga una disolución de ioduro de potasio, se inclina la lámina en diversos sentidos, a fin de obtener una capa de colodión muy uniforme en toda su extensión, y por último, se vierte el resto del líquido dando una inclinación mayor a la lámina.

Vaporizándose muy pronto el éter del colodión, toma éste un aspecto mate. Introdúcese entonces la placa en una disolución que contenga 1<sup>er</sup> de nitrato de plata por 10<sup>er</sup> de agua,

y el ioduro de potasio se transforma en ioduro de plata. Debe efectuarse esta operación en una pieza oscura, alumbrada tan sólo por una vela o por un quinqué cuya bomba sea de vidrio amarillo anaranjado, o tapado simplemente por un cilindro de papel del mismo color. Se deja la placa como cosa de un minuto en el baño de plata, se la saca, y luego que está bien seca se la coloca en un bastidor cerrado, trasladándola a la cámara oscura de Daguerre ([fig. 352](#)), conforme se hace con las metálicas (493). En dicho aparato, bajo la influencia de la luz, experimenta el ioduro de plata un principio de descomposición (475, 3.º), pero sin que sea aún aparente la imagen, por no haber sido bastante prolongada la acción. A fin de hacer visible la imagen, se introduce el papel en una disolución de ácido pirogálico con adición de ácido acético cristalizante, y se eleva ligeramente la temperatura. En todos los puntos en los cuales ha experimentado el ioduro un principio de descomposición, se forma un galato de plata, que es negro, y la imagen aparece súbitamente. Las artes sombreadas que no han recibido la acción de la luz quedan blancas, por no haberse descompuesto el ioduro de plata; pero como la luz ennegrecería muy pronto esta sal y haría desaparecer así la imagen, se lava la lámina en una disolución de hiposulfito de sosa, que disuelve el ioduro de plata, volviendo inalterable la imagen por la acción de la luz.

*Pruebas positivas sobre papel.* -Obtenida la prueba negativa sirve para producir un número indefinido de imágenes positivas. Cúbresela, al efecto, con un papel impregnado de cloruro de plata, y después de comprimidas las dos hojas entre dos láminas de vidrio, se expone el conjunto a la acción de la luz, de modo que las partes oscuras de la imagen negativa proyecten sombra sobre el papel dado con el cloruro de plata. Reprodúcese entonces sobre éste una copia de la imagen negativa; pero con las partes claras reemplazadas por las oscuras, y recíprocamente, obteniéndose así una imagen positiva. Resta fijarla, lo cual se consigue lavando el papel, según se ha dicho antes en una disolución de hiposulfito de sosa. En fin, para dar tono a la prueba, lo cual se llama *virar*, se la sumerge algunas horas en un baño de cloruro de oro que contiene un gramo de cloruro por un litro de agua.

495. Pruebas positivas sobre vidrio. -Se obtienen hermosas pruebas positivas sobre vidrio preparando primero las láminas como para las negativas, conforme se ha dicho en el párrafo anterior; pero la exposición a la luz no ha de ser tan prolongada como para las láminas negativas, y sí su mitad, próximamente. En el acto mismo de sacarlas del daguerrotipo se las introduce en una disolución saturada de protosulfato de hierro. De súbito aparece entonces la imagen, la cual es negativa. Para trasformarla en positiva, se introduce la lámina en una vasija llena de agua, a fin de separar el exceso de sulfato de hierro, y luego se vierte encima una disolución de cianuro de potasio que contenga 1 parte de esta sal por 10 de agua. Al instante se limpia la imagen y queda positiva. Lávase entonces, se barniza y, finalmente, se cubre el todo con una capa de betún de Judea, viéndose en seguida la imagen en la otra cara de la lámina de vidrio.

496. Fotografía sobre láminas de cristal albuminadas. -El inconveniente que presentan las láminas de cristal, preparadas al colodión, es el de necesitar que se empleen inmediatamente después de su preparación, mientras que las láminas preparadas a la albúmina pueden conservarse ocho días antes de someterlas a la acción de la luz; pero en cambio deben experimentar esta acción durante un tiempo mucho más prolongado que las láminas preparadas al colodión. Así es que hasta ahora aún no se han usado para los retratos, y solamente se emplean para sacar vistas.

Debemos el procedimiento de la fotografía por la albúmina a M. Niépce de San-Víctor. Para preparar esta sustancia, se baten unas cuantas claras de huevo en nieve, se las deja reposar, se decanta, y luego se añade 1 por 100 de ioduro potásico y 25 por 100 de agua. Se obtiene así un líquido que se puede conservar muchos días en un frasco bien cerrado.

La lámina de cristal sobre la cual se quiere extender la albúmina debe hallarse perfectamente limpia, lo mismo que para el colodión (494). Después se calienta la lámina ligeramente para hacerla adherir, del lado opuesto al que debe utilizarse, un extremo de tubo de gutta-percha, que sirve de mango para manejar la lámina.

Teniendo en seguida la lámina por su mango, se vierte encima una capa de líquido albuminoso, preparado como acabamos de indicar; tomando después el mango de gutta-percha entre las dos manos, se le hace girar rápidamente, lo mismo que a la lámina, lo cual imprime al líquido albuminoso un movimiento centrífugo que hace se acumule sobre los bordes de la lámina el exceso de albúmina que se quita con una pipeta.

Una vez albuminada y seca la lámina, se la coloca durante 1 minuto en un baño de plata, conteniendo 8 partes de nitrato de plata y 8 de ácido acético cristalizante por 100 de agua. Separada la lámina del baño, se la puede colocar en la cámara oscura en estado húmedo; cuando se quiere usar al estado seco, es preciso desembarazarla del exceso de plata que contiene, lavándola en agua destilada, haciéndola secar luego en la oscuridad, pudiendo entonces conservarse muchos días antes de usarla.

Cuando la lámina así preparada ha experimentado la acción de la luz, en la cámara oscura, durante unos 20 minutos, se hace aparecer la imagen sumergiendo la lámina en una disolución de ácido agálico, que se calienta suavemente a la lámpara. Algunas gotas de una disolución de nitrato de plata, añadidas al baño de ácido agálico, aceleran notablemente la aparición de la imagen, y prestan más vigor a las sombras. Finalmente, habiendo lavado la lámina con una gran cantidad de agua, se fija la imagen por una inmersión durante 5 minutos en un baño de hiposulfito de sosa, que contenga 8 partes de hiposulfito por 100 de agua.

La imagen obtenida de esta suerte es negativa, y sirve luego para dar pruebas positivas sobre cristal albuminado o sobre papel (494).

Siéndonos imposible dar mayores detalles sobre la fotografía, recomendamos a los lectores que quieran estudiarla con mayor detención el *Manual de Fotografía* de M. Robiquet, que se vende en Madrid en la librería de D. Carlos Bailly-Baillièrè.

497. Linterna mágica. -La *linterna mágica* es un aparatito que sirve para obtener, sobre una pantalla blanca, en una cámara oscura, imágenes amplificadas de objetos pequeños. Consiste en una caja de hoja de plata, con una lámpara situada en el foco de un reflector cóncavo A ([fig. 354](#)). Recibe los rayos que éste refleja una lente convergente B ([fig. 355](#)), que los concentra hacia varias figuras pintadas sobre una lámina de vidrio V. Estas figuras, iluminadas así perfectamente, se encuentran delante de una segunda lente convergente C, a una distancia algo mayor que la focal principal. En tal posición, produce dicha lente, una pantalla situada a una distancia adecuada, una imagen real, invertida y muy amplificadas, de los objetos pintados sobre el vidrio (464, 1.º). A fin de conseguir una imagen de posición recta se procura colocar el vidrio pintado en la linterna, de manera que se hallen invertidos los dibujos.

Fue inventada la linterna mágica por el padre Kircher, jesuita alemán, muerto en Roma en 1680.

El aumento que produce la linterna mágica es el mismo que ofrecen las lentes (469), es decir, que es la relación de las distancias de la lente C a la imagen y al objeto. De consiguiente, si la imagen dista 100, 1000 veces más de la lente que el objeto, vale el aumento 100 o 1000. Concíbese, pues, que una lente de foco corto puede, si dista suficientemente la lámina, producir imágenes sumamente amplificadas.

498. Microscopio solar. -El *microscopio solar* es una verdadera linterna mágica iluminada por los rayos solares, que sirve para obtener imágenes muy amplificadas de objetos sumamente pequeños. Funciona este aparato en una cámara oscura, conforme se ve en la fig. 356, y los pormenores interiores están representados en la 357.

Un espejo plano M, situado fuera de la cámara oscura, recibe los rayos solares y los refleja sobre una lente convergente A, y de ésta sobre otra E (fig. 357), llamada *focus*, que los concentra en su foco. En este punto se halla el objeto cuya imagen se desea obtener, entre dos láminas de vidrio O, que se introducen entre dos láminas metálicas KK, oprimidas por efecto de los resortes HH. Iluminando enérgicamente el objeto, y situándole muy próximo al foco de un sistema de tres lentes L, muy convergentes, forman éstas su imagen *ab*, invertida y en extremo amplificada, sobre una pared o una pantalla blanca que se encuentra a una distancia adecuada (464). Los tornillos de botón D y C sirven para regular la distancia de las lentes E y L al objeto, de modo que se encuentre éste exactamente en el foco de la primera, y que la imagen formada por las lentes L corresponda con exactitud a la pantalla.

Como varía de continuo la dirección de la luz solar, es preciso que varíe también la del reflector que está fuera de la cámara oscura, a fin de que se efectúe constantemente la reflexión en el sentido del eje del microscopio. El procedimiento más exacto para conseguir este resultado hubiera sido el de recurrir al helióstato (443); pero como es muy costoso este aparato, se le suple inclinando más o menos el espejo M por medio de un tornillo sin fin B y de un piñón, y haciendo girar este mismo espejo alrededor de la lente A, lo cual se obtiene por medio de un botón A (fig. 356), que se mueve por medio de una corredera fija, y que trasmite al espejo un movimiento de rotación alrededor del eje del aparato.

El microscopio solar tiene el inconveniente de concentrar sobre el objeto un calor tan intenso, que le altera muy en breve. Evítase este inconveniente interponiendo una capa de agua saturada de alumbre, la cual, poseyendo un poder diatérmico muy débil, intercepta parte del calor (377).

Puede determinarse experimentalmente el aumento del microscopio solar, poniendo, en vez del objeto, una lámina de vidrio con divisiones de  $\frac{1}{10}$  o  $\frac{1}{100}$  de milímetro. Midiendo en seguida sobre la imagen el intervalo de estas divisiones, se deduce su aumento. El mismo procedimiento puede servir para el microscopio foto-eléctrico (499). Según el aumento que se desea, así consta el objetivo de uno, de dos o de tres lentes que son todas acromáticas.

El microscopio solar ofrece el medio de manifestar fenómenos muy curiosos a un crecido auditorio: por ejemplo, la circulación de la sangre en la cola de los renacuajos, o

en las patas de la rana; la cristalización de las sales, y particularmente de la sal amoníaco, y también los animalillos que se observan en el vinagre, en la pasta de harina, en las aguas estancadas, etc.

499. Microscopio foto-eléctrico. -El *microscopio foto-eléctrico* no es más que un microscopio solar que, en vez de hallarse iluminado por el sol (498), lo está por la luz eléctrica. Es muy preferible esta luz a la solar por su intensidad, por su fijeza y por la facilidad de obtenerla a todas las horas del día. Sólo describiremos el microscopio foto-eléctrico propiamente dicho, pues al hablar de la pila daremos a conocer la luz eléctrica.

Los señores Foucault y Donné idearon el microscopio foto-eléctrico. La [fig. 358](#) representa la disposición dada por M. Duboscq a este aparato. Sobre una caja rectangular de latón se halla fijo un microscopio solar ABD, idéntico al anteriormente descrito. Se ven en el interior dos barritas de carbón *a* y *c* que no se tocan, correspondiendo exactamente su intervalo al eje de las lentes del microscopio. La electricidad de una fuerte pila pasa por un alambre de cobre K al carbón *a*, y de éste al *c*, por lo cual debe encontrarse al principio en contacto con el primero; y luego se separan un poco, pues ya basta la electricidad que conduce el carbón vaporizado que pasa de *a* a *c*. Por fin, desde el carbón *c*, llega la electricidad, por una columna metálica *o*, a un segundo alambre de cobre H que la conduce de nuevo a la pila.

Durante el paso de la electricidad, se vuelven incandescentes las extremidades de los dos carbones, y esparcen una vivísima luz que ilumina con grande intensidad el microscopio. Se coloca, al efecto, en D, en el interior del tubo, una lente convergente cuyo foco principal corresponde al mismo intervalo de los dos carbones. De esta suerte, los rayos luminosos que entran en los tubos D y B son paralelos a su eje, y verificándose todos los fenómenos como en el microscopio solar ordinario, se forma sobre una pantalla E, más o menos lejana, una imagen muy amplificada de objetos pequeños situados entre dos láminas de vidrio, en el extremo del tubo B. El objeto figurado en la placa es el *acarus* de la sarna.

En el experimento que acabamos de describir se gastan con desigualdad los dos carbones, el *a* con mayor prontitud que el *c*. Resulta de aquí que tiende a aumentarse el intervalo de los dos carbones, y por lo tanto, que se debilita la luz, llegando hasta a apagarse. Cuando tratemos de la luz eléctrica, expondremos cómo funciona el aparato P, que conduce los dos carbones y que sirve para mantener constante su intervalo.

El aparato MN, haciendo abstracción de los tubos A, B, D, se ha convertido, en manos de M. Duboscq, en un aparato fotogénico universal. Reemplazando el microscopio ABC sucesivamente por *cabezas* de fantasmagoría, de poliorama, de megascopio, y por aparatos polarizadores, se consigue repetir, con este solo aparato, todos los experimentos de óptica. Por eso sustituye ventajosamente en la actualidad, al que se conocía antiguamente con el nombre de *microscopio de gas*.

500. Lentes de escalones; faros. -Las lentes de grandes dimensiones presentan muchas dificultades en su construcción, y dan lugar, además, a una fuerte aberración de esfericidad, perdiendo gran parte de su diafanidad a causa de su espesor. Para obviar estos inconvenientes, se han construido las *lentes de escalones*. Estas lentes, ideadas por Buffon y perfeccionadas por Fresnel, constan, en el centro, de una lente plano-convexa C ([fig. 359](#) y [360](#)), rodeada de una serie de segmentos anulares y concéntricos A, B,

cada uno de los cuales tiene una cara plana situada en el lado mismo que la cara plana de la lente central, mientras que las caras opuestas ofrecen una curvatura tal, que los focos de los diferentes segmentos van a formarse en el mismo punto. El conjunto de estos anillos forma, pues, con la lente central una lente única, representada en corte en la [figura 359](#). Nuestro dibujo se ha sacado de una lente de unos 60 centímetros de diámetro, y cuyos segmentos anulares constan de una sola pieza de vidrio; pero en las lentes mayores cada segmento se compone a su vez de muchas piezas.

Detrás de la lente hay un pie, fijo por tres varillas, sobre el cual se colocan los cuerpos que se quieren someter a la acción de los rayos solares que caen sobre la lente. Como el centro del pie corresponde al foco, se funden y volatilizan las sustancias que se sitúan en él, por la alta temperatura que se produce. El oro, el platino y el cuarzo se funden con rapidez. Obsérvese que estos experimentos demuestran que el calor se refracta siguiendo las mismas leyes que la luz, pues el foco de calor se forma en el mismo punto que el luminoso.

Antes se utilizaban reflectores parabólicos para proyectar a grandes distancias la luz de los *faros*. Así se denominan unas luces que se encienden en las costas por la noche, para que sirvan de guía a los navegantes. En la actualidad se emplean únicamente lentes de escalones; el fuego procede de una lámpara con 3 o 5 mechas concéntricas, que alumbraba tanto como quince lámparas de Cárcel. Colocado en el foco principal de una lente escalonada, por el lado de la cara plana, forman los rayos emergentes un haz paralelo ([fig. 305](#)), que sólo pierde algo de su intensidad por su paso al través de la atmósfera (480), y visible acaso hasta 60 o 70 kilómetros. A fin de que todos los puntos del horizonte se hallen sucesivamente iluminados por un mismo faro, se mueve la lente alrededor de la lámpara, por medio de un mecanismo de relojería, efectuando su revolución en un tiempo que varía para cada faro. Resulta de aquí que, en los diversos puntos del horizonte, hay sucesivamente aparición y eclipse de luz a intervalos de tiempos iguales. Los marinos, por medio de los eclipses, distinguen los faros de un fuego accidental; y además, por el número de los mismos en un tiempo dado; reconocen el faro, y por lo tanto, la costa que tienen enfrente.

▽△

## Capítulo VI

▽△

### Del ojo considerado como instrumento de óptica

501. Estructura del ojo humano. -El *ojo* es el órgano de la *visión*, es decir, del fenómeno en virtud del cual la haz emitida o reflejada por los cuerpos, origina en nosotros la sensación que nos revela su presencia.

Situado el ojo en una cavidad ósea que se denomina *órbita*, se halla mantenido por los músculos que sirven para moverle, por el nervio óptico, la conjuntiva, los párpados, la aponeurosis órbita-ocular. Todos estos medios, asegurándole una sólida contención, le permiten movimientos muy variados y muy extensos. Su volumen es casi el mismo en todos los individuos; pero la abertura variable de los párpados es la única causa de que aparezca mucho menos voluminoso.

La [figura 361](#) representa un corte trasversal del ojo de la parte anterior a la posterior. Se nota que su forma general es la de un esferoide cuya curvatura con la parte anterior es mayor que con la posterior. Consta el ojo de varios medios y membranas, que son: la *córnea*, el *iris*, la *pupila*, el *humor acuoso*, el *crystalino*, el *cuerpo vítreo*, la *membrana hialoides*, la *coroides*, la *retina* y el *nervio óptico*.

*Córnea.* -La *córnea a* es una membrana trasparente situada delante del globo del ojo. Tiene sensiblemente la forma de un pequeño casquete esférico, con una base de 11 a 12 milímetros de diámetro. Su circunferencia, tallada a bisel a expensas de su cara externa, se engasta en la esclerótica *i*; y la adherencia de estas dos membranas es tal, que algunos anatómicos las han considerado como una sola y única membrana.

*Esclerótica.* -La esclerótica *i* es una membrana que, con la *córnea* envuelve todas las partes constituyentes del ojo. Presenta en la parte anterior una abertura casi circular, en la cual se halla engastada la *córnea*, y está perforada para dar paso al nervio óptico en la región posterior e interna.

*Iris.* -El iris *d* es un diafragma anular opaco, adherente por su perímetro exterior y libre por su borde central. Esta membrana se halla entre la *córnea* y el *crystalino*. Constituye la parte colorada del ojo, y cuenta, no en su centro, sino un poco hacia el interior, una abertura que se denomina *pupila*, y que en el hombre es circular. En otros animales es estrecha y prolongada en el sentido vertical, particularmente en los del género *felis*, y en el trasversal, en los rumiantes. Por la *pupila* penetran en el globo del ojo los rayos luminosos. Su diámetro, variable en un mismo individuo, es, por término medio, de 3 a 7 milímetros, pero a veces excede estos límites. Las alternativas de ensanche y de contracción de la *pupila* se verifican con rapidez, son frecuentes y desempeñan un importante papel en el fenómeno de la visión. La *pupila* se contrae por la influencia de una viva luz, y se dilata, por el contrario, en la oscuridad. Los movimientos del iris son, al parecer, involuntarios.

En vista de lo que precede, el iris es una pantalla de abertura variable que tiene por objeto, regular la cantidad de luz que penetra en el ojo, pues el tamaño de la *pupila* varía en sentido contrario a la intensidad de la luz. Sirve también el iris para corregir la aberración de esfericidad, oponiéndose al paso de los rayos marginales por los bordes del *crystalino*, es decir, que desempeña respecto al ojo el papel de un diafragma en los instrumentos de óptica (467).

*Humor acuoso.* -Entre la parte posterior de la *córnea* y la anterior del *crystalino*, existe un líquido trasparente denominado humor acuoso. El espacio *e*, ocupado por este humor, se halla dividido en dos secciones por el iris: la parte *b*, comprendida entre la *córnea* y el iris, se denomina *cámara anterior*, y la *c*, entre el iris y el *crystalino*, es la *cámara posterior*.

*Crystalino.* -El *crystalino* es un cuerpo lenticular *f*, situado detrás del iris y muy cerca de esta membrana. Es notable por su transparencia, y está envuelto por una membrana diáfana como él, o sea por la *cápsula*, y que se adhiere por su borde a la corona anular formada por los *procesos ciliares g*.

La cara anterior del *crystalino* es menos convexa que la posterior. Consta su tejido de una serie de laminitas casi concéntricas, y más duras en su centro que en la circunferencia, las más superficiales son tan blandas, que casi parecen líquidas. Se les ha dado el nombre de *humor de Morgagni*. El poder refringente de estas capas decrece del centro hacia la periferia.

*Cuerpo vítreo, y membrana hialoides.* -Llámase cuerpo vítreo, o humor vítreo, una masa trasparente, comparable con la albúmina o clara de huevo, que ocupa toda la parte *h* del globo del ojo, situada detrás del *crystalino*. El cuerpo vítreo se halla envuelto por la membrana *hialoides l* que tapiza la cara posterior de la *cápsula cristalina* y toda la interna de otra membrana, que es la retina.

*Retina, y nervio óptico.* -La retina *m* es una membrana que recibe la impresión de la luz y la trasmite al cerebro por medio de un nervio *n*, denominado nervio óptico, que parte del cerebro, penetra en el ojo y se pierde en la retina en forma de una red nerviosa.

El nervio óptico y la retina sólo poseen la propiedad especial de recibir y de transmitir al cerebro la impresión de las imágenes, de modo que son completamente insensibles a la acción de los cuerpos

vulnerantes. Estos órganos se han dilacerado, pinchado y cortado sin que diesen los animales sometidos a estos experimentos, muestras del más mínimo dolor.

*Coroides.* -La coroides *k* es una membrana interpuesta entre la retina y la esclerótica. Es esencialmente vascular, y está cubierta, sobre todo en su cara interna, de una materia negra semejante al pigmento de la piel de los negros, y destinada a absorber todos los rayos que no deben cooperar a la visión.

La coroides se prolonga en la parte anterior formando una serie de repliegues salientes *g* llamados *procesos ciliares*, y situados entre el iris y la cápsula cristalina, a la cual adhieren, formando a su alrededor un disco bastante parecido a una flor radiada. Sirve, por su tejido vascular, la coroides para transportar la sangre al interior del ojo, y sobre todo, a los procesos ciliares.

502. Índices de refracción de los medios transparentes del ojo. -Los índices de refracción de las partes transparentes del ojo se han determinado por M. Brewster. Los hemos reunido en el cuadro siguiente, con el del agua, para que sirva de término de comparación.

Agua.	1,3358	Cubierta exterior del cristalino.	1,3767
Humor acuoso.	1,3366	Centro del cristalino.	1,3990
Humor vítreo.	1,3394	Refracción media del cristalino.	1,3839

503. Curvatura y dimensiones de las diversas partes del ojo humano:

Radio de curvatura de la esclerótica.	10 a 11 milímetros.
<i>Id.</i> de la córnea.	7 a 8
<i>Id.</i> de la cara anterior del cristalino.	7 a 10
<i>Id.</i> de la cara posterior.	5 a 6
Diámetro del iris.	11 a 12
<i>Id.</i> de la pupila.	3 a 7
<i>Id.</i> del cristalino.	10
Espesor del mismo.	5
Distancia de la pupila a la córnea.	2
Longitud del eje del ojo.	22 a 24

La curvatura de la córnea, según M. Chossat, es la de un elipsoide de revolución alrededor de su eje mayor, y la del cristalino es igual a la de un elipsoide de revolución alrededor de su eje menor.

504. Trasmisión de los rayos en el ojo. -En vista de las diversas partes que componen el ojo, se puede comparar este órgano a una cámara oscura (491), cuya abertura es la pupila, el cristalino la lente convergente, y la retina la pantalla sobre la cual va a pintarse la imagen. El efecto es, pues, el mismo que el que origina en el foco conjugado de una lente bi-convexa la imagen de un objeto situado delante de la lente. Sea, en efecto, un cuerpo AB ([fig. 362](#)) que está delante del ojo, y consideremos los rayos que aquél emite desde un punto cualquiera A. De todos estos rayos, los que van dirigidos hacia la pupila son los únicos que penetran en el ojo y que se utilizan para la visión. Al entrar estos rayos en el humor acuoso, se refractan acercándose al eje *Oo*, tirado por el centro óptico del cristalino; encuentran luego a éste que los refracta de nuevo como una lente bi-convexa; y por fin, después de haber sufrido una última refracción en el humor vítreo, concurren en un punto *a* formando en él la imagen del A. Los rayos que parten del punto B van de igual manera en *b* a formar su imagen, resultando de aquí una imagen *ab* muy pequeña, real e invertida, que se produce exactamente en la retina cuando el ojo está bien conformado.

505. Inversión de las imágenes. -A fin de cerciorarse de que realmente están invertidas las imágenes que se forman en la retina, se toma un ojo de albino, porque la coroides de los ojos de estos animales carece de pigmento, y de consiguiente, puede atravesarla completamente la luz. Se desprende el tejido celular de

la parte posterior, se le aplica al orificio de una cámara oscura, y se observa entonces con una lente que van a pintarse en la retina las imágenes invertidas de los objetos exteriores.

La inversión de las imágenes en el ojo ha sido objeto de serio estudio por parte de los físicos y de los fisiólogos, habiéndose propuesto varias teorías para explicar por qué razón no vemos invertidos los objetos. Unos han admitido que por costumbre y por una verdadera educación del ojo los vemos derechos, es decir en su posición relativa respecto a nosotros. Algunos creen que referimos el sitio real de los objetos en la dirección de los rayos luminosos que emiten, y que, cruzándose estos rayos en el cristalino ([fig. 362](#)), ve el ojo los puntos A y B respectivamente en la dirección  $aA$  y  $bB$ , y por lo mismo aparece derecho el objeto: tal era la opinión de D'Alembert. Pero M. Muller, Volkmann y otros sostienen que, como lo vemos todo invertido, y no un objeto único entre otros, nada puede parecernos invertido, supuesto que carecemos entonces de término de comparación. Ninguna de estas teorías explica satisfactoriamente el fenómeno que nos ocupa.

506. Eje óptico, ángulo óptico, ángulo visual. -Denomínase *eje óptico principal* de un ojo, su eje de figura, es decir, la recta con relación a la cual es simétrico. En un ojo bien conformado, es la recta  $Oo$  ([fig. 363](#)) que pasa por el centro de la pupila y por el del cristalino. Las líneas  $Aa$ ,  $Bb$ , que son sensiblemente rectilíneas, son ejes secundarios. En la dirección del eje óptico principal, ve el ojo con más limpieza los objetos.

El *ángulo óptico* es el ángulo  $BAC$  ([fig. 363](#)) formado por los ejes ópticos principales de los dos ojos, cuando están dirigidos hacia un mismo punto. Este ángulo es tanto menor, cuanto más lejanos se hallan los objetos.

El *ángulo visual* es el  $AOB$  ([fig. 364](#)), bajo el cual se ve un objeto, es decir, el ángulo formado por los ejes secundarios tirados desde el centro óptico del cristalino a las extremidades opuestas del objeto. Para una misma distancia, decrece este ángulo con el tamaño del objeto, y para un mismo objeto, disminuye con la distancia, conforme sucede si pasa el objeto de  $AB$  a  $A'B'$ . Resulta de aquí; que los objetos aparecen tanto más pequeños, cuanto más distan, porque cruzándose los ejes secundarios  $AO$ ,  $BO$  en el centro del cristalino, depende del valor del ángulo visual  $AOB$  el tamaño de la imagen proyectada sobre la retina.

507. Apreciación de la distancia y de la magnitud de los objetos. -La apreciación de la distancia y de la magnitud depende del concurso de muchas circunstancias, que son: el ángulo visual, el ángulo óptico, la comparación con objetos cuyo tamaño nos es familiar, y la disminución de limpieza de la imagen por la interposición de un aire más o menos vaporoso.

Cuando se conoce el tamaño de un objeto, como la estatura de un hombre, la altura de un árbol o de una casa, se aprecia su distancia por la abertura del ángulo visual bajo el cual se le ve. Si no se conoce el tamaño, se le juzga relativamente al de los objetos que lo rodean.

Una columnata, o una calle de árboles, parece que disminuyen de tamaño a medida que aumenta su distancia, porque decrece el ángulo visual; pero la costumbre de ver columnas y árboles con su altura regular hace que nuestro juicio rectifique la apariencia producida por la visión. De igual manera, por más que veamos un grupo de montañas muy lejanas según un ángulo muy pequeño, y aunque ocupen un corto espacio en el campo de la visión, les restituimos su grandor natural, si estamos habituados a los efectos de la perspectiva aérea.

El ángulo óptico también es un elemento esencial para apreciar la distancia, pues, como aumenta o disminuye según se acerquen o se alejen los objetos, nos da una idea de ésta el movimiento que imprimimos a nuestros ojos para que sus ejes ópticos concurren hacia el objeto que miramos. Con todo, sólo un largo hábito llega a establecer así una relación entre la distancia que nos separa de los objetos y el correspondiente movimiento de nuestros ojos. Nótese, en efecto, que los ciegos que recobran la vista mediante la operación de la catarata, juzgan al principio que todos los objetos se hallan a igual distancia.

508. Distancia de la vista distinta. -Llábase *distancia de la vista distinta* la distancia a que deben hallarse los objetos para ser vistos con la mayor claridad. Esta distancia varía con los individuos, y con frecuencia, en un mismo individuo, de un ojo a otro. Para los objetos pequeños, como los caracteres de imprenta, es

de 25 a 30 centímetros en el estado normal del ojo. Las personas que sólo ven a una distancia menor son *miopes*, y si ésta ha de ser mayor, son *prébitas* (519).

509. Facultad del ojo para adaptarse a todas las distancias. -El ojo posee una notable propiedad, que no se nota en igual grado en ningún instrumento de óptica: tal es la de que, si bien tienden las imágenes a formarse tanto más hacia la parte anterior de la retina, cuanto más lejanos se hallan los objetos (464), van siempre a constituirse sobre esta membrana; pues el ojo ve con limpieza a distancias muy variables, a contar de la que corresponde a la vista distinta. Con todo, si bien podemos ver con claridad a distancias muy desiguales, no sucede esto simultáneamente, lo cual indica alguna modificación en el sistema del ojo, o por lo menos, la necesidad de fijar nuestra atención sobre el objeto que deseamos ver. En efecto, si se miran dos objetos alineados, situados, por ejemplo, el uno a un metro y el otro a dos del ojo, fijándose en el primer objeto, parece nebuloso el segundo, mientras que, fijándose en éste, se vuelve a su vez nebuloso el primero. Dedúcese de aquí que, cuando el ojo se ha habituado a ver a una distancia, no lo está para ver a otra; pero que en cambio puede adaptarse sucesivamente a una y a otra.

Muchas hipótesis se han propuesto para explicar cómo puede ver distintamente el ojo a distancias muy diferentes. M. Mile y M. Pouillet creen que son su causa las dilataciones y contracciones de la pupila. El primero opina que los rayos luminosos sufren en los bordes del iris una difracción o inflexión que puede originar distancias locales muy distintas. Fundándose en la desigual refrangibilidad del cristalino, que decrece desde el centro a la circunferencia, y observando que deben resultar de este hecho una serie de focos, formados los más cercanos por los rayos que atraviesan al cristalino más próximos a su centro, admite M. Pouillet que, abriéndose más o menos la pupila, se ven los objetos lejanos por los bordes del cristalino, y los más inmediatos por el centro. Obsérvase, efectivamente, que las contracciones o dilataciones del orificio pupilar se hallan enlazadas con la disposición del ojo a las distancias; pero conviene notar que lo están igualmente con las variaciones de intensidad de la luz, y que para una misma sustancia puede variar en mucho la abertura de la pupila.

Rohaut, Olbers y otros han emitido la opinión de que el diámetro del ojo, de la parte anterior a la de atrás, varía bajo la influencia de los músculos que ponen en movimiento este órgano, acercando o alejando la retina del cristalino, al mismo tiempo que a éste se aproxima o se aparta la imagen, pues ya sabemos (460) que en las lentes convergentes se acerca a la imagen a medida que se aleja el objeto.

Hunter y Young han atribuido al cristalino una propiedad de contracción, en virtud de la cual adquiere una forma más o menos convexa, de modo que siempre convergen los rayos sobre la retina.

Keplero, Camper y otros muchos han admitido, que, por la acción de los procesos ciliares, puede acercarse más o menos el cristalino a la retina.

Por último, se ha supuesto que la limpieza de la visión a distancias muy diversas, puede reconocer por origen, no el que se muevan la retina o el cristalino en términos de que la imagen vaya a formarse siempre sobre la retina, sino el que las variaciones que sufre la distancia focal del cristalino a medida que se alejan los objetos, son bastante pequeñas, para que aún conserve la imagen suficiente limpieza.

Los experimentos de M. Magendie y los de Haldat confirman esta última teoría. Observó el primero, con un ojo de albino, que la claridad de las imágenes no variaba en objetos situados a distancias muy desiguales; y de Haldat encontró que, si se coloca un cristalino como objetivo en la ventana de una cámara oscura, se obtienen sobre un vidrio deslustrado imágenes igualmente distintas de los objetos exteriores, así a la distancia de 3 a 4 decímetros, como a las de 20 a 30 metros. Parece contraria a las leyes de la refracción esta propiedad del cristalino en el estado de inercia; pero hay que atribuirla a la estructura de este órgano, que se distingue por completo de las lentes ordinarias. De Haldat no ha explicado estos fenómenos, pero a Sturm somos deudores de la siguiente teoría.

510. Teoría de la visión de M. Sturm. -Para explicar de qué manera puede adaptarse el ojo a todas las distancias, observa M. Sturm que según los trabajos de los fisiologistas Young, Chossat y otros, no son esféricas las curvaturas de los diferentes medios del ojo, y que, por lo mismo, no puede asimilarse de un modo absoluto este órgano a un sistema de lentes homogéneas y esféricas yuxtapuestas sobre un mismo eje, y que el cristalino, en particular, no es comparable con una lente esférica ordinaria. Admite, por fin, que debemos considerar el ojo como formado por muchos medios desigualmente refringentes, separados

por superficies que no sólo no son esféricas, sino que no forman un sistema simétrico alrededor de un eje común.

Apoyándose en consideraciones geométricas relativas a las superficies conocidas en matemáticas con el nombre de *superficies gauchas* o alabeadas, busca Sturm la forma que acepta un haz luminoso muy delgado, que se ha refractado sucesivamente en distintos medios que no son igualmente refringentes. Considerando el caso en que atravesase el haz un diafragma de abertura muy pequeña, cuyo plano es perpendicular al eje de aquél, y suponiendo los rayos luminosos emanados de un punto situado sobre este eje, halla M. Sturm, por medio del cálculo, que las intersecciones sucesivas de estos rayos forman una superficie cáustica (467) que encuentra al eje del haz en dos puntos, entre los cuales está el haz más condensado que en todos los restantes. M. Sturm ha denominado a estos dos puntos, que designaremos con las letras  $F$  y  $f$  los *focos* del haz, y la distancia que los separa *intervalo focal* del mismo. Aplicando a la visión las consideraciones teóricas que preceden, se expresa M. Sturm en estos términos:

«Se ha admitido generalmente que para ver de un modo distinto un punto luminoso, era preciso que los rayos emanados de éste fuesen a formar su foco en la retina, o por lo menos, muy cerca de ella. Pero las consideraciones que preceden prueban a mi modo de ver, que no hay un foco o punto único de convergencia, sino que hay siempre, para un haz muy delgado que ha penetrado en el humor vítreo y que va a encontrar la retina, lo, que he llamado más arriba *intervalo focal*, que puede ser más o menos largo. No es posible que llegue a ser absolutamente nulo dicho intervalo en el ojo, porque ofrece éste una reunión de varios medios desigualmente refringentes (en número de tres, por lo menos, sin contar la córnea), separados por superficies que no son rigurosamente esféricas, ni siquiera simétricas con relación a un eje común.

«Creo, pues, que en el ojo, el intervalo focal propio de cada haz que proviene de un punto exterior, no es nulo, sino muy pequeño, es decir, de 1 o 2 milímetros a lo sumo. Admito, según la opinión general de los fisiólogos, que sólo la retina recibe la impresión de la luz (o, según Mariotte y Brewster la cubierta coroides que se halla inmediatamente debajo de la retina, por ser ésta trasparente). Siendo casi perpendicular a la superficie de la retina la dirección del rayo central sobre el cual se encuentran los focos  $F$ ,  $f$ , se verá con la suficiente claridad el punto de donde emanan los rayos luminosos si la línea  $Ff$ , aunque muy corta, encuentra a la retina en un punto situado entre  $F$  y  $f$ , o bien un poco más allá de  $F$  o más acá de  $f$ ; porque entonces el tenuísimo haz luminoso que dejó pasar la pupila, interceptará sobre la superficie de la retina un espacio sumamente reducido, incomparablemente menor que la sección hecha en este haz muy cerca del cristalino».

En resumen, en la teoría de M. Sturm el sitio en donde puede actuar la luz sobre la retina no es un punto único, sino un *foco lineal*  $Ff$ , en toda la extensión del cual se halla bastante condensado el haz luminoso que penetra en la pupila para producir en el ojo la sensación de la visión. De consiguiente cuando se alejan o se acercan los objetos luminosos, basta, para que veamos distintamente, que se halle siempre comprendida la retina entre los dos focos  $F$  y  $f$ , o que coincida sensiblemente con uno de ellos.

511. Vista simple con los dos ojos. -Cuando los dos ojos se fijan sobre un mismo objeto, se forma una imagen en cada retina, y sin embargo, no vemos más que un objeto. Para explicar la vista simple con los dos ojos, admitía Gassendi que en un mismo instante no se efectúa más que la percepción de una de las imágenes, lo cual es inadmisibile después de los experimentos de M. Weathstone, que no tardaremos en explicar.

Taylor y Wollaston opinan que dos puntos homólogos hacia la derecha o hacia la izquierda, sobre las dos retinas, corresponden a un mismo filete nervioso cerebral de la derecha o de la izquierda, bifurcado en el entrecruzamiento de los dos nervios ópticos. Esta opinión se halla acorde con un hecho que se observa en algunos individuos, o sea la parálisis transitoria de la retina, por mitad y del mismo lado en cada ojo, de la derecha o de la izquierda simultáneamente, de suerte que los enfermos no ven más que la mitad derecha o la izquierda de los objetos. Wollaston y Arago observaron en sí mismos esta afección de la retina.

M. Brewster atribuye la unidad de sensación a la costumbre que adquirimos de referir a un mismo objeto las impresiones simultáneas, producidas sobre las dos retinas.

He ahí los principales hechos que se observan en la visión con los dos ojos: se ve más claro con dos ojos que con uno solo, y en efecto, mirando un objeto con un solo ojo primero, y luego con los dos, es muy sensible la diferencia de brillo.

Cuando cada ojo se fija sobre un objeto distinto, de modo que los dos ejes ópticos concurren más allá o más acá de estos objetos, pueden producirse notables ilusiones de óptica. Por ejemplo, si se miran dos objetos idénticos y de pequeñas dimensiones  $a$  y  $b$ , por medio de dos tubos aisladores que den a los ejes ópticos de ambos ojos las direcciones concurrentes  $aO$  y  $bO$  (fig. 365), no se ve más que un objeto único, aunque más lejano, en el punto de encuentro  $O$  de los dos ejes.

Si este punto de cruzamiento de los dos ejes se halla delante de los puntos que se miran (fig. 366), no se ve tampoco más que un solo objeto, si bien más aproximado al punto  $O$ .

Si los objetos  $a$  y  $b$  son dos pequeños discos, rojo el uno y verde el otro, se ve un disco blanco, porque son complementarios los dos colores enumerados (474). Estos diversos experimentos demuestran que las impresiones en ambos ojos son simultáneas, y que se superponen para causar una sensación única.

M. Wheatstone ha hecho numerosos experimentos que revelan una diferencia esencial entre las visiones binocular y unocular; pues sólo con los dos ojos podemos tener una percepción clara del relieve de los cuerpos, es decir, de sus tres dimensiones. Es también probable que si puede apreciarse con un solo ojo el relieve, es porque nos son generalmente conocidos los objetos que miramos. En efecto, en la visión binocular, cuando se halla a corta distancia el objeto, como deben converger los dos ejes hacia aquél, resulta que varía la perspectiva para cada ojo, y que las dos imágenes son sensiblemente desiguales. Es fácil comprobar este hecho mirando alternativamente un mismo objeto con cada ojo; pues de la percepción simultánea de estas dos imágenes resulta, al parecer, la percepción del relieve, conforme lo demuestra el experimento que sigue.

512. Estereoscopio. -M. Wheatstone ha ideado un aparato ingenioso, el estereoscopio, que sirve para hacer sensible el efecto de la visión con los dos ojos, a fin de apreciar el relieve de los cuerpos. Este aparato, modificado por M. Brewster, consiste en una cajita de madera, cuya pared superior posee dos tubos directores de los ejes ópticos. En el fondo de la caja existen dos dibujos, que cada ojo ve aisladamente al través de un vidrio convergente colocado en los tubos. Dichos dibujos representan el mismo objeto, pero visto bajo distinta perspectiva, que es precisamente la que correspondería al eje óptico de cada ojo si mirase el objeto a corta distancia. Resulta que, mirando al través de los dos tubos, recibe cada ojo la misma impresión que si mirase el objeto, siendo tan distinta y viva la percepción del relieve, que es completa y verdaderamente sorprendente la ilusión.

Por medio del estereoscopio se han cerciorado M. Foucault y el doctor Regnault de que, cuando dos colores distintos impresionan simultáneamente ambas retinas, no se percibe más que un solo color mixto; pero también observaron que la aptitud para la recomposición de las dos tintas en una, varía de un modo notable, según los individuos, pudiendo ser excesivamente débil, y hasta nulo en algunas personas. Iluminando con dos haces de colores complementarios (474) dos discos blancos, colocados en el fondo del estereoscopio, y mirando cada disco colorado con un ojo, se nota un disco blanco único, lo cual demuestra que la sensación de la luz blanca puede nacer de dos impresiones cromáticas complementarias y simultáneas en cada una de las dos retinas.

513. Parte insensible de la retina. -La retina no es igualmente sensible en todas sus partes, según lo prueba el siguiente experimento de Mariotte: márcanse dos puntos negros sobre papel blanco, distantes entre sí algunos centímetros, y luego, acercando mucho el papel al ojo, se fija el punto de la izquierda con el ojo derecho, lo cual no impide ver el otro punto; pero si se aleja lentamente el papel, desaparece a cierta distancia el punto de la derecha, para reaparecer muy pronto si se prosigue alejándose el papel. Lo propio sucede mirando el punto de la derecha con el ojo izquierdo.

Mariotte notó que en el momento en que cesa de ser visible el punto, se proyecta su imagen sobre la inserción misma del nervio óptico, en la parte interna e inferior del ojo. Se ha dado el nombre de *punctum caecum* a este punto insensible a la acción de la luz.

514. Persistencia de la impresión sobre la retina. -Cuando se hace girar con rapidez un carbón incandescente, se percibe como una especie de faja continua de fuego; también la lluvia que cae en forma de gruesas gotas, aparece en el aire como una serie de filetes líquidos. Dependen estas apariencias, de que la impresión de las imágenes sobre la retina resiste aun después de haber desaparecido o mudado de lugar el objeto que la produjo. La duración de esta persistencia varía con la sensibilidad de la retina y la intensidad de la luz. M. Plateau, de Bruselas, ha encontrado por diferentes métodos, que es, por término medio, de medio segundo.

La impresión de los colores persiste también como la de la forma de los objetos; porque si se hacen girar círculos divididos en sectores diversamente colorados, se confunden y originan la sensación del color que resultaría de su mezcla. El azul y el amarillo producen el verde; el amarillo y el rojo, el anaranjado; el azul y el rojo, el violeta; y los siete colores del espectro, el blanco, conforme lo demuestra el disco de Newton (472, 5.º).

Existen curiosos y numerosos aparatos cuyos efectos se explican por la persistencia de la sensación sobre la retina. Tales son el *thaumatropo*, el *phenakistikopo*, la *rueda de Faraday* y el *kaleidofono*.

515. Imágenes accidentales. -Colocando un objeto colorado sobre un fondo negro, y mirándolo con fijeza durante cierto tiempo, se fatiga muy pronto la vista y se debilita la intensidad del color; dirigiendo entonces los ojos sobre un cartón blanco, o al suelo, se percibe una imagen de la misma forma que el objeto, pero de un color complementario (474), es decir, que formaría el blanco si estuviese reunido con el del objeto. La imagen de un objeto verde es roja, y recíprocamente; y si el objeto es amarillo, representa violada la imagen. Buffon dio a conocer estas apariencias coloreadas, designándolas con el nombre de *imágenes* o de *colores accidentales*.

Persisten tanto más tiempo los colores accidentales, cuanto el objeto ha sido iluminado con más viveza y cuanto más prolongada haya sido la acción de la luz. No desaparecen, en general, de una manera progresiva y continua, sino que ofrecen de ordinario desapariciones y reapariciones alternativas. Obsérvase también que si, después de contemplar un objeto coloreado, se cierran rápidamente los ojos, preservándolos lo más que sea dable de la luz, por medio de una tela bien tupida, no por eso dejan de aparecer las imágenes accidentales.

Muchas teorías se han propuesto para explicar el fenómeno de los colores accidentales. Darwin admitió:

1.º Que la parte de la retina fatigada por un color, queda insensible a sus rayos, impresionándola ya solamente su color complementario;

2.º Que esta parte de la retina adquiere *espontáneamente* un modo de acción *opuesto*, que produce la sensación del color complementario.

La primera parte de esta teoría no explica el hecho anterior de aparecer en la oscuridad también los colores accidentales; y la segunda es el enunciado mismo del fenómeno de las imágenes accidentales.

516. Irradiación. -La *irradiación* es un fenómeno por medio del cual los objetos blancos o de un color muy vivo, vistos sobre un fondo oscuro, aparecen con dimensiones mayores que las que les son propias. Lo contrario sucede con un cuerpo negro visto sobre un fondo blanco. Admítase que proviene la irradiación, de que la impresión sobre la retina se propaga a mayor o menor distancia del contorno de la imagen.

El efecto de la irradiación es muy sensible respecto al tamaño aparente de los astros, que pueden así aparecer mayores en mucho a lo que en realidad lo son.

Por las investigaciones de M Plateau se ve que varía considerablemente la irradiación según las personas, y con relación a un mismo individuo según los días. Dicho físico ha demostrado, además, que crece la irradiación con el brillo del objeto y la duración de la mirada. Por fin, se manifiesta a todas las distancias; la aumentan las lentes divergentes y la disminuyen las convergentes.

517. Aureola accidental; contraste de los colores. -Denominanse *aureolas accidentales* los colores que, en vez de suceder a la impresión de un objeto, como los accidentales, aparecen alrededor del objeto mismo cuando se te mira con fijeza. La impresión de la aureola es opuesta a la del objeto, es decir, que siendo éste claro, es aquélla oscura, y vice-versa.

El *contraste de los colores* es una reacción recíproca que se ejerce entre dos colores inmediatos, reacción en virtud de la cual se añade a cada uno de ellos el color complementario del otro. M. Chevreul ha observado este contraste, lo ha estudiado profundamente, y ha formulado su ley. Se explica el contraste de los colores por la influencia recíproca de las aureolas accidentales.

M. Chevreul ha encontrado que, yuxtaponiendo los colores rojo y anaranjado, pasa el primero a violeta, y el segundo a amarillo. Si se hace el experimento con el rojo y el azul, pasa éste al verde y aquél al amarillo; con el amarillo y el azul, a anaranjado el primero y a añil el segundo, y así sucesivamente en muchas combinaciones. Fácilmente se comprende cuánto interesa el saber apreciar el contraste de los colores en la fabricación de las telas y de los tapices.

518. El ojo no es acromático. -Durante mucho tiempo se ha atribuido al ojo humano un acromatismo perfecto (479); pero no es admisible de un modo absoluto esta opinión, después de los diversos experimentos de Wollaston, de Young, de Fraünhofer y de Muller.

Observó Fraünhofer que, en un anteojo de dos lentes, iluminado únicamente con luz roja, se veía distintamente al través del ocular, un hilo muy fino, situado en el interior del instrumento, en el foco del objetivo; pero que deja de ser visible si la luz es violada aun cuando conserve el ocular la misma posición. Nótase que para ver de nuevo el hilo e recluso disminuir la distancia de las lentes mucho más de lo que indica el grado de refrangibilidad de la luz violada en la lente. Es preciso admitir, pues, en este experimento, que hay un efecto que depende de la aberración de refrangibilidad del ojo.

Examinando, por su parte, M. Muller, con un solo ojo un disco blanco sobre un fondo negro, encontró que es pura la imagen cuando está acomodado el ojo a la distancia del disco, es decir, cuando se forma en la retina la imagen; pero en caso contrario, esto es, si se forma delante o detrás de ésta, aparece rodeado el disco por una faja azul muy estrecha.

M. Muller dedujo de sus experimentos que es acromático el ojo mientras recibe la imagen a la distancia focal, o mientras se acomoda a la distancia del objeto. Hasta ahora no es posible decir cuál sea con exactitud la causa de este acromatismo aparente del ojo; mas por punto general se atribuye a la tenuidad de los haces luminosos que pasan por la abertura pupilar, y a que, encontrando los rayos desigualmente refrangibles las superficies de los medios del ojo bajo incidencias casi normales, están muy poco refractados, y por lo tanto, que es insensible la dispersión (478).

Ya hemos visto (501) de qué manera corrige la aberración de esfericidad el iris, que es un verdadero diafragma que intercepta los rayos marginales que tienden a cruzar el cristalino, dando paso únicamente a los más inmediatos al eje.

519. Miopía; presbitismo. -Las afecciones más comunes del órgano de la vista son la miopía y el presbitismo. Consiste la *miopía* en no ver más que a una distancia menor que la de la vista distinta ordinaria, de suerte que las personas que la padecen, no ven con claridad sino los objetos muy aproximados. La causa ordinaria de la miopía es una convexidad demasiado grande de la córnea o del cristalino; pues siendo entonces muy convergente el ojo, en vez de formarse el foco sobre la retina, lo efectúa en la parte anterior, por lo que es confusa la imagen. Óbviase este defecto del ojo, por medio de cristales divergentes que, separando los rayos de su eje común, hagan retroceder el foco y lo proyecten sobre la retina.

La visión habitual de objetos pequeños y las observaciones microscópicas, pueden originar la miopía. Este vicio de conformación es común en los jóvenes, pero disminuye con la edad.

El *presbitismo* es el reverso de la miopía. En esta afección ve el ojo muy bien los objetos distantes, pero con poca limpieza los que están muy próximos. Depende el presbitismo de que, no siendo bastante convergente el ojo, va a formarse la imagen de los objetos inmediatos más allá de la retina; pero si los

objetos se alejan, se acerca a ésta la imagen (460, 2.º); y cuando se hallan a la debida distancia, se forma con exactitud sobre dicha membrana. Entonces se ve con claridad.

El presbitismo se corrige por medio de anteojos de lentes convergentes, pues como aproximan los rayos antes de su entrada en el ojo, resulta que, si está bien elegida la convergencia, se produce exactamente la imagen en la retina.

Hace pocos años que sólo servían las lentes bi-convexas para los présbitas, y las bicóncavas para los miopes. Pero Wollaston fue el primero en proponer que se sustituyeran por lentes cóncavo-convexas C y F (fig. 302), dispuestas de manera que sus curvaturas tengan el mismo sentido que la del ojo. Estas lentes, que permiten ver los objetos lejanos que rodean al eje óptico, se denominan *lentes periscópicas*.

520. Anteojos. -Las lentes que usan los miopes y los présbitas, se designan con el nombre general de *anteojos* o de *gafas*. Grábanse de ordinario sobre estas lentes números que marcan, en *pulgadas*, su distancia focal.

Se puede calcular el número que debe elegir un présbita o un miope, conocida la distancia a que ve distintamente. Para los présbitas se hace uso de la fórmula  $f=pd/d-p$  [1], en la cual, siendo  $f$  el número de la lente que se debe adoptar,  $p$  es la distancia de la visión distinta para las vistas ordinarias, distancia que vale 30 centímetros u 11 pulgadas francesas, y  $d$  la distancia de la visión distinta del individuo afectado de presbitismo.

La fórmula [1] se deduce de la igualdad  $1/p-1/p'=1/f$  (468), reemplazando en ella  $p'$ , por  $d$ .

Se hace aquí uso de la fórmula [6] del párrafo 468 y no de la [5], porque estando la imagen que se ve en los anteojos en el mismo lado que el objeto, con relación a la lente, el signo de  $p'$  ha de ser contrario al de  $p$ , como en las imágenes virtuales, según el citado párrafo.

Para los miopes se calcula  $f$  por la fórmula  $1/p-1/p'=-1/f$ , de las lentes divergentes (468), que da  $f=pd/p-d$  [2], reemplazando  $p'$  por  $d$ .

Propongámonos, por ejemplo, calcular el número de las lentes que debe elegir un présbita cuya vista distinta determina la distancia de 35 pulgadas, sabiendo que es 11 la de la visión ordinaria. Haciendo  $p=11$  y  $d=35$ , en la fórmula [1] anterior, se deduce

$$f=35 \times 11 / 35 - 11 = 16.$$

La medida de la vista distinta se obtiene con bastante precisión por medio de un aparato que se denomina *optómetro*.

521. Diplopía. -La *diplopía* es una afección del ojo que hace ver dobles los objetos, es decir, que se ven dos en vez de uno. Por punto general, se sobreponen casi enteramente las dos imágenes siendo mucho más aparente la una que la otra. Puede provenir la diplopía del concurso de dos ojos desiguales; pero también puede afectar a un solo ojo. Este último caso depende, sin duda, de algún defecto de conformación en el cristalino, o en otras partes del ojo, que es causa de que se bifurque el haz luminoso y vaya a formar en la retina dos imágenes en vez de una. También puede estar más afectado de triplopía un solo ojo, pero en tal caso es excesivamente débil la tercera

522. Acromatopsia. -Denomínase *acromatopsia* una afección singular que nos vuelve incapaces de juzgar los colores, o por lo menos, algunos de ellos. En varios individuos es completa la insensibilidad, mientras que otros aprecian algunos colores. Las personas que experimentan esta afección distinguen muy bien los contornos de los cuerpos, las partes claras o las sombreadas, pero no las tintas.

M. d'Hombres-Firmas cita una persona atacada de acromatopsia, que había pintado en su aposento, encima de una puerta, un paisaje con el terreno, los árboles, las casas y los personajes azules. Habiéndole preguntado por qué no dio a cada objeto su color propio, contestó que lo había hecho para que tuviese el mismo que sus muebles, y éstos eran rojos.

Se designa también la acromatopsia con el nombre de *daltonismo*, porque la padecía Dalton, que la describió minuciosamente.

▽△

## Capítulo VII

▽△

### Manantiales de luz, fosforescencia

523. Diversos manantiales de luz. -Los distintos manantiales de luz son: el sol, las estrellas, el calor, las combinaciones químicas, la fosforescencia, la electricidad y los fenómenos meteorológicos. De estos dos últimos trataremos en los artículos *Electricidad* y *Meteorología*.

Desconócese el origen de la luz emitida por el sol y por las estrellas, si bien se admite que la sustancia inflamada que rodea al sol es gaseosa, pues la luz que despide este astro, lo mismo que la de las sustancias gaseosas inflamadas, no deja percibir resto alguno de polarización en los anteojos polariscopos (542).

En cuanto a la luz desarrollada por el calor, sienta M. Pouillet que principian a ser luminosos los cuerpos en la oscuridad a una temperatura de 500 a 600 grados, y a contar de este límite, la luz que emiten es tanto más viva, cuanto más elevada sea su temperatura.

Muchas combinaciones químicas desprenden luz por las altas temperaturas que las acompañan. Tal es el origen de las luces artificiales utilizadas para el alumbrado; porque, según se ha visto ya, las llamas no son más que materias gaseosas calentadas en términos de ser luminosas (402).

Volviéndose luminosos los cuerpos a una alta temperatura parece que el calórico se transforma entonces en luz lo cual tendería a probar que estos dos agentes deben referirse a una sola y misma causa, sobre todo si se observa que, en general, los rayos luminosos van acompañados de otros que son caloríficos. No obstante no es completa la identidad, porque se conocen muchas sustancias que pueden lucir en la oscuridad sin desprender calor, o si lo desprenden es en cantidad inapreciable respecto a los instrumentos termométricos más sensibles.

Pasemos a describir esta propiedad, que se denomina *fosforescencia*.

524. Fosforescencia, sus gérmenes. -Denomínase *fosforescencia* la propiedad que poseen un gran número de sustancias de emitir luz, cuando se sitúan según condiciones determinadas.

M. Ed. Becquerel, que ha estudiado concienzudamente la fosforescencia, alcanzando resultados altamente notables, relaciona dicho fenómeno a las cinco causas que vamos a enumerar.

1.<sup>a</sup> *La fosforescencia espontánea* que poseen ciertos vegetales y animales, la cual es, por ejemplo, muy intensa en la fúlgora o portalinterna y en el lámpiro o luciérnaga (gusano de luz), el brillo de cuya luz varía según el imperio de su voluntad. Así mismo, en las regiones tropicales se halla cubierto el mar con suma frecuencia de una luz fosforescente bastante viva, originada por unos zoófitos muy pequeños. Estos animalillos difunden una materia luminosa tan sutil, que los señores Quoy y Gaimard, durante una expedición al Ecuador, observaron que introduciendo únicamente dos en un frasco lleno de agua, el líquido se volvía inmediatamente luminoso en la totalidad de su masa.

2.<sup>a</sup> *La fosforescencia originada por la elevación de temperatura*, que se manifiesta particularmente en ciertos diamantes en las variedades del espató flúor, que calentado a 300 o 400 grados, se vuelve repentinamente luminoso, proyectando un brillo azulado bastante intenso.

3.<sup>a</sup> *La fosforescencia producida por efectos mecánicos*, tales como el rozamiento, la percusión, la exfoliación, etc., y de la cual nos presenta un ejemplo el rozamiento entre los cristales de cuarzo, o bien cuando se rompe un pedazo de azúcar.

4.<sup>a</sup> *La fosforescencia originada por la electricidad*, como la que surge por el rozamiento del mercurio con el vidrio en el interior del tubo barométrico, y en particular la de las chispas eléctricas producidas, sea por medio de una máquina común, por una batería, o por el carrete, o broca de Ruhmkorff, aparato que describiremos al ocuparnos de la inducción.

5.<sup>a</sup> Y por último, *la fosforescencia producida por la insolación*, o sea por la acción de la luz solar, o de la luz difusa de la atmósfera. Un gran número de sustancias, después de haberse expuesto a la acción de la luz, brillan en la oscuridad con una luz intensa cuyo matiz e intensidad dependen de la naturaleza y del estado físico de dichas sustancias. Esta clase de fosforescencia es la que va a ser objeto de nuestra exposición, al resumir las investigaciones de M. Ed. Becquerel.

525. Fosforescencia producida por la insolación. -Se observó por vez primera esta clase de fosforescencia, en el año de 1604, en el *fósforo de Bolonia* (sulfuro de bario); pero M. Ed. Becquerel ha descubierto dicha propiedad en no gran número de otras sustancias. Las que la poseen en mayor grado son los sulfuros de calcio, de bario y de estroncio. Cuando estas sustancias se han preparado perfectamente después de la insolación, pueden brillar durante muchas horas en la oscuridad, y como este brillo surge igualmente, así en el vacío como en los gases, no puede atribuirse a una acción química, y si con mayor razón, a una modificación transitoria originada por la influencia de la luz.

Después de los sulfuros enumerados en el párrafo anterior, siguen, respecto al grado de su fosforescencia, un gran número de diamantes, en particular los amarillos y la mayor parte de las muestras de espató flúor; después la aragonita, los calcáreos concrecionados, la creta, la cal fosfatada, arseniada y sulfatada, el nitrato de cal y el cloruro de calcio secos, el cianuro de calcio, muchas sales de base de estronciaca, y finalmente, un gran número de sustancias orgánicas, tales como el papel seco, la seda, el azúcar de caña, la de leche, el sucino, los dientes y otros.

M. Ed. Becquerel ha reconocido que los diferentes rayos del espectro impresionan desigualmente a cada sustancia, surgiendo el máximo respecto a las moradas y a una esfera aun mayor, correspondiendo en general el matiz emitido por los cuerpos fosforescentes, a rayos de menor refrangibilidad que los de la luz activa.

526. Fosforoscopio. -Cuando se efectúan experiencias con cuerpos, cuya fosforescencia se prolonga por algunos minutos, y aunque sólo sea por algunos segundos, hasta exponerlos a la luz solar o a la luz difusa durante algunos instantes, y luego situarlos en la oscuridad; entonces su brillo es muy aparente, en particular si se tiene la advertencia de mantener cerrados los ojos por algunos momentos; pero este método es insuficiente para los cuerpos cuya fosforescencia sólo dura un tiempo muy breve, en cuyo caso ha ideado M. Ed. Becquerel un ingenioso aparato, que designa con el nombre de *fosforoscopio*, y por cuyo medio puede observarse el cuerpo en el momento que actúa la luz, puesto que el intervalo que separa la insolación del examen puede ser tan breve como se quiera, y medirse con extrema precisión.

Este aparato, construido por M. Duboscq, consta de un cajón cilíndrico AB ([fig. 367](#)) de palastro ennegrecido, cerrado completamente, con la sola excepción de sus dos fondos, en los cuales existen dos aberturas opuestas, y cuya forma es la de un sector circular, siendo visible una sola de ellas *o* en la figura a la cual nos contraemos. El cajón, si bien se halla fijo, se encuentra atravesado en su centro por un eje móvil, en el cual se fijan dos pantallas circulares MM y PP de palastro negro ([fig. 368](#)), con cuatro aberturas cada una, de forma igual a las que antes se han descrito, pero alternadas, de suerte que las partes llenas o sólidas de una pantalla correspondan constantemente a las partes vacías o cortadas de la otra. Finalmente, una y otra pantalla se hallan encerradas en el cajón, y sobre su eje existe un pequeño piñón exterior que recibe el movimiento de un manubrio *m*, por medio de una serie de grandes ruedas que engranan con los piñones, a fin de aumentar su velocidad.

Para estudiar con el auxilio del aparato que nos ocupa la fosforescencia de una sustancia cualquiera, se coloca un fragmento *a* de la misma sobre un estribo interpuesto entre las dos pantallas giratorias, resultando en virtud de esta disposición, que jamás puede pasar la luz a un mismo tiempo por las aberturas opuestas de las paredes A y B del cajón porque siempre hay entre ellas una de las partes llenas de la pantalla MM o de la PP. Por lo tanto, cuando la luz que viene del otro lado del aparato se proyecta sobre el cuerpo *a*, éste ya no será visible respecto al observador que está mirando la abertura *o*, puesto que entonces le tapará uno de los llenos de la pantalla PP; y recíprocamente, siempre que dicho observador vea el cuerpo *a*, éste dejará de encontrarse alumbrado, por interceptar la luz los llenos de la otra pantalla MM. Surgirán, pues, apariciones y eclipses del cuerpo *a*; los últimos, durante el tiempo en que cese de hallarse alumbrado, y las primeras, durante el intervalo en que lo esté. Respecto al tiempo que media entre el eclipse y la aparición, depende de la velocidad de rotación de las pantallas. Supongamos, por ejemplo, que efectúen 150 revoluciones por segundo; en este caso, como una vuelta de las pantallas se verifica en 1/150 de segundo, habrá en el mismo espacio de tiempo cuatro apariciones y cuatro eclipses. Por consiguiente, el intervalo que medie entre el instante en que actúa la luz y el en que se observa el cuerpo, será 1/8 de 1/150 de segundo, o unos 0,0008 de segundo.

Expuestos los detalles que acabamos de describir, manifestaremos, que para efectuar experiencias con el fosforoscopio, hay que encerrarse en una cámara oscura, y situándose detrás del aparato, por el lado de los engranes, dirigiendo por el otro sobre la sustancia a un rayo de luz, bien solar o eléctrica. Comunicando entonces a las pantallas una rotación más o menos rápida aparece luminoso el cuerpo *a* por transparencia continua, tan pronto como el intervalo entre la insolación y la observación es menor que lo que dura la fosforescencia del cuerpo. Por este medio experimental, M. Ed. Becquerel ha visto que muchos cuerpos, que no eran luminosos por el procedimiento ordinario, lo son con el fosforoscopio: tal es, por ejemplo, el espato de Islandia. Las sustancias que presentan el brillo más intenso, son los compuestos de uranio, que empiezan a difundir una claridad verde muy viva, cuando puede verlos el observador 0,003 o 0,004 de segundo después de la insolación; en cambio otras muchas sustancias no atestiguan ningún efecto en el fosforoscopio, como son el cuarzo, el fósforo, los metales y los líquidos.

▽△

## Capítulo VIII

▽△

### Doble refracción, interferencias, polarización

527. Doble refracción. -Sabemos ya (445) que la *doble refracción* es la propiedad que poseen muchos cristales de dar origen con un solo rayo incidente, a dos rayos refractados, resultando de aquí que cuando se mira un objeto al través de estos cristales, se le vea doble. Bartholin fue el primero que observó la doble refracción en 1647; pero a Huyghens le cupo la gloria de dar de ella, en 1673, una teoría completa.

Los cristales que poseen la doble refracción se llaman *bi-refringentes*. Esta propiedad se observa en grados desiguales en cuantos no pertenecen al sistema cúbico. Los cuerpos cristalizados en este sistema, y los que no cristalizan, como el vidrio, no poseen refracción doble; pero pueden adquirirla accidentalmente, cuando se comprimen con desigualdad, o bien por el *temple*, es decir, por el enfriamiento después de calentados. Jamás son bi-refringentes los líquidos ni los gases. El cuerpo más notable entre todos es el espato de Islandia o cal carbonatada.

Fresnel ha explicado la doble refracción por una densidad desigual del éter, en los cristales bi-refringentes; de donde resulta una velocidad de movimiento vibratorio más rápido en cierta dirección, determinada por el estado molecular del cristal. Esta hipótesis se encuentra confirmada por la propiedad que adquiere el cristal de quedar bi-refringente por la templadura y por la compresión (555).

528. Cristales de un eje. -En un cristal dotado de doble refracción, hay siempre una o dos refracciones, en las cuales no se observa más que la refracción sencilla, es decir, que no se ve más que una imagen de los objetos. Estas direcciones se llaman *ejes ópticos* o *ejes de doble refracción*, si bien es impropia esta última denominación, pues precisamente no se efectúa la doble refracción en el sentido de estos ejes.

Denominanse *cristales de un eje* los que no ofrecen más que una dirección en la cual no se bifurca la luz, y *cristales de dos ejes* los que presentan dos.

Los cristales de un eje, de uso más frecuente en óptica, son: el espato de Islandia, el cuarzo y la turmalina. El espato de Islandia tiene la forma de un romboedro cuyas caras están inclinadas  $150^{\circ} 5'$  (fig. 369). Las caras, en número de seis, son rombos que se reúnen, de tres en tres, por sus ángulos obtusos, en las extremidades de una recta *ab*, que es el eje de cristalización.

Respecto a los cristales de un eje ha encontrado M. Brewster la siguiente ley general: *el eje de doble refracción coincide siempre con el de cristalización*.

Denominase *sección principal* de un cristal de un eje, el plano que, pasando por el eje óptico, es perpendicular a una cara natural o artificial del cristal.

529. Rayo ordinario y rayo extraordinario. -De los dos rayos refractados en los cristales de un eje, sigue siempre uno de ellos las leyes de la refracción simple (446), pero no el otro; es decir, que no es constante la relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción, y que el plano de refracción no coincide con el de incidencia. El primer rayo es el *ordinario*, y el segundo el *extraordinario*, por lo que las imágenes que les corresponden reciben a su vez respectivamente los nombres de *ordinaria* y *extraordinaria*.

El rayo ordinario y el rayo extraordinario tienen índices diferentes: en ciertos cristales es mayor el índice del rayo ordinario; en otros lo es el del extraordinario. Fresnel llamó a los primeros *cristales negativos*, y a los últimos *cristales positivos*. El espato de Islandia, la turmalina, el zafiro, el rubí, la esmeralda, la mica, el prusiato de potasa y el fosfato de cal son negativos. El cuarzo, el circón, el hielo y el apofilito de un solo eje, son positivos. La clase de los cristales negativos es mucho más numerosa que la de los positivos.

La fig. 370 demuestra la marcha de los rayos en este fenómeno, pues el paralelogramo *abcd* representa un corte principal de un romboedro de espato de Islandia. Puesto éste sobre un cartón blanco, se mira al través un punto negro *o* marcado sobre el cartón. El rayo incidente que parte del punto *o* se divide en dos, *oi* y *oe*, que, refractándose desigualmente en la emergencia, dan al ojo dos imágenes *o'*, y *o''*.

Haciendo girar el romboedro sobre sí mismo, teniéndolo siempre aplicado sobre el cartón, queda fija la imagen ordinaria, pero la extraordinaria gira alrededor de la primera, lo cual indica que el plano del rayo refractado se mueve con relación al del de incidencia, y de consiguiente que el rayo extraordinario no sigue las leyes de la refracción simple.

530. Leyes de la doble refracción en los cristales de un eje. El fenómeno de la doble refracción, en los cristales de un eje, se halla sometido a las leyes siguientes:

- 1.<sup>a</sup> El rayo ordinario, sea cual fuere el plano de incidencia, sigue siempre las dos leyes generales de la refracción simple (446).
- 2.<sup>a</sup> En toda sección perpendicular al eje, el rayo extraordinario sigue también estas dos leyes como el ordinario; pero su índice de refracción no es el mismo que el de este último rayo, y de ahí la distinción de índices *ordinario* y *extraordinario*.
- 3.<sup>a</sup> En toda sección principal, no sigue el rayo extraordinario más que la segunda ley de refracción; es decir, coinciden los planos de incidencia y de refracción; pero no es constante la relación de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción.

4.<sup>a</sup> No siendo la misma la velocidad de la luz para el rayo ordinario que para el extraordinario, la diferencia de los cuadrados de estas dos velocidades es proporcional al cuadrado del seno del ángulo que el rayo extraordinario forma con el eje.

Esta última ley es la traducción de una fórmula empírica dada por M. Biot para relacionar entre sí las velocidades de dos rayos. Dedúcese también de las fórmulas que obtuvo Fresnel por consideraciones puramente teóricas, y que son notables, por cuanto se puede deducir de ellas la fórmula de M. Biot.

Huyghens, que fue el primero en exponer una teoría completa de la doble refracción fundada en el sistema de las ondulaciones, dio a conocer una construcción geométrica muy notable, por medio de la cual se puede construir en todas sus posiciones, con relación al eje, el rayo refractado, cuando se conoce su incidencia; pero la teoría de Huyghens fue desechada por los físicos, hasta que Malus restableció su exactitud practicando numerosos experimentos.

531. Leyes de la doble refracción en los cristales de dos ejes. -Hay muchos cristales de dos ejes, como los de los sulfatos de níquel, de magnesia, de barita, de potasa, de hierro, el azúcar, la mica y el topacio del Brasil. En estos diferentes cristales acepta el ángulo de los dos ejes valores muy diferentes, pues varía desde 3 a 90 grados.

Fresnel ha descubierto por la teoría, y demostrado experimentalmente, que en los cristales de dos ejes ninguno de los rayos refractados sigue las leyes de la refracción simple; pero llamando *línea media* y *línea suplementaria*, a las que dividen el ángulo de los dos ejes y su suplemento en dos partes iguales, ha encontrado que, en toda sección perpendicular a la línea suplementaria, lo efectúa otro rayo.

Pronto se verán, en los aparatos de polarización, muchísimas aplicaciones de la doble refracción del espato de Islandia. Esta propiedad se utilizó también en el antejo micrométrico de Rochon, que sirve para medir el diámetro aparente de los cuerpos, y para determinar la distancia de un objeto, cuando se conoce su tamaño.

▽△

## Difracción, interferencias y anillos coloreados

532. Difracción y franjas. -La *difracción* es una modificación que sufre la luz al rasar el contorno de un cuerpo, o al atravesar una pequeña abertura, modificación en virtud de la cual parece que se doblan los rayos y que penetran en la sombra. Para observar el fenómeno de la difracción, se hace entrar un haz de luz solar en la cámara oscura por un orificio muy pequeño, y se le recibe sobre una lente convergente L, de foco corto ([fig. 371](#)). Fíjase un vidrio teñido de rojo en la abertura de la cámara para que no dé paso más que a la luz roja, y una pantalla opaca *e*, de borde delgado, y situada detrás la lente, más allá de su foco, intercepta la mitad del cono luminoso, mientras que la otra va a proyectarse sobre una lámina *b*, representada de cara en B. Obsérvase entonces dentro de la sombra geométrica limitada por la recta *ab*, una luz rojiza bastante viva, que decrece en intensidad a medida que los puntos de la placa distan más del límite de la sombra; y en la parte de la placa que debería estar uniformemente iluminada, se ve una alternativa de franjas oscuras y luminosas que van debilitándose gradualmente y acaban por desaparecer enteramente.

Los diversos colores del espectro dan origen al mismo fenómeno, pero con la diferencia de que las franjas son tanto más angostas, y de consiguiente, menos dilatadas, cuanto menos refrangible es la luz. Resulta de esta última propiedad que, cuando se experimenta con luz blanca, las franjas de cada color simple están separadas por su desigual difracción, y se presentan irisadas las que se forman sobre la pantalla B.

Si, en vez de interponer entre la lente L y la pantalla *b* los bordes de un cuerpo opaco, se coloca un cuerpo opaco, muy tenue, como un cabello o un alambre muy fino, no sólo hay también franjas alternativamente oscuras y luminosas en los dos lados de la porción de la pantalla que corresponde a la sombra geométrica

del cuerpo, sino que en esta sombra misma se ven iguales alternativas de fajas oscuras y claras, es decir, que se producen entonces franjas exteriores e interiores.

El padre Grimaldi, de Bolonia, fue el primero que dio a conocer, en 1663, el fenómeno de la difracción y de las franjas, pero sin exponer su explicación. Newton trató de explicarlo en el sistema de la emisión, admitiendo una acción repulsiva que ejercen los cuerpos sobre los rayos luminosos; pero esto no nos daba razón de las franjas interiores. Tomás Young dijo, fundándose en el sistema de las ondulaciones, que dependía de la interferencia (533) de los rayos directos con los reflejados por los bordes de los cuerpos opacos. Pero, según esta teoría, la formación de las imágenes dependería de la naturaleza de los cuerpos opacos cuyos contornos va rasando la luz, y además, de su grado de pulimento, lo cual es contrario a la observación. Fresnel fue el primero que explicó todos los fenómenos de la difracción, fundándose siempre en la teoría de las ondas luminosas.

533. Interferencias. -Llámase *interferencia* una acción mutua que ejercen entre sí dos rayos luminosos cuando, emitidos por un mismo foco, se encuentran según un ángulo muy pequeño. Puede observarse sencillamente esta acción por medio del experimento que sigue: por dos aberturas circulares muy pequeñas, de igual diámetro y que disten muy poco entre sí, se da paso, en una cámara oscura, a dos haces de luz homogénea, de luz roja, por ejemplo, lo cual se obtiene fijando en los dos orificios de la cámara oscura vidrios teñidos de rojo, que sólo permiten la entrada a la luz de este color. Los dos haces forman así en la cámara dos conos luminosos que van a encontrarse a cierta distancia; se los recibe un poco más allá de su punto de encuentro, sobre un cartón blanco, y entonces se nota, en el segmento común a los dos discos que se producen sobre esta placa, franjas muy oscuras alternativamente rojas y negras. Pero, si se cierra una de las dos aberturas, desaparecen las franjas reemplazándolas una tinta rojiza casi uniforme, y de esta desaparición, cuando se intercepta uno de los haces, se deduce que son el resultado del encuentro de dos haces que se cruzan oblicuamente.

Débase este experimento a Grimaldi, quien había deducido la notable consecuencia de que la luz agregada a luz produce oscuridad. En el anterior experimento hay difracción, porque los rayos luminosos van rasando los bordes de las aberturas; pero sin necesidad de que intervenga este fenómeno, pueden hacerse interferir dos haces por medio del siguiente aparato de Fresnel.

Se sitúan uno junto a otro dos espejos M y N planos de metal (fig. 372), de suerte que forman un ángulo MON muy obtuso. Una lente semicilíndrica L, de foco corto, concentra delante de estos espejos un haz de luz roja, introducido en la cámara oscura, y que cae parcialmente sobre uno de los espejos y en parte sobre el otro. Después de reflejadas las ondas luminosas van a encontrarse según un ángulo muy pequeño, como lo indica la figura, más inmediato del espejo N que del M, y si entonces se reciben sobre una pantalla blanca, se observan en ella fajas alternativamente oscuras y brillantes, paralelas a la línea de intersección de los dos espejos, y simétricamente dispuestas a los dos lados del plano OKA, que pasa por dicha línea y que divide en dos mitades el ángulo que entre sí constituyen los rayos reflejados.

Interceptando la luz que cae sobre uno de los espejos, desaparecen las franjas; de manera que el resultado es idéntico al del experimento anterior.

Finalmente, si se hace pasar el haz ya reflejado por uno de los espejos, al través de una lámina de vidrio de caras paralelas, varía la situación de todas las franjas, a derecha o a izquierda, según una cantidad que aumenta con el espesor de la lámina. Este último experimento revela que la acción mutua de los rayos que se encuentran, se modifica por la sustancia que atraviesan, deduciéndose de aquí que se propaga la luz con menos velocidad en el vidrio que en el aire.

534. Principio de las interferencias. -No puede explicarse el fenómeno de las interferencias, lo mismo que el de la difracción, en el sistema de la emisión, pero sí en el de las ondulaciones, según lo efectuó satisfactoriamente Fresnel. Animadas, según este último sistema, las moléculas del éter de un movimiento de vaivén sumamente rápido (414), se llama *longitud de ondulación* el espacio que abraza la ida y la vuelta de cada molécula, y *semiondulación* sólo una u otra; de suerte que una ondulación completa se compone de dos semiondulaciones de sentido contrario. Ahora bien; cuando dos sistemas de ondulaciones de longitudes e intensidades iguales se propagan en una misma dirección, si uno de los dos va algo adelantado o retrasado con respecto al otro, exactamente un número par de semilongitudes de ondulación, se agregan los dos sistemas para imprimir al éter un movimiento en el mismo sentido, y se duplica la intensidad de la luz; más si, por el contrario, un sistema va retrasado un número impar de

semiondulaciones, se destruyen los movimientos comunicados al éter, resultando de este hecho la oscuridad.

Tal es la explicación de las franjas oscuras y luminosas que se observaron en los experimentos de Fresnel y de Grimaldi. Las franjas que se ven en la difracción, se refieren a la misma causa.

Los dos experimentos anteriores (533) se practicaron con luz roja, y las franjas eran alternativamente negras y rojas; pero, si se repiten con luz blanca, están irisadas las franjas. Para explicar esta coloración, debe notarse que la anchura de las franjas varía con cada color simple; de manera que, cuando se hacen interferir dos haces de luz blanca, se separan las franjas que proceden de cada color, produciendo así la irisación que se observa.

Vese, por consiguiente, que esta explicación es la misma que la de los colores en la difracción.

535. Longitud de las ondulaciones, causa de los colores. -Midiendo con precisión el intervalo de dos franjas consecutivas, en el fenómeno de las interferencias, Fresnel ha deducido por el cálculo la longitud de las ondulaciones del éter, y ha reconocido que esta longitud no es la misma para todos los rayos coloreados, pero va aumentando del violeta al rojo, según lo demuestra la tabla siguiente:

Colores simples.	Longitud media de las ondulaciones en millonésimas de milímetro.
Violado.	423
Añil.	449
Azul.	475
Verde.	512
Amarillo.	551
Anaranjado.	583
Rojo.	620

La velocidad de la luz por segundo, siendo de 77000 leguas de a 4000 metros (420), es decir, de 308 millones de metros, se tendrá el número de ondulaciones correspondiente a cada color, por segundo, buscando cuántas veces la longitud de la ondulación correspondiente está comprendida en 308 millones; es decir, dividiendo este número por los de la tabla anterior; lo cual da para el violeta más de 728 millones de ondulaciones por segundo, y para el rayo rojo más de 496 millones. Correspondiendo así a cada color simple, un número de ondulaciones que le es propio, se ve que la teoría de las ondulaciones conduce a admitir que el número de vibraciones que efectúan las moléculas, en un tiempo dado, es el que determina la naturaleza de los colores, así como el número de ondas sonoras es el que produce los diferentes sonidos.

536. Colores de las láminas delgadas, anillos de Newton. -Todos los cuerpos diáfanos, sólidos, líquidos o gaseosos, reducidos a láminas suficientemente delgadas, aparecen coloreados con tintas sumamente vivas, sobre todo por reflexión. Los cristales que se exfolian en hojas muy delgadas, como la mica y el yeso, presentan este fenómeno, de la misma manera que el nácar y el vidrio soplado en una esferita muy delgada. Una gota de aceite, extendida rápidamente sobre una gran masa de agua, ofrece todos los matices del espectro en un orden constante. Una burbuja de jabón parece blanca primero pero, a medida que se hincha, van apareciendo brillantes tonos irisados, sobre todo en la parte superior, que es donde es más delgada la cubierta líquida que forma la burbuja. Dispónense estos colores en zonas concéntricas horizontales alrededor del vértice, que se le vuelve negro en el momento en que no hay el suficiente espesor para reflejar la luz, estallando entonces súbitamente la burbuja.

Newton fue el primero que estudió el fenómeno de los anillos coloreados en las burbujas de jabón. Deseando averiguar el espesor que hay entre el espesor de la lámina delgada, el color de los anillos y su extensión, producía éstos por medio de una capa de aire interpuesta entre dos vidrios, plano el uno, convexo y de foco muy largo el otro ([fig. 373](#)). Bien enjutas las dos superficies y expuestas en una ventana a la luz solar, de modo que se las vea por reflexión, le percibe en el punto de contacto una mancha negra rodeada de anillos coloreados, en número de seis o siete cuyas tintas van debilitándose

gradualmente (fig. 374). Si se ven por trasmisión los vidrios, es blanco el centro, y los colores de cada uno de ellos son exactamente complementarios de los de los anillos por reflexión.

Con una luz homogénea, el color rojo por ejemplo, son sucesivamente negros y rojos los anillos, y de un diámetro tanto menor, cuanto más refrangible es el color; pero con la luz blanca están coloreados los anillos con los diferentes colores del espectro, lo cual proviene de que, teniendo los diversos colores simples diámetros distintos, no se superponen los anillos, sino que se separan más o menos.

Si la distancia focal de la lente (fig. 373) es de tres o cuatro metros, pueden observarse a simple vista los anillos; pero si aquélla es menor, hay que acudir a las lentes.

Calculando el espesor de la capa de aire comprendida entre la lámina y la lente, encontró Newton que, para los anillos oscuros, estos espesores son entre sí como la serie de los números pares 0, 2 4 6...; y que, para los anillos brillantes estos mismos espesores varían como la serie de los números impares 1, 3, 5, 7...; siendo independientes estas relaciones de la curvatura de la lente y del color de los rayos que la atraviesan. Newton encontró, además, que el espesor de la capa de aire interpuesta, disminuyendo a medida que la refrangibilidad aumenta, este espesor es de 161 millonésimas de milímetro para el rojo extremo del primer orden, es decir, correspondiente al primer anillo, mientras que para el violado extremo dicho espesor no es más que de 101 millonésimas de milímetro. Por último, para anillos del mismo orden, es decir, del mismo rango, los diámetros son tanto mayores, cuanto el color simple que cae sobre la lente es menos refrangible.

La coloración de las láminas tenues y de los anillos de Newton es un fenómeno de interferencia, que depende de que los rayos reflejados sobre la segunda superficie de la lámina interfieren con los que reflejó la primera. Proceden los anillos vistos por refracción de la interferencia de los rayos transmitidos directamente con los que lo son después de dos reflexiones interiores sobre las caras de la lámina (428).

537. Fenómeno de los resaltos. -Llámase *resalto*, en óptica, una serie de rayas opacas y rayas transparentes muy aproximadas entre sí. Tales son las líneas paralelas que se graban con diamante, sobre vidrio, para formar los micrómetros (484). Las rayas son aquí la parte opaca del resalto. Si se recibe por trasmisión la luz de una vela al través de uno de dichos resaltos que contenga 100 rayas por milímetro, se percibe una serie de pequeños espectros que tienen el rojo fuera y el azul dentro. Lo propio sucede mirando la llama de una vela al través de las barbas de una pluma situada cerca del ojo. Esta coloración es también un fenómeno de interferencia.

▽△

## Polarización

538. Polarización por reflexión. -La polarización es una modificación particular de los rayos luminosos, en virtud de la cual, después de reflejados o refractados, no pueden reflejarse o refractarse de nuevo en ciertas direcciones. Se ha adoptado la palabra polarización para caracterizar estas nuevas propiedades de la luz, porque, para explicarlas en la teoría de la emisión, se admite que las moléculas luminosas tienen polos y ejes que, por la reflexión bajo cierto ángulo, siguen todas en un mismo sentido. La polarización fue descubierta, en 1810, por el físico francés Malus, que murió dos años después.

Se polariza la luz por reflexión o por refracción. Reflejada sobre una lámina de vidrio negro, se polariza la luz si el ángulo de incidencia con el vidrio es de  $35^{\circ} 25'$ . he aquí algunas de las propiedades del rayo polarizado:

1.<sup>a</sup> No sufre este rayo reflexión alguna al incidir sobre una segunda lámina de vidrio, según el mismo ángulo de  $35^{\circ} 25'$ , si el plano de incidencia sobre ésta es perpendicular al de la primera; pero sí se refleja más o menos bajo las otras incidencias.

2.<sup>a</sup> Transmitido por un prisma bi-refringente (552,  $3^{\circ}$ ), no da más que una imagen, si la sección principal es paralela o perpendicular al plano de incidencia, mientras que en cualquiera otra posición, con relación a este plano, forma dos imágenes más o menos intensas.

3.º No puede transmitirse por una lámina de turmalina (542, 2.º) cuyo eje de cristalización es paralelo al plano de incidencia, y al contrario, lo efectúa con tanta más facilidad, cuanto más se acerca el eje de la turmalina a la dirección perpendicular a este plano.

Todos los cuerpos pueden polarizar la luz por reflexión, como el vidrio, pero más o menos completamente y según ángulos de incidencia desiguales. El mármol negro, por ejemplo, polariza completamente la luz, mientras que el diamante, el vidrio ordinario y el vidrio de antimonio no la polarizan más que parcialmente. Los metales son los cuerpos que poseen un poder polarizante más débil.

539. Ángulo y plano de polarización. -El *ángulo de polarización* de una sustancia es el ángulo que debe formar el rayo incidente con una superficie plana y pulimentada de esta sustancia, a fin de que el rayo reflejado se polarice del modo más completo. Para el agua vale este ángulo  $37^{\circ} 15'$ ; para el vidrio,  $35^{\circ} 25'$ ; para el cuarzo,  $32^{\circ} 28'$ ; para el diamante,  $22^{\circ}$ ; y  $33^{\circ} 30'$  para la obsidiana, que es una especie de vidrio negro natural que polariza muy bien la luz.

M. Brewster ha expuesto respecto al ángulo de polarización la ley siguiente, notable por su sencillez: *el ángulo de polarización es el de incidencia, para el cual el rayo reflejado es perpendicular al refractado*. Con todo, no es aplicable esta ley a la luz reflejada por los cristales bi-refringentes.

En la polarización por reflexión, se denomina *plano de polarización* el plano de reflexión en el cual se polariza la luz; y dicho plano coincide con el de incidencia, y contiene, de consiguiente, al ángulo de polarización. En este plano, una vez reflejada la luz, no puede reflejarse según el ángulo de polarización en un plano perpendicular al primero; y tampoco es trasmisible en este plano por una turmalina de eje paralelo al plano. Todo rayo polarizado por refracción posee igualmente un plano de polarización, es decir, un plano en el cual se presentan las propiedades que acabamos de enunciar.

540. Polarización por simple refracción. -Cuando un rayo de luz no polarizada sobre una lámina de vidrio de caras paralelas, según el ángulo de polarización, sólo se refleja en parte, pues el resto atraviesa la lámina refractándose, y la luz transmitida se polariza parcialmente en un plano perpendicular al de reflexión, y de consiguiente, al de polarización de la luz polarizada por reflexión. Observó además Arago que los haces reflejados y refractados contienen igual cantidad de luz polarizada, y que la reunión de estos dos haces produce la luz natural. Podemos considerar, pues, la luz ordinaria, como formada de dos haces iguales polarizados en ángulo recto.

Como una sola lámina de vidrio no polariza jamás por completo la luz, se pueden reunir muchas superpuestas, las cuales, por medio de reflexiones y refracciones sucesivas, producen un efecto más completo. Varias láminas de vidrio reunidas así, forman lo que se llama una *pila de cristales*, de que se saca partido frecuente para obtener un haz de luz polarizada.

541. Polarización por doble refracción. -Se polariza por doble refracción la luz, cuando atraviesa un cristal de espato de Islandia o de cualquiera otra sustancia bi-refringente. Los dos haces, distintos en su emergencia, en este caso, están ambos polarizados por completo, pero en distintos planos, que son exacta o muy sensiblemente perpendiculares entre sí. Para demostrarlo, se mira, al través de un romboedro de espato de Islandia, un punto negro marcado sobre un pliego de papel. A la simple vista se notan dos imágenes de igual brillo; pero si se interpone una turmalina que se hace girar en su propio plano, desaparece y reaparece dos veces en una revolución cada imagen, lo cual demuestra que los dos rayos emergentes están polarizados en planos perpendiculares entre sí (542, 2.º). Cesa la imagen ordinaria en el momento en que el eje de la turmalina es paralelo a la sección principal de la superficie de incidencia, y la extraordinaria, cuando el mismo eje es perpendicular a la citada sección. Dedúcese de aquí que el haz ordinario está polarizado en el plano de la sección principal, y el extraordinario en uno perpendicular a la misma.

542. Polariscopos o analizadores. -Llámanse *polariscopos* o *analizadores* unos instrumentitos que sirven para reconocer cuándo está polarizada la luz, y para determinar su plano de polarización. Los analizadores más usados son el espejo de vidrio negro, una lámina delgada de turmalina, el prisma bi-refringente, el de Nicol y las pilas de cristales (540).

1.º *Espejo negro*. -Pronto veremos (fig. 378) que un espejo negro  $m$  da a conocer si la luz está polarizada, no reflejándose bajo el ángulo de polarización, cuando el plano de incidencia es perpendicular al de polarización: el espejo  $m$  es, pues, un analizador.

2.º *Turmalina*. -El analizador más sencillo es una lámina de turmalina parda, tallada paralelamente a su eje de cristalización. Este mineral, que es bi-refringente, posee la propiedad de dar paso a la luz natural solamente, y a la polarizada en un plano perpendicular a su eje, comportándose como un cuerpo opaco con la luz polarizada, cuyo plano de polarización es paralelo a este eje. Para servirse de este analizador, se le interpone entre el ojo y el haz luminoso que se desea observar, y luego se hace girar con lentitud la turmalina en su propio plano: si entonces presenta siempre el haz la misma intensidad, no contiene luz polarizada; pero si decrece y aumenta sucesivamente el brillo, comprende el haz tanta más luz polarizada, cuantas más variaciones de intensidad experimenta. En el acto del *mínimum* está determinado el plano de polarización por el eje de la turmalina y por el visual. El rayo extraordinario pasa por una turmalina tallada paralelamente al eje, pero el ordinario es absorbido por completo, a lo menos si es bastante colorada la turmalina.

3.º *Prisma bi-refringente*. -Constrúyense con el espato de Islandia prismas bi-refringentes que sirven de analizadores en muchos instrumentos de óptica, especialmente en el aparato de M. Biot para el estudio de la polarización circular (fig. 381). Es necesario que se hallen acromatizados estos prismas, porque cuando no es simple, la luz que los atraviesa, la descompone la refracción. Suéldase para esto al prisma de espato otro de vidrio, de un ángulo tal, que, refractándose la luz en sentido contrario destruye casi enteramente el efecto de la dispersión. Se obtiene el *máximum* de separación entre la imagen ordinaria y la extraordinaria, tallando el prisma bi-refringente de manera que sus aristas sean paralelas o perpendiculares al eje óptico del cristal.

Fijo el prisma bi-refringente en la extremidad de un tubo de cobre (fig. 375) se conoce que se halla completamente polarizado un haz luminoso que se hace pasar por este tubo, cuando, al darle vuelta, se notan, durante una revolución completa, cuatro posiciones rectangulares, en las cuales no se percibe más que una imagen. Desaparece la imagen ordinaria, cuando el plano de la sección principal es perpendicular al de polarización; y se borra la extraordinaria, cuando el plano de polarización coincide con la sección principal. En todas las demás posiciones que acepta el prisma bi-refringente, varía la intensidad relativa de las imágenes. Vese al mismo tiempo que el prisma bi-refringente puede servir para determinar la dirección del plano de polarización, pues basta buscar la posición de la sección principal del prisma, en la cual, siendo normal el haz incidente, se apaga la imagen extraordinaria.

4.º *Prisma de Nicol*. -El prisma de Nicol es el más precioso analizador, porque es completamente incoloro; polariza por completo la luz, y no trasmite más que un solo rayo polarizado en la dirección de su eje.

Para construirle, se toma un romboedro de espato de Islandia, de unos 20 a 30 milímetros de altura, por 8 o 9 de ancho, y se le corta en dos por un plano perpendicular al plano de las diagonales mayores de las bases, y que pase por los vértices obtusos más aproximados entre sí, y luego se unen las dos mitades en igual orden con bálsamo del Canadá. El paralelepípedo así construido, constituye el prisma de Nicol (fig. 376).

Siendo el índice de refracción del bálsamo del Canadá menor que el ordinario del espato de Islandia, y mayor que el extraordinario, resulta que al penetrar un rayo luminoso  $SC$  (fig. 377) en el prisma, sufre el rayo ordinario en la superficie  $ab$  la reflexión total, y acepta la dirección  $CdO$ , mientras que el extraordinario  $Ce$  es el único que pasa; es decir, que el prisma de Nicol, lo mismo que la turmalina, sólo deja pasar el rayo extraordinario. Puede servir, pues, de analizador, como la turmalina; y además, para obtener un haz de luz blanca polarizada, lo mismo que el prisma bi-refringente.

543. Aparato de Noremburg. -M. Noremburg ha ideado un aparato sencillo y poco costoso, que se usa para repetir la mayor parte de los experimentos relativos a la luz polarizada. Consta este aparato de dos columnas  $b$  y  $d$  (fig. 378), de cobre, que sostienen un cristal no azogado  $n$ , móvil alrededor de un eje horizontal. Un circulito graduado  $c$  indica el ángulo de este espejo con la vertical. Entre los pies de estas dos columnas existe un espejo azogado  $p$ , fijo y horizontal, y en su extremidad superior sostienen un platillo graduado  $i$ , en el cual puede girar un disco circular  $o$ . Tiene éste en el centro una abertura cuadrangular, con un espejo de vidrio negro  $m$ , que forma con la vertical un ángulo igual al de

polarización. Por fin, puede fijarse por medio de un tornillo de presión un disco anular  $k$ , en las columnas a diferentes alturas. Un segundo anillo  $a$ , sostenido por el primero, puede aceptar diversas inclinaciones, y posee una pantalla negra  $e$ , con un orificio circular en su centro.

Formando el cristal  $n$  con la vertical un ángulo de  $35^{\circ} 25'$ , es decir, igual al de polarización del vidrio, los rayos luminosos  $Sn$ , que le encuentran según dicho ángulo, se polarizan (538), reflejándose en la dirección  $np$  hacia el espejo  $p$ , que los repele en la dirección  $pnr$ . Después de haber atravesado el cristal  $n$ , cae el haz polarizado sobre el espejo negro  $m$  según un ángulo de  $35^{\circ} 25'$ , pues forma este espejo precisamente el mismo ángulo con la vertical. Si se hace mover horizontalmente el disco  $o$ , al cual está fijo el espejo  $m$ , varía éste de posición, pero conservando siempre la misma inclinación, y se encuentran dos posiciones, en las cuales no refleja al haz incidente  $nr$ . Sucede esto cuando el plano de incidencia sobre este espejo, es perpendicular al de incidencia  $Snp$  sobre el cristal  $n$ . Tal es la posición que representa el grabado anterior. En cualquiera otra posición, el haz polarizado es reflejado por el espejo  $m$  en cantidad variable, observándose el máximo de luz reflejada cuando los planos de incidencia, sobre los espejos  $m$  y  $n$ , son paralelos entre sí. Si el espejo  $m$  forma con la vertical un ángulo mayor o menor que  $35^{\circ} 25'$ , es siempre reflejado el haz polarizado en todas las posiciones del plano de incidencia.

Cuando, en vez de recibir la luz polarizada sobre el espejo  $m$ , se proyecta sobre un prisma bi-refringente (542, 3.º), colocado en un tubo  $g$  (fig. 379), no se obtiene más que una imagen siempre que el plano de la sección principal del prisma coincide con el de polarización sobre el cristal  $n$ , y entonces es transmitido el rayo ordinario. También se ve una sola imagen, cuando el plano de la sección principal es perpendicular al de polarización, pasando, en tal caso, el rayo extraordinario. En cualquiera otra posición del prisma bi-refringente se observan dos imágenes, cuya intensidad varía con la posición de la sección principal.

Finalmente, si se sustituye por una turmalina el prisma bi-refringente y se la hace girar sobre sí misma, se apaga por completo el haz polarizado cuando eje de la turmalina es paralelo al plano de incidencia  $Snp$ .

Quedan, pues, así demostradas las diversas propiedades (538, 1.º, 2.º y 3.º) de la luz polarizada. Pronto veremos otras aplicaciones del aparato de Noremburg a la observación de los colores de la luz polarizada y al estudio de la polarización circular en el cuarzo.

▽△

## Polarización rotatoria

544. Rotación del plano de polarización. -Cuando un rayo polarizado atraviesa una lámina de cuarzo tallada perpendicularmente al eje de cristalización, continúa polarizado a la emergencia, pero no en el mismo plano de polarización que antes de su paso por el cuarzo. Con ciertos ejemplares se desvía el nuevo plano hacia la izquierda del antiguo, y con otros a la derecha. Este fenómeno recibe el nombre de *polarización rotatoria*. Observáronla primeramente Seebeek y Arago; pero M. Biot fue quien la estudió particularmente, dando a conocer las leyes que siguen:

- 1.º La rotación del plano de polarización no es la misma para los diversos colores simples, sino que es tanto mayor, cuanto más refrangibles son estos colores.
- 2.º En un mismo color simple y en láminas de un mismo cristal, la rotación es proporcional al espesor.
- 3.º En la rotación de derecha a izquierda o de izquierda a derecha, el mismo espesor imprime sensiblemente la misma rotación.

Denomínanse *dextrógiras* las sustancias que giran hacia la derecha, como el azúcar de caña, disuelto en agua, la esencia de limón, la disolución alcohólica de alcanfor, la dextrina y el ácido tártrico; y *levógiras* las que lo efectúan a la izquierda, como la esencia de trementina, la de laurel y la goma arábiga.

545. Coloración producida por la polarización circular. -Cuando se mira con un prisma bi-refringente una lámina de cuarzo de algunos milímetros de espesor, tallada perpendicularmente al eje, y atravesada por un haz de luz polarizada, se observan dos imágenes vivamente coloreadas, cuyas tintas son complementarias, porque, superponiéndose por sus bordes las dos imágenes, producen blanco ([figura 380](#)). Dando vueltas entonces al prisma hacia la derecha o hacia la izquierda, cambian de tintas las dos imágenes, y adquieren sucesivamente todos los colores del espectro, sin dejar por eso de ser complementarias.

Este fenómeno es una consecuencia de la primera ley sobre la polarización circular (544, 1.º). En efecto, habiendo observado M. Biot que el cuarzo hace girar el plano de polarización del rayo rojo cerca de  $17^{\circ} 30'$ , y el violeta unos  $44^{\circ} 5'$ , resulta de la gran diferencia de estos dos ángulos que, cuando emerge la luz polarizada que ha atravesado dicha lámina de cuarzo, se polarizan en planos distintos los diversos colores simples que contiene. De consiguiente, cuando el haz así transmitido pasa al través de un prisma bi-refringente, que lo descompone en otros dos polarizados en ángulos rectos (541), se dividen con desigualdad los varios colores simples entre las dos imágenes ordinarias y extraordinarias que ofrece el prisma, resultando de aquí que son éstas necesariamente complementarias, encontrándose en la una los colores que faltan en la otra.

Obsérvanse muy bien estos fenómenos de coloración por medio del aparato de Noremburg ([fig. 378](#)). Colócase, al efecto, sobre la lámina *e* ([fig. 379](#)), otra de cuarzo *s*, tallada perpendicularmente al eje, y fija en un disco de corcho; luego, estando inclinado el espejo *n* ([fig. 378](#)), de modo que deje pasar por el cuarzo un haz polarizado, se mira al través de un prisma bi-refringente *g* ([fig. 379](#)), y haciendo girar el tubo en el cual se halla este prisma, se observan las imágenes complementarias que produce el paso de la luz polarizada por el cuarzo.

546. Poder rotatorio de los líquidos. -El cuarzo es la única sustancia sólida en la cual se había notado la polarización circular; pero M. Biot observó la misma propiedad; en muchos líquidos y disoluciones. Cerciorose, además, el mismo físico, de que el movimiento del plano de polarización puede dar a conocer diferencias de composición en cuerpos que no revelan ninguna por el análisis químico. Por ejemplo, el azúcar de uva hace girar hacia la izquierda el plano de polarización, y el azúcar de caña hacia la derecha, por más que sea idéntica la composición química de ambos azúcares.

Encontró M. Biot que el poder rotatorio de los líquidos es mucho menor que el del cuarzo. En el jarabe de azúcar de caña concentrado, que es uno de los líquidos que poseen en más alto grado el poder rotatorio, es éste treinta y seis veces menor que en el cuarzo, de manera que se necesita operar con columnas líquidas muy gruesas, o sea de unos 20 centímetros.

La [fig. 381](#) representa el aparato que adoptó M. Biot para medir el poder rotatorio de los líquidos. En una canal de cobre *g*, fija en un sostén *r*, existe un tubo *d* de 20 centímetros de longitud lleno del líquido, sobre el cual se va a experimentar. Este tubo, que es de cobre, se halla estañado interiormente, y cerrado por sus dos extremidades por dos cristales de caras paralelas sujetos por dos casquillos de tornillo. En *m* existe un espejo de vidrio ennegrecido, que forma con el eje de los tubos *b*, *d*, *a*, idéntico para los tres, un ángulo igual al de la polarización, de donde resulta que está polarizada la luz que refleja el espejo *m* en la dirección *bda*. En el centro del círculo dividido *h*, en el tubo *a*, y perpendicularmente al eje *bda*, se ve un prisma bi-refringente acromatizado, que puede dar vueltas según se desee alrededor del eje del aparato, por medio de un botón *n*. Se fija éste a una alidada *c*, que posee un vernier, y que marca el número de grados que se gira. Por último, según la posición del espejo *m*, el plano de polarización *Sod* del haz reflejado, es vertical, encontrándose en este punto el cero de la graduación sobre el círculo *h*.

Antes de colocar el tubo en la canal *g*, se apaga la imagen extraordinaria que da el prisma bi-refringente siempre que la alidada *c* corresponde al cero de la graduación, porque entonces se encuentra vuelto el prisma bi-refringente, de modo que su sección principal coincide con el plano de polarización (542, 3.º). Lo propio sucede también cuando el tubo *d* está lleno de agua o de cualquiera otro líquido *inactivo*, como el alcohol y el éter, lo cual demuestra que no ha girado el plano de polarización. Pero si se llena el tubo de una disolución de azúcar de caña o de cualquiera otro líquido *activo*, reaparece la imagen extraordinaria, y para apagarla es preciso que forme la alidada cierto ángulo a derecha o a izquierda del cero, según sea dextrógiro o levógiro el líquido, lo cual demuestra que el plano de polarización ha formado también el mismo ángulo. Con la disolución de azúcar de caña se efectúa la rotación hacia la derecha, y si, con una misma disolución, se toman tubos más o menos largos, se encuentra que crece la rotación proporcionalmente a la longitud, lo cual se halla conforme con la segunda ley de M. Biot (544); y por fin,

si con un tubo de longitud constante se toman disoluciones más o menos ricas de azúcar, se observa que crece la rotación como la cantidad de azúcar disuelta, de suerte que del ángulo de desviación se puede producir el análisis cuantitativo de una disolución.

En el experimento que acabamos de describir, conviene operar con luz simple, porque poseyendo los diferentes colores del espectro distintos poderes rotatorios, resulta que se descompone la luz blanca al atravesar un líquido activo, y que la imagen extraordinaria no desaparece por completo en ninguna posición del prisma bi-refringente, limitándose tan sólo a cambiar de tinta. Para obviar este inconveniente, se coloca en el tubo *a*, entre el tubo y el prisma bi-refringente, un vidrio teñido de rojo por el óxido de cobre, el cual sólo deja pasar sensiblemente la luz roja. La imagen extraordinaria se apaga, pues, entonces, siempre que la sección principal del prisma coincida con el plano de polarización del haz rojo.

547. Sacarímetro de M. Soleil. -Valiose M. Soleil de la propiedad rotatoria de los líquidos, descubierta por M. Biot, para construir un aparato destinado a analizar las sustancias sacaríferas, por lo cual ha recibido este aparato el nombre de *sacarímetro*.

La [fig. 382](#) representa el sacarímetro dispuesto horizontalmente sobre su pie, y la [383](#) da su corte longitudinal con las modificaciones recientemente introducidas en él por M. Duboscq, yerno y sucesor de M. Soleil. Este instrumento, sencillo bajo el punto de vista práctico, no deja de ser complicado con relación al teórico, porque supone conocidos los principales fenómenos de la doble refracción y de la polarización.

El principio de este aparato no es la amplitud de la rotación del plano de polarización como en el de M. Biot (546), sino la *compensación*, es decir, el uso de una segunda sustancia activa que actúa en sentido inverso al de la que se quiere analizar, y cuyo espesor puede variar hasta que se destruyan por completo las acciones contrarias de ambas sustancias; de suerte que, en vez de medir la desviación del plano de polarización, se mide el espesor que debe darse a la sustancia compensatriz, que es una lámina de cuarzo, a fin de obtener una perfecta compensación.

Pueden distinguirse en el aparato tres partes principales, que son: el tubo que contiene el líquido que se ha de analizar, un polarizador y un analizador.

El tubo *m* que contiene al líquido es de cobre estañado interiormente, y se hallan cerradas sus dos extremidades por dos cristales de caras paralelas. Se coloca sobre un pie *k*, terminado por los tubos *a* y *r*, que llevan los cristales que sirven de polarizadores y de analizadores: véase la sección de éstos en la [fig. 383](#).

Delante del orificio S ([fig. 383](#)) se coloca una lámpara ordinaria con moderador, La luz que emite, en la dirección del eje del instrumento, encuentra un prisma bi-refringente *r*, que sirve de polarizador (542, 3.º). La imagen ordinaria es la única que llega al ojo, pues la extraordinaria se proyecta ya fuera del campo de la visión, a causa de la amplitud del ángulo que entre sí forman los rayos ordinario y extraordinario. Por último, el prisma bi-refringente se halla en una posición tal, que es vertical el plano de polarización y pasa por el eje del aparato.

Al salir del prisma bi-refringente, encuentra el haz polarizado una lámina de cuarzo *g* de doble refracción, es decir, que dicha lámina hace girar el plano de polarización hacia la derecha y hacia la izquierda. Consta, al efecto, de dos láminas de cuarzo de rotación contraria, yuxtapuestas la una al lado de la otra ([fig. 386](#)), de modo que sea vertical la línea de separación y que esté en el mismo plano que el eje del aparato. Estos cuarzos tallados perpendicularmente al eje, tienen un espesor de 3mm,75, al cual corresponde una rotación de 90º y dan una tinta color de rosa violáceo, que es la *tinta de tránsito*. Girando siempre el cuarzo, sea dextrógiro o levógiro, la misma cantidad, en igualdad de espesor (544, 3.º), resulta que los dos cuarzos *a* y *b* hacen girar igualmente el plano de polarización, el uno hacia la derecha y el otro hacia la izquierda. De consiguiente, si se les mira con un prisma bi-refringente, presentan con exactitud la misma tinta.

Después de atravesar el haz polarizado los cuarzos *g*, pasa por el líquido del tubo *m*, y en seguida da con una nueva lámina de cuarzo *i*, simple y de espesor arbitrario, cuyo uso veremos muy en breve.

En  $n$  está el compensador que ha de destruir la rotación de la columna líquida  $m$ . Consta de dos cuarzos de igual rotación, sea hacia la derecha, o bien hacia la izquierda, pero contraria a la de la placa  $i$ . Se obtienen estos dos cuarzos, representados en corte en la [figura 384](#), cortando oblicuamente una lámina de cuarzo de caras paralelas, en términos, de que formen dos prismas del mismo ángulo  $N$  y  $N'$ ; yuxtaponiendo en seguida estos dos según se ve en la figura, resulta una sola lámina de caras paralelas que ofrece la ventaja de poder variar de espesor, pues cada prisma está fijo en una corredera, a fin de que se mueva en uno o en otro sentido, pero conservando su paralelismo las caras homólogas. Consíguese este movimiento con una doble barra dentada y un piñón, que gira por medio de un botón  $b$  ([figuras 382 y 383](#)).

Cuando se mueven las láminas respectivamente en el sentido que indican las flechas ([fig. 384](#)), es evidente que crece la suma de sus espesores, y que disminuye cuando avanzan en el sentido opuesto. Una escala  $e$  y un vernier  $m$  ([fig. 382](#)) siguen a las placas en su movimiento, y sirven para medir las variaciones de espesor del compensador. Esta escala representada lo mismo que su vernier, en la [figura 385](#), posee dos divisiones que tienen común el cero, la una de la izquierda hacia la derecha para los líquidos dextrógiros, y la otra de la derecha hacia la izquierda para los levógiros.

Cuando se halla en el cero de la escala el vernier, la suma de los espesores de las láminas  $N$ ,  $N$  es precisamente igual a la de la placa  $i$ , y como la rotación de esta última es contraria a la del compensador, resulta nulo el efecto. Pero si se hacen correr en uno u otro sentido las láminas del compensador, supera éste al cuarzo  $i$ , y hay rotación hacia la derecha o hacia la izquierda.

Después del compensador, existe un prisma bi-refringente  $c$  ([fig. 383](#)), que sirve de analizador para observar el haz polarizado que atravesó el líquido y las diversas láminas de cuarzo. Para comprender con más facilidad el objeto del prisma  $c$ , despreciaremos por un instante los cristales y las lentes que están a su derecha en el dibujo. Si se procura que coincida primero el cero del vernier  $v$  con el de la escala, y si el líquido del tubo es inactivo, se destruyen las acciones del compensador y de la lámina  $i$ ; y como es nulo el efecto del líquido, las dos mitades de la lámina  $q$ , vistas al través del prisma  $c$ , dan rigurosamente la misma tinta, conforme hemos observado con anterioridad. Pero, si se reemplaza el tubo con líquido inactivo por otro lleno de una disolución azucarada se agrega el poder rotatorio de ésta al del mismo sentido de uno de los cuarzos de la lámina de doble rotación  $q$ , y disminuye otro tanto el del otro cuarzo. De aquí resulta que las dos mitades de la lámina  $q$  no ofrecen ya la misma tinta, y que la mitad  $a$  ([fig. 386](#)) es roja, por ejemplo, mientras que la otra es azul. Se hacen marchar entonces los prismas del compensador, dando vueltas al botón  $b$  hacia la derecha o hacia la izquierda, hasta que la diferencia de acción del compensador y de la placa  $i$  compense el poder rotatorio de la disolución, lo cual sucede en el momento en que las dos mitades de la lámina  $Q$  de doble rotación recobran su tinta primitiva.

En cuanto al sentido de la desviación y al espesor del compensador, se conocen por el movimiento relativo de la escala  $e$  y del vernier  $v$ . Las divisiones de la escala son tales que 10 de estas divisiones corresponden a una variación de 1 milímetro en el espesor del compensador; y como el *vernier* da a su vez los décimos de estas divisiones, resulta que mide variaciones de  $\frac{1}{100}$  de milímetro en el espesor del compensador.

Luego que la tinta de las dos mitades de la lámina  $Q$  es bien igual, y la misma que antes de la interposición de la disolución azucarada, se lee en la escala a qué división corresponde el vernier, y este número da inmediatamente el título de la disolución. Fúndase el cálculo en que 16gr,471 de azúcar piedra, bien seco y bien puro, disuelto en agua, reducidos a 100 centímetros cúbicos y observados en un tubo de 20 centímetros de longitud, la desviación producida es precisamente la que comporta el grosor de 1 milímetro de cuarzo. Para hacer el análisis de un azúcar en bruto, se adopta siempre un peso normal de 16gr,471 del mismo, se disuelve en agua, y reducido el volumen de la disolución a 100 centímetros cúbicos, se llena con ella el tubo de 20 centímetros de longitud, y se observa el número que indica el vernier cuando se ha encontrado la tinta primitiva. Si este número es, por ejemplo, 42, se deduce que la disolución contiene, de azúcar cristalizable, 42 por 100 del que contenía la disolución de azúcar piedra, y por consiguiente,  $16gr,471 \times \frac{42}{100}$ , o 6gr,918. Con todo, no es exacto este resultado sino mientras se esté seguro de que el azúcar sometido al experimento no se halla mezclado con otro incristalizable, o con alguna sustancia levógira. Recúrrase entonces a la *inversión*, es decir, que se trasforma por medio del ácido clorhídrico el azúcar cristalizable, que el dextrógiro, en otro incristalizable, que es levógiro, y luego se ejecuta una nueva operación, que, combinada con la primera, da la cantidad de azúcar cristalizada.

Siéndonos imposible entrar aquí en mayores detalles, respecto a este particular, remitimos al lector a un excelente opúsculo que en 1850 dio a luz M. Clerget sobre el uso del sacarímetro.

Réstanos dar a conocer el uso de los cristales y de las lentes  $o, g f a$ , que se encuentran a continuación del prisma  $c$  (fig. 383). Su conjunto forma lo que M. Soleil ha llamado el *productor de las tintas sensibles*. En efecto, la tinta más sensible, es decir, la que permite distinguir una diferencia muy débil en la coloración de las dos mitades de la lámina de rotación, no es la misma para todos los ojos, pues en la mayor parte es de un azul violado que recuerda el color de la flor del lino. Interesa, pues, producir con facilidad dicha tinta u otra más sensible al ojo del observador. Existe para esto, delante del prisma  $c$  primero una lámina de cuarzo  $o$ , tallada perpendicularmente al eje, y luego un anteojo de Galileo (489), formado por una lente bi-convexa  $g$  y por otra bi-cóncava  $f$ , que pueden acercarse o alejarse entre sí, según la distancia de la vista distinta de cada observador. Finalmente, termina el aparato por un prisma de Nicol  $a$ , sujeto en un tubo  $t$ , que se hace girar a voluntad sobre sí mismo. Actuando el prisma bi-refringente  $c$  como polarizador con relación al cuarzo  $o$ , y como analizador el prisma  $a$ , resulta que, al girar este último hacia la derecha o hacia la izquierda, varía de tinta la luz que atravesó el prisma  $c$  y la lámina  $o$  (545), viéndose al fin la que el experimentador ha adoptado como fija.

548. Análisis de la orina de los diabéticos. -En la enfermedad conocida con el nombre de *diabetes sacarina*, se hallan cargados los orines de una gran cantidad de azúcar fermentescible, que se llama azúcar de diabetes. Este azúcar, en su estado natural en la orina, desvía el plano de polarización hacia la derecha. Para calcular la cantidad de azúcar contenido en la orina de los diabéticos, se principia, si no están bastante claros, por clarificarlos con el subacetato de plomo; filtranse; se llena luego de orina, así clarificada, el tubo  $m$ , y luego se hace dar vuelta al botón  $b$  hasta que se tenga en la lámina de doble rotación la misma tinta que antes de la interposición de la orina. Habiendo demostrado la experiencia que 100 partes de la escala del sacarímetro representan la cantidad que ha de correrse el cuarzo compensador cuando entran en la orina 225gr.,6 de azúcar por litro, es claro que cada división de la escala representa muy sensiblemente 2gr.,256 de azúcar. De consiguiente, para obtener la cantidad de azúcar disuelta en una orina dada, hay que multiplicar 2gr.,256 por el número que indica el vernier en el momento en que se recobra la tinta primitiva.

▽△

## Colores producidos por la interferencia de los rayos polarizados

549. Leyes de la interferencia de los rayos polarizados. -Después del descubrimiento de la polarización, buscaron Arago y Fresnel si los rayos polarizados presentaban entre sí los mismos fenómenos de interferencia que los rayos no polarizados, y así es como llegaron a descubrir las siguientes leyes sobre la interferencia de la luz polarizada, y al mismo tiempo los brillantes fenómenos de coloración que se describen a continuación (550 a 555).

1.<sup>a</sup> ley. -Dos rayos polarizados en el mismo plano interfieren entre sí absolutamente como dos rayos naturales.

2.<sup>a</sup> ley. -Dos rayos polarizados en dos planos perpendiculares no interfieren en el caso en que interferirían dos rayos naturales.

3.<sup>a</sup> ley. -Dos rayos, polarizados desde luego en planos perpendiculares, pueden ser conducidos en el mismo plano de polarización, sin adquirir por esto la propiedad de interferir entre sí.

4.<sup>a</sup> ley. -Dos rayos polarizados en planos perpendiculares, y conducidos en seguida al mismo plano de polarización, interfieren como luz ordinaria, si han sido primitivamente polarizados en un mismo plano.

5.<sup>a</sup> ley. -En los fenómenos de interferencia por rayos que han experimentado la doble refracción, el jugar de las franjas coloreadas no está determinado únicamente por la diferencia de las direcciones o velocidades, porque en ciertas circunstancias ha de tenerse en cuenta una semi-oscilación en exceso.

Estas leyes son de una gran importancia, por ser las que dan la explicación de las diversas circunstancias en que los rayos polarizados dan o no lugar a los fenómenos de coloración que van a describirse.

550. Tintas producidas por la luz polarizada cuando atraviesa láminas delgadas bi-refringentes. -Al estudiar las propiedades de la luz polarizada (538) se ha visto que un haz de luz polarizada por su reflexión sobre un primer espejo, no se refleja sobre otro, si los dos planos de reflexión son perpendiculares entre sí; o además, que la luz polarizada no puede atravesar una lámina de turmalina cuyo eje es paralelo al plano de polarización, y finalmente, que la luz, polarizada por su paso al través de un prisma bi-refringente, no produce más que una sola imagen cuando el plano de la sección principal de este prisma es perpendicular o paralelo al plano de polarización. Pero en estas experiencias, basta que la luz, después de polarizada, atraviese una lámina delgada de mica, de sulfato de cal, de cristal de roca, de cal carbonatada, o de cualquiera otra sustancia bi-refringente, para que se cambien completamente los fenómenos.

Para observar los fenómenos que entonces se producen, el aparato más cómodo es el de Noremburg ([fig. 378](#) y [379](#)). En *g* ([fig. 379](#)) hay un prisma bi-refringente, una turmalina, o un prisma de Nicol. La lámina delgada cristalizada está puesta sobre la pantalla *e*, o en *p*, sobre el espejo; pero debe observarse que, en este último caso, la luz polarizada por el cristal no azogado *n* atraviesa dos veces la lámina cristalizada colocada en *p*, y que, por consiguiente, se obtiene el mismo efecto que si la lámina tuviese doble espesor y no fuese atravesada más que una sola vez por la luz polarizada.

Pero, siendo un prisma bi-refringente el analizador colocado en *p*, se ha visto ya (542) que, en tanto que alguna lámina cristalizada no esté aún dispuesta sobre el aparato, el haz polarizado sobre el cristal *n* y enviado hacia el prisma, lo atraviesa, experimentando una doble refracción; de donde resulta que el ojo colocado encima vea dos imágenes de la abertura *e* practicada en el centro del diafragma *a*. Estas dos imágenes son blancas y de intensidades desiguales, y haciendo girar el prisma sobre su montante, cada una de ellas se debilita sucesivamente, y se extingue siempre que la sección principal del prisma quede perpendicular o paralela al plano de polarización del haz.

Supuesto esto, cuando se interpone debajo del prisma una lámina bi-refringente, tallada paralelamente a su eje, se observan los fenómenos siguientes:

1.º La sección principal de la lámina, siendo paralela o perpendicular al plano de polarización del haz luminoso, el ojo percibe siempre dos imágenes blancas, que experimentan, cuando se hace girar el prisma bi-refringente, las mismas variaciones de intensidad que si no existiese la lámina.

2.º Cuando la sección principal de la lámina no es paralela, ni perpendicular al plano de polarización, las dos imágenes son coloreadas, y sus colores son complementarios, porque cuando ellas se superponen por sus bordes, la parte común es blanca.

3.º Permaneciendo fija la lámina, si se hace girar al prisma, las tintas de las imágenes no cambian, pero su intensidad varía, el máximo de brillo tiene lugar cuando la sección principal del prisma forma con la de la lámina un ángulo de 45 o de 135 grados; es decir en la posición intermedia a las que corresponden en los casos en que las dos imágenes son blancas: además, las imágenes cambian sucesivamente entre sí sus colores, pasando por el blanco, lo cual acontece cuando las secciones principales de los prismas de la lámina son paralelas o perpendiculares entre sí.

Empleando por analizador una turmalina o un prisma de Nicol, en lugar de un prisma bi-refringente, se observan todavía los mismos fenómenos de coloración, pero no se obtiene más que una imagen.

551. Influencia del espesor de las láminas. -Para láminas de igual naturaleza, las tintas cambian con el espesor, y disminuyen de intensidad a medida que las láminas son más gruesas. Hay asimismo un límite de espesor, pasado el cual ya no se obtiene coloración. Para la mica, este límite es de 88 centésimas de milímetro; para el sulfato de cal y el cristal de roca, de 45 centésimas, y para el espató de Islandia, de 25 milésimas. Esto es lo que hace muy difícil de obtener la coloración con esta sustancia, a causa de la dificultad de tallarla en láminas bastante delgadas. Por el contrario, en la mica y sulfato de cal, que se exfolian con facilidad en láminas sumamente delgadas, a experiencia se efectúa perfectamente.

Se obtienen de una misma lámina tintas diferentes, inclinándola más o menos con relación al haz polarizado que la atraviesa, lo cual es lo mismo que si variase su espesor.

Para una misma sustancia, con láminas cuyo espesor vaya creciendo, las tintas varían según las mismas leyes que las tintas de los anillos coloreados de Newton, correspondiendo a capas de aire más y más espesas (536); tan sólo el espesor de la lámina cristalizada debe de ser mayor con mucho que el de la capa de aire. En efecto, para una tinta del mismo orden el espesor de la mica ha de ser 440 veces el de la capa de aire; para el cristal de roca y sulfato de cal, 230 veces, y para el espato de Islandia, 13 veces solamente.

552. Teoría de la coloración producida por la luz polarizada. -Fundándose siempre en la teoría de las ondulaciones, Fresnel ha dado una explicación sencilla y completa de las tintas producidas por la luz polarizada cuando atraviesa láminas bi-refringentes, haciendo ver que estas tintas reconocen por causa la desigual velocidad de los rayos ordinario y extraordinario, después que han atravesado la lámina bi-refringente, desigualdad de donde provienen, entre los dos sistemas de ondulaciones, retrasos o adelantos que los colocan en las condiciones convenientes para interferir, y por lo tanto, para desarrollar colores (534).

Para darse cuenta de la formación de los colores por la interferencia de los rayos polarizados que han atravesado una lámina bi-refringente, consideremos lo que sucede en el experimento del aparato de Noremburg, descrito ya (550), y supongamos que la lámina cristalizada, siendo de un solo eje, haga éste un ángulo de 45 grados con el plano de polarización del haz incidente. Al atravesar la lámina bi-refringente, este haz se divide en dos haces, ordinario y extraordinario, de igual intensidad, y polarizados cada uno en planos que forman con el de polarización primitivo ángulos de  $+45^\circ$  y  $-45^\circ$ ; de donde resulta que estos dos haces están polarizados en dos planos que constituyen entre sí ángulo recto, y que, por consiguiente, no puede haber allí interferencia, según la segunda ley de Arago y Fresnel (549). Sentado esto, sean O y E los dos haces ordinario y extraordinario que, saliendo de la lámina delgada, vienen a caer sobre el prisma bi-refringente, de que nosotros supondremos la sección principal en el plano de polarización primitivo, cada uno de los haces O y E, atravesando al prisma, se divide respectivamente en otros dos, que designaremos por  $O_o$  y  $O_e$  para el primero, y por  $E_o$  y  $E_e$  para el segundo, teniendo estos cuatro haces, en último resultado, la misma intensidad. Pero los haces  $E_e$  y  $O_e$  son paralelos, como que tienen el mismo índice de refracción, y no difieren entre sí más que por un cierto intervalo  $d$ ; los haces  $E_o$  y  $O_o$  son también paralelos, pero difieren por un intervalo  $d \pm \frac{1}{2}$  ondulaciones, según el principio de que, pasando del rayo ordinario al rayo extraordinario, es menester tener en cuenta una semi-ondulación en más o en menos (549, 5.ª ley). Pero como los rayos de cada par son referidos a un mismo plano de polarización, a saber, los rayos ordinarios  $O_o$  y  $E_o$  en el plano de la sección principal del prisma, y los rayos  $O_e$  y  $E_e$  en un plano perpendicular al primero; ya no hay obstáculo a la interferencia de los rayos de un mismo par, y se ven aparecer los colores complementarios en los haces que corresponden a los intervalos  $d$  y  $d +$  un número impar de semi-ondulaciones.

Si se concibe ahora que la lámina cristalizada sea atravesada por un segundo haz, polarizado en un plano perpendicular al de polarización de antes, este nuevo haz experimentará las mismas divisiones y subdivisiones que el precedente, pero los intervalos de retraso serán distintos. En efecto, el plano de polarización del nuevo haz, refiriéndose ahora al de la refracción ordinaria, mientras que el del primer haz se refería al plano de refracción extraordinaria, resulta una diferencia de una semi-ondulación en la posición relativa de los dos sistemas de ondas O y E en su emergencia; es decir, que el intervalo que era  $d$  en el caso anterior, será ahora  $d$  menos un número impar de semi-ondulaciones; y después de la trasmisión al través del prisma, los intervalos de retraso de los dos haces serán respectivamente  $d - n/2$  y  $d$ , en lugar de  $d$  y  $d + n/2$  que eran antes,  $n$  siendo un número impar.

Esto explica cómo los dos haces varían de colores cuando se hace girar el plano de polarización de 90 grados.

Falta investigar ahora por qué no se producen colores en la experiencia anterior, cuando la lámina cristalizada, en vez de atravesarla la luz polarizada, lo hace la natural. Ya se ha visto (540) que la luz natural puede siempre considerarse como formada de dos haces iguales polarizados según un ángulo recto; de donde resulta, recordando lo que se ha dicho anteriormente, que cuando atraviesa la lámina cristalizada la luz natural, cada haz emergente O y E da lugar a dos colores complementarios que se superponen, y que, siendo e igual intensidad, producen luz blanca.

553. Anillos coloreados producidos por la luz polarizada al atravesar las láminas bi-refringentes. -En la experiencia practicada con el aparato de Noremborg, y descrita anteriormente (550), siendo atravesada la lámina cristalizada perpendicularmente a sus caras por un haz de luz paralelo, todas las partes de la lámina obran de la misma manera, y por todas partes se obtiene la misma tinta. Pero los efectos ya no son los mismos cuando los rayos incidentes atraviesan la lámina según oblicuidades diferentes, porque esto determina espesores desiguales; de donde resultan anillos completamente semejantes a los de Newton (536).

*Las pinzas de turmalina* constituyen el mejor aparato para observar estos nuevos fenómenos. Se denomina así un pequeño instrumento que se compone de dos turmalinas talladas paralelamente a su eje, y engastada cada una en un disco de latón. Estos dos discos, agujereados por su centro y ennegrecidos, están también montados en dos anillos de alambre de latón plateado, el cual se arrolla sobre sí mismo, como lo manifiesta la [fig. 388](#), de manera que formen muelle y hagan que se aplique una turmalina contra la otra. Girando éstas con los discos, se las dispone según convenga, de manera que sus ejes sean paralelos o perpendiculares entre sí.

Supuesto esto, el cristal sobre el que se quiere experimentar, estando fijo en el centro de un disco de corcho ([fig. 387](#)), se coloca éste entre las dos turmalinas, después se aplican las pinzas delante del ojo, a fin de recibir la luz difusa del cielo. La turmalina opuesta al ojo obra entonces como polarizador, y la otra como analizador (542). Si el cristal que se observa así, siendo de un solo eje y tallado perpendicularmente al eje, está iluminado por una luz simple, como el rojo, por ejemplo, se observa la producción de una serie de anillos circulares alternativamente rojos y oscuros. Con otro color simple, se obtienen anillos análogos, pero su diámetro aumenta con la refrangibilidad del color. Por el contrario, el diámetro de los anillos disminuye cuando el espesor de las láminas aumenta, y pasado cierto espesor, ya no se producen más. Si en lugar de iluminar las láminas con luz homogénea, se las ilumina con luz blanca, como los anillos de tintas diferentes que se producen entonces no tienen el mismo diámetro, se superponen en parte, produciendo anillos irisados muy brillantes.

La posición del cristal no ejerce influencia alguna sobre los anillos, pero no sucede lo mismo con la posición relativa de las dos turmalinas. Experimentando, por ejemplo, sobre el espató de Islandia, tallado perpendicularmente, a su eje y de 1 a 30 milímetros de espesor, cuando los ejes de las turmalinas son perpendiculares entre sí, se observa una hermosa serie de anillos vivamente coloreados y atravesados por una cruz negra, como lo muestra la [figura 389](#); si los ejes de las turmalinas son paralelos, los anillos se coloran de tintas complementarias de aquéllas que tenían antes y entonces los atraviesa una cruz blanca ([fig. 390](#)).

Para darse cuenta de la formación de los anillos por la luz polarizado al atravesar las láminas bi-refringentes, es menester observar que, en el caso que consideramos, estas láminas lo están por un haz cónico convergente en cuyo vértice es el ojo del observador. De donde resulta que el espesor de la lámina no de en atravesar los rayos aumenta con su divergencia, pero que para rayos de la misma oblicuidad este espesor es el mismo, y de aquí resultan las diferencias de velocidad del rayo ordinario y del rayo extraordinario que explican la formación de los colores y su disposición circular alrededor del eje del haz y del cristal. En cuanto a la cruz negra, ella es debida a que la luz polarizada es absorbida en el plano de la sección principal de la turmalina y en el plano perpendicular.

Obsérvanse fenómenos análogos con todos los cristales de un eje, como la turmalina, esmeralda, corindón, berilo, mica, fosfato de plomo, prusiato de potasa, cristal de roca. Sin embargo, con este último la cruz desaparece por un efecto de polarización rotatoria (545).

554. Anillos en los cristales de dos ejes. -En los cristales de dos ejes se producen también anillos coloreados, pero de una forma más complicada. En vez de ser circulares y concéntricas las fajas coloreadas, presentan entonces la forma de curvas de dos centros, correspondiendo el centro de cada una a uno de los ejes del cristal. Las [figuras 392](#), [393](#) y [394](#) representan las curvas que, con las pinzas de turmalina, produce el nitrato de potasa tallado perpendicularmente a su eje. Cuando los ejes de las dos turmalinas son rectangulares, se tiene la [fig. 392](#); girando después lentamente el cristal, sin cambiar las turmalinas, se pasa por la [fig. 393](#) para llegar a la [fig. 394](#), cuando se ha girado 45 grados. Si los ejes de las turmalinas son paralelos, se obtienen las mismas curvas coloreadas; pero sus tintas son suplementarias, y la cruz negra se cambia en cruz blanca. Si el ángulo de los dos ejes del cristal vale más

de 20 a 25 grados, no se pueden ver simultáneamente los dos sistemas de curvas: tal es lo que sucede con el aragonito, por ejemplo, que produce la [fig. 391](#).

Herschell, que ha medido con cuidado los anillos producidos por los cristales de dos ejes, los refiere a la curva conocida en geometría con el nombre de *lemniscata*.

555. Coloraciones producidas por el vidrio templado o comprimido. -El vidrio ordinario no está dotado de la doble refracción, pero adquiere esta propiedad si, por una causa cualquiera, su elasticidad se modifica en una dirección más que en otra. Basta para esto el comprimirlo en un sentido fuertemente, encorvarle o templarle, es decir, enfriarlo rápidamente después de haberlo calculado. Si entonces atraviesa al vidrio un haz de luz polarizada, se obtienen efectos de coloración completamente análogos a los observados anteriormente en los cristales bi-refringentes, pero mucho más variados, los según la forma circular, cuadrada, rectangular o triangular que se da a las láminas de vidrio, y según el grado de tensión de sus partículas.

Siendo el polarizador un espejo de vidrio negro sobre el cual se recibe la luz de las nubes, y el analizador un prisma de Nicol, al través del cual se mira a las láminas de vidrio atravesadas por la luz polarizada, las [figuras 395](#), [396](#) y [397](#) representan los dibujos que se observan haciendo girar sucesivamente, en su propio plano, una lámina cuadrada de vidrio templado. Las [figuras 398](#) y [399](#) representan los dibujos que producen en el mismo caso las láminas circulares, y la [figura 400](#) el dibujo producido por dos láminas cuadradas superpuestas, dibujo que varía asimismo cuando se hace girar el sistema de láminas.

Los vidrios comprimidos o encorvados presentan efectos del mismo género, y que varían en iguales condiciones.

556. Polarización del calórico. -El calórico, del mismo modo que la luz, puede polarizarse por reflexión y por refracción (538); pero las investigaciones sobre este particular presentan grandes dificultades. Las primeras se efectuaron en 1810 por Bérard, y también por Malus; habiendo muerto éste, Bérard las continuó por sí solo.

En los experimentos de este sabio, los rayos caloríficos reflejados sobre un primer espejo se recibían sobre un segundo, como en el aparato de Noremborg ([fig. 378](#)), y de allí caían sobre un pequeño reflector metálico que los concentraba sobre la esfera de un termómetro diferencial. Bérard observó así un minimum de intensidad cuando el plano de reflexión sobre el segundo espejo era perpendicular al plano de reflexión sobre el primero. Siendo este fenómeno el mismo que el que presenta la luz en igual experimento (543), dedujo Bérard que el calórico se polarizaba al reflejarse sobre el primer espejo.

Melloni ha aplicado su termo-multiplicador al estudio de la polarización del calórico, y haciendo pasar los rayos caloríficos al través de dos turmalinas paralelas, o al través de dos pilas de mica, ha demostrado que aquéllos se polarizan por refracción. Ha encontrado, además, que el ángulo de polarización (539) es sensiblemente el mismo para el calórico que para luz.

▽△

## Libro octavo

Del magnetismo

▽△

## Capítulo primero

## Propiedades de los imanes

557. Imanes naturales e imanes artificiales. -Denomínanse *imanes* unos cuerpos que tienen la propiedad de atraer al hierro y a algunos otros metales, como son el níquel, el cobalto y el cromo. Sin embargo, muy pronto citaremos experimentos que prueban que los imanes obran realmente sobre todos los cuerpos, ya por atracción ya por repulsión, aunque de un modo muy remiso (565).

Divídense los imanes en *naturales* y *artificiales*. El *imán natural*, o *piedra de imán*, es un óxido de hierro, conocido en química con el nombre de óxido magnético, siendo su fórmula  $Fe^3O^4 = FeO + Fe^2O^3$ , es decir, que se compone de un equivalente de protóxido y de otro de sesquióxido. Abunda mucho en la naturaleza el óxido magnético encontrándose en los terrenos antiguos, y sobre todo en Suecia y en Noruega, donde se explota como mineral de hierro del cual da la mejor calidad que se conoce. Sin embargo, la mayor parte de los ejemplares de óxido de hierro magnético no atraen al hierro; de modo que esta propiedad sólo la poseen accidentalmente.

Los *imanes artificiales* son barritas o agujas de acero templadas (76), que no poseen naturalmente las propiedades de los imanes naturales, sino que las han adquirido por fricciones con un imán, o por procedimientos eléctricos que más adelante describiremos. Constrúyense también imanes artificiales con hierro *dulce*, es decir, purgado sensiblemente de toda materia extraña; pero su imantación no es duradera como la de las barras de acero.

Los imanes artificiales son más poderosos que los naturales y gozan de propiedades completamente idénticas.

El poder atractivo de los imanes se ejerce a todas las distancias, y al través de todos los cuerpos; decrece muy pronto cuando aumenta la distancia, y varía con la temperatura. Coulomb hizo ver que la intensidad magnética de una barra disminuye a medida que aumenta su temperatura, y recobra su primitivo valor cuando vuelve a la temperatura primitiva, con tal que no haya pasado de cierto límite, pues al rojo pierden por completo los imanes su poder atractivo.

La atracción que ejerce el imán sobre el hierro es recíproca, lo cual es, por otra parte, un principio general de todas las atracciones. Compruébase esto presentando una masa de hierro a un imán, el cual es atraído.

La fuerza atractiva de los imanes ha recibido el nombre de *fuerza magnética*<sup>(6)</sup>, y su teoría física se designa por su vez con el de *magnetismo*, expresión que no debe confundirse con la de *magnetismo animal*, que se ha adoptado para indicar la influencia que ejercería una persona sobre otra por el imperio de su voluntad; influencia que no se halla ni con mucho demostrada.

558. Polos y línea neutra. -Los imanes no poseen en todos sus puntos la misma fuerza magnética. En efecto, si se introduce una barra imantada en limaduras de hierro, se ve que se adhieren éstas abundantemente hacia las extremidades de la barra, en forma de penachos erizados ([fig. 401](#)); pero decrece con rapidez la adherencia desde las

extremidades a la región media, en donde es nula. La parte de la superficie del imán en que es insensible la fuerza magnética ha recibido el nombre de *línea neutra*, y los dos puntos próximos a las extremidades en que se manifiesta el máximo de atracción, se denominan *polos*. Todo imán, natural o artificial, presenta dos polos y una línea neutra; si bien en la imantación de las barras y de las agujas se producen a veces alternativas de polos contrarios situados entre los polos extremos. Estos polos intermedios se denominan *puntos consecuentes*. Éstos se encuentran, unas veces en número par, y otras en número impar. Siempre supondremos que no tienen más que dos polos los imanes, porque éste es el caso ordinario.

Desígnanse los polos, el uno con el nombre de *polo austral*, y el otro con el de *polo boreal*, que son expresiones tomadas de la acción que ejercen los polos terrestres sobre los de los imanes (566). En nuestros dibujos representaremos siempre el polo austral por las letras *a* o *A*, y el boreal por las *b* o *B*, y llamaremos polos del *mismo nombre* los designados por letras iguales.

559. Acciones mutuas de los polos. -Parecen idénticos los dos polos de un imán al presentarlos a las limaduras de hierro, pero no es más que aparente dicha identidad. En efecto, suspéndase una aguja imantada *ab* (fig. 402) de un hilo fino, y aproxímese al polo austral *a* el austral *A* de otra aguja, y se notará una viva repulsión; mientras que, por el contrario, si se acerca el *A* al boreal de la aguja móvil, se origina una gran atracción. Tenemos, pues, que no son idénticos los polos *a* y *b*, supuesto que el uno es repelido, y el otro atraído por el mismo polo *A* del imán que se tiene asido con la mano. Compruébase también que difieren entre sí los dos polos de este último, presentándolos sucesivamente al mismo polo *a* de la aguja móvil. Con el uno hay repulsión, y atracción con el otra podemos sentar, por lo tanto, esta sencilla ley acerca de las acciones recíprocas que se ejercen entre dos imanes:

*Los polos del mismo nombre se repelen, y los polos de nombre contrario se atraen.*

Demuéstranse también, por medio del experimento que sigue, las acciones contrarias de los polos boreal y austral: se suspende de un imán un objeto de hierro, por ejemplo, una llave; luego sobre el primer imán se hace correr otro sensiblemente de la misma fuerza, procurando poner enfrente los polos contrarios (fig. 403). Continúa sostenida la llave mientras están lejanos los dos polos, pero luego que se hallan bastante aproximados, cae como si la barra que la sostenía hubiese perdido de repente su propiedad magnética; pero nada de esto sucede, pues puede sostenerla de nuevo desde el momento en que se separa la segunda barra.

560. Hipótesis de los dos fluidos magnéticos. -Para explicar los fenómenos que acabamos de exponer, han admitido los físicos la hipótesis de dos *fluidos magnéticos*, que obran cada uno por repulsión sobre sí mismo, y por atracción sobre el otro. Estos dos fluidos han recibido los nombres, el uno de *fluido austral*, y el otro de *fluido boreal*, que son las denominaciones de los dos polos en los cuales preponderan sus acciones.

Admítase que antes de la imantación se hallan combinados estos fluidos alrededor de cada molécula, neutralizándose recíprocamente, pero que pueden separarse por la influencia de una fuerza mayor que su atracción mutua, y moverse alrededor de las moléculas sin salir de la esfera de actividad que les está asignada alrededor de cada una de ellas. Se encuentran *orientados* entonces los fluidos, es decir, que en la esfera

magnética que envuelve a cada molécula, tiene constantemente el fluido boreal una misma dirección, y el austral la opuesta, proviniendo de aquí dos resultantes de dirección contraria, cuyos puntos de aplicación son los dos polos del imán. Pero luego que cesa la orientación de los fluidos, se establece de nuevo el equilibrio alrededor de cada molécula, y es nula la resultante final, esto es, que no hay ya ni atracción ni repulsión.

La hipótesis de los dos fluidos magnéticos se presta de un modo muy sencillo a la explicación de los fenómenos, y por esto se adopta generalmente como método de demostración. Con todo, más adelante se verá que los fenómenos magnéticos resultan, al parecer, no de las acciones opuestas de dos fluidos especiales, sino de corrientes particulares de la materia eléctrica en los cuerpos imantados. Esta hipótesis ofrece la ventaja de referir la teoría del magnetismo a la de la electricidad.

561. Diferencias entre las sustancias magnéticas y los imanes. -Son *sustancias magnéticas* las que atrae el imán, como el hierro, el acero y el níquel. Contienen éstas los dos fluidos, pero en estado de neutralización. Los compuestos ferruginosos son generalmente magnéticos, y tanto más, cuanto más hierro contienen. Algunos, sin embargo, como el persulfuro de hierro, no son atraídos por el imán.

Fácil es distinguir una sustancia magnética de un imán. La primera carece de polos, pues presentada sucesivamente a las dos extremidades de una aguja móvil *ab* ([fig. 402](#)), los atrae a ambos, mientras que el imán atraería al uno y repelería al otro presentándole por el mismo polo.

562. Imantación por influencia. -Cuando una sustancia magnética se pone en contacto con una barra imantada, se separan los dos fluidos de esta sustancia, convirtiéndose, mientras dura el contacto, en un imán completo, con sus dos polos y su línea neutra. Por ejemplo, si se suspende de uno de los polos de un imán ([fig. 404](#)) un cilindro *ab* de hierro dulce, puede sostener éste a su vez otro semejante, éste un tercero, y así sucesivamente hasta 7 u 8, según la fuerza de la barra. Cada uno de estos cilindros es, pues, un imán, pero sólo mientras dura la influencia de la barra imantada, porque si se interrumpe el contacto de ésta con el primer cilindro, inmediatamente, o a lo sumo a poco rato, se desprenden los demás cilindros, sin conservar huella alguna de magnetismo. Por lo tanto, sólo ha sido momentánea la separación de los dos fluidos, quedando así demostrado que nada cedió el imán al hierro. Imántase también el níquel perfectamente bajo la influencia de un poderoso imán.

La imantación por influencia explica la formación de los penachos de limaduras que se adhieren a los polos de los imanes ([fig. 401](#)). Las partículas en contacto con el imán obran por influencia sobre las inmediatas; éstas sobre las siguientes, y así sucesivamente, dando origen a la disposición filamentosa de las limaduras.

563. Fuerza coercitiva. -Denomínase *fuerza coercitiva* la fuerza más o menos intensa que, en una sustancia magnética, se opone a la separación de los fluidos, o a su recomposición cuando están separados. Según el experimento anterior, es inapreciable esta fuerza en el hierro dulce, porque este metal se imanta instantáneamente por la influencia de un imán. En el acero templado, por el contrario, es muy grande dicha fuerza, la cual crece con la mayor energía del temple. En efecto, una barra de acero se imanta muy lentamente si se la pone en contacto con un imán, como que es necesario

friccionarla con uno de los polos de éste, si se desea que adquiriera toda su fuerza. La separación de los dos fluidos ofrece, pues, aquí una resistencia que no se observa en el hierro dulce; sucediendo lo propio con su recomposición, porque una barra de acero bien imantada, con dificultad pierde sus propiedades magnéticas. Pronto veremos que, por la oxidación, la presión o la torsión, puede adquirir también el hierro dulce cierta fuerza coercitiva, aunque poco duradera.

564. Experimento de los imanes rotos. -Demuéstrase por medio del siguiente experimento, la presencia de los dos fluidos en todas las partes de un imán: se toma una aguja de hacer calceta, de acero, y se la imanta por medio de fricciones con uno de los polos de un imán; y después de comprobada la existencia de los dos polos y de la línea neutra con limaduras de hierro, se divide la aguja por su parte media, esto es, en la dirección de su línea neutra. Presentando sucesivamente las dos mitades a los polos de una aguja móvil ([fig. 402](#)), se nota que, en vez de no ofrecer más que un fluido, tienen cada una dos polos contrarios y una línea neutra. Partiendo de igual manera estos nuevos imanes en dos mitades, se observa de nuevo que cada una de ellas es un imán completo con sus dos polos y su línea neutra, y así sucesivamente puede continuarse la división tan lejos como se quiera; y de todo esto se deduce, por analogía, que contienen ambos fluidos las porciones más pequeñas de un imán.

565. Acciones de los imanes sobre todos los cuerpos; cuerpos diamagnéticos. -Coulomb fue el primero en observar, en 1802, que los imanes actúan sobre todos los cuerpos con mayor o menor energía, según lo comprobó haciendo oscilar barritas de diferentes sustancias entre los polos opuestos de dos barras imantadas enérgicamente, luego fuera de la influencia de todo imán, y comparando en seguida el número de oscilaciones efectuadas, en ambos casos, en tiempos iguales. Atribuyéronse primero estos fenómenos a la presencia de materias ferruginosas en los cuerpos sometidos al experimento; pero M. Lebaillif, y luego los señores Becquerel, padre e hijo, demostraron que los imanes ejercen realmente una acción sobre todos los cuerpos. Comprobóse, además, que esta acción es unas veces atractiva y otras repulsiva; y por lo tanto, los cuerpos atraídos se llaman *magnéticos*, y los repelidos *diamagnéticos*. Entre estos últimos se hallan el bismuto, el plomo, el azufre, la cera, el agua, etc. El cobre es unas veces magnético y otras diamagnético, lo cual depende probablemente de su grado de pureza.

Observó M. Faraday, en 1847, que los imanes poderosos ejercen sobre las llamas una acción repulsiva, que atribuía a una diferencia de diamagnetismo entre los gases. Después reconoció M. Ed. Becquerel, quien ha efectuado importantes investigaciones sobre esta materia, que, de todos los gases, es el oxígeno el de mayor poder magnético, y que un metro cúbico de este gas condensado obraría sobre una aguja imantada como 5<sup>gr</sup>,5 de hierro.

Algunos físicos han considerado el diamagnetismo como una propiedad distinta del magnetismo; pero M. Ed. Becquerel enlaza estas dos clases de fenómenos por medio de una ingeniosa hipótesis: admite que no hay dos géneros de acciones entre los cuerpos y los imanes, sino tan sólo una imantación por influencia, y que la repulsión ejercida por ciertas sustancias depende de que se hallan éstas envueltas por un medio más magnético que ellas.

Cuando hablemos, en la teoría de la electricidad, de los fenómenos de inducción, daremos a conocer una acción recíproca entre los imanes y los metales en movimiento.

## Capítulo II

### Magnetismo terrestre, brújulas

566. Acción directriz de la tierra sobre los imanes. -Cuando se suspende de un hilo una aguja imantada ([fig. 402](#)), o cuando se la apoya sobre una punta alrededor de la cual pueda girar fácilmente ([fig. 405](#)), se observa que la aguja, en vez de pararse en una posición cualquiera, acaba siempre por fijarse en una dirección que es más o menos la de norte a sur. Lo propio sucede si en un vaso lleno de agua se coloca un disco pequeño de corcho con una barrita imantada encima, pues primero oscila, pero la línea recta que une los dos polos del imán, cuando éste se para, se halla también sensiblemente en la dirección de norte a sur. Pero obsérvese que en este experimento no avanzan el corcho y la barra, ni hacia el norte, ni hacia el sur. La acción de los polos terrestres sobre los imanes no es atractiva, sino *simplemente directriz*.

Habiéndose efectuado varias observaciones análogas en todos los puntos del globo, se ha comparado la tierra a un inmenso imán, cuyos polos estarían cerca de los terrestres, y cuya línea neutra coincidiría sensiblemente con el ecuador. En virtud de esta hipótesis, se ha llamado fluido boreal al que predomina en el polo boreal del globo, y fluido austral al del opuesto. Obrando bajo este supuesto la tierra sobre las agujas como un imán, se repelen los polos del mismo nombre, y se atraen los de nombre contrario. De consiguiente, cuando se fija una aguja imantada en la dirección del norte al sur, el polo que mira al norte contiene el fluido austral, y el que mira al sur el boreal. Por eso el polo que mira al norte se llama austral, y boreal el que mira al sur.

567. Par magnético terrestre. -Fácil es ver, por lo que precede, que la acción magnética de la tierra sobre una aguja imantada puede compararse a un *par*, es decir, a un sistema de dos fuerzas iguales, paralelas y de dirección contraria, aplicadas a las dos extremidades de la aguja. En efecto, obrando el polo boreal del globo por atracción sobre el austral de la aguja y por repulsión sobre el boreal, resulta de aquí que los polos de la aguja se hallan solicitados por dos fuerzas contrarias iguales y paralelas, porque el polo terrestre está bastante lejano, y la aguja es bastante pequeña para que puedan admitirse como rigurosamente paralelas las dos rectas que unen estos dos polos con el polo norte del globo; de consiguiente, este polo produce el efecto de un par. Obrando absolutamente del mismo modo el polo austral terrestre sobre los polos de la aguja, resulta un segundo par, que solicita por fin a la aguja a tomar una dirección determinada por el par resultante de los dos primeros.

568. Meridiano magnético; declinación. -Sabido es que el meridiano astronómico de un lugar es el plano que pasa por éste y por los dos polos de la tierra, y que la *meridiana* es la línea que representa el contacto de este plano con la superficie del globo. Asimismo, se denomina *meridiano magnético* de un lugar el plano que pasa por éste y por los dos polos de una aguja imantada móvil, en equilibrio sobre un eje vertical.

No coincidiendo, en general, el meridiano magnético con el astronómico, se llama *declinación de la aguja imantada*, en un lugar, el ángulo que forma en éste el meridiano

magnético con el astronómico, o, lo que viene a ser lo mismo, el ángulo que forma la dirección de la aguja con la meridiana. Es *oriental* u *occidental* la declinación, según se halle el polo austral de la aguja al este o al oeste del meridiano astronómico.

569. Variación de la declinación. -La declinación de la aguja imantada, muy variable según los lugares, es occidental en Europa y en África; oriental en Asia y en las dos Américas. Además, en un mismo sitio ofrece numerosas variaciones: unas que podemos considerar como regulares, son seculares, anuales o diurnas, y otras, que son irregulares, se designan con el nombre de *perturbaciones*.

*Variaciones seculares.* -En un mismo lugar varía la declinación con el tiempo, y produce, al parecer, la aguja, al este y al oeste del meridiano astronómico, oscilaciones que duran muchos siglos. Desde 1580 se conoce en París la declinación. El siguiente cuadro indica las variaciones que ha experimentado.

Años.	Declinaciones.	Años.	Declinaciones.
1580.	11° 30' al este.	1825.	22° 22' al oeste.
1663.	0 -	1830	22 12
1700.	8 10 al oeste.	1835.	22 4
1780.	19 55 -	1850	20 30
1785.	22 00 -	1855	19 57
1814	22 34 -	1859 (12 de noviembre).	19 42

Esta tabla manifiesta que desde 1580 ha variado la declinación en París más de 34 grados, y que se observó el máximo de desviación occidental en 1814, retrocediendo desde entonces la aguja hacia el oriente.

*Variaciones anuales.* -Las variaciones anuales se han expuesto por Cassini, quien observó, en 1784, que del equinoccio de la primavera al solsticio del verano retrogradaba la aguja en París hacia el este, y que, por el contrario, avanzaba hacia el oeste en los nueve meses siguientes. En dicho año llegó el máximo de amplitud a 20 minutos.

Por lo demás, se conocen muy poco las variaciones anuales, y no son, al parecer, constantes.

*Variaciones diurnas.* -Además de las variaciones seculares y anuales, experimenta la declinación otras diurnas, que son muy débiles y que no pueden observarse, sino con agujas largas y por medio de instrumentos muy sensibles. En nuestros climas, marcha todos los días la extremidad norte de la aguja del este al oeste desde la salida del sol hasta la una de la tarde; pero regresa en seguida hacia el este por un movimiento retrógrado, recobrando con corta diferencia hacia las diez de la noche la posición que ocupaba por la mañana. De noche ofrece muy pocas variaciones la aguja, si bien adquiere de nuevo un ligerísimo movimiento hacia el oeste.

En París, la amplitud media de la variación diurna es en abril, mayo, junio, julio, agosto y setiembre, de 13 a 15 minutos, y en los meses restantes de 8 a 10. Días hay en que sube a 25 minutos, y otros en que no pasa de 5 minutos. No en todas partes se verifica a la misma hora el máximo de desviación. La amplitud de las variaciones diurnas decrece de los polos hacia el ecuador, donde es muy débil; y cerca de éste existe una línea sin variación diurna.

*Variaciones accidentales o perturbaciones.* -Modificase accidentalmente la declinación de la aguja imantada en sus variaciones diurnas por muchas causas, tales como las auroras boreales, las erupciones volcánicas y la caída del rayo. El efecto de las auroras boreales se deja sentir a grandes distancias, como que auroras visibles tan sólo en el norte de Europa, actúan sobre la aguja en París, en donde se observan

variaciones accidentales de 20 minutos. En las regiones polares suele oscilar muchos grados la aguja. Su marcha irregular, durante todo el día que precede a la aurora boreal, es presagio del fenómeno.

570. Brújula de declinación. -La *brújula de declinación* es un instrumento que sirve para medir la declinación magnética en un lugar, cuando se conoce su meridiano astronómico. Se compone de una caja AB ([fig. 406](#)) de cobre, con un círculo graduado M en el fondo. Existe en el centro un eje sobre el cual se apoya una aguja imantada *ab* en forma de rombo prolongado y muy ligera. Se aplican a la caja dos pies derechos que sostienen mi eje horizontal X, sobre el cual se fija un anteojo astronómico L, móvil en un plano vertical. Un pie P sostiene la caja AB, que puede girar libremente en el sentido horizontal, arrastrando al anteojo en su movimiento. Un círculo fijo QR, denominado *círculo azimutal*, sirve para medir el número de grados que ha corrido el anteojo, por medio de un vernier V fijo en la caja. Por fin, la inclinación del anteojo con relación al horizonte se mide por medio de un vernier K, que recibe su movimiento del eje del anteojo y gira sobre un arco de círculo fijo *x*.

Conocido el meridiano astronómico de un lugar, se principia, para determinar la declinación de éste por disponer la brújula bien horizontalmente, por medio de los tornillos SS y del nivel *n*, y luego se hace girar la caja AB hasta que el anteojo se encuentre en el plano del meridiano astronómico. Leyendo entonces, sobre el limbo graduado M, el ángulo que forma la aguja imantada con el diámetro N, que corresponde al cero de la graduación y se encuentra exactamente en el plano del anteojo, se tiene la declinación, que es occidental o austral, según se detenga el polo *a* de la aguja en el occidente o el oriente del diámetro N.

Caso de que no se conozca el meridiano astronómico del lugar, puede determinarse por medio de la misma brújula. Sirve, al efecto, un círculo azimutal QR y el arco de círculo *x*, y observando un astro conocido, antes y después de su paso por el meridiano, se emplea el *método de las alturas iguales*, que se describe en los tratados de cosmografía para determinar la meridiana.

571. Método de inversión. -Las aplicaciones que acabamos de indicar de la brújula de declinación, no son exactas, sino mientras el eje magnético de la misma, es decir, la recta que pasa por sus dos polos, coincide con el eje de figura, esto es, con la recta que une sus dos extremidades. Por lo general, no queda satisfecha esta condición; pero se corrige tal causa de error por el método de inversión. La aguja no se halla fija en la chapa, sino simplemente superpuesta, a fin de que se la pueda quitar e invertir, colocándola de nuevo sobre la chapa, en términos de que la cara inferior sea la superior, y recíprocamente. Tomando entonces la media entre la declinación presente de la aguja y la anterior, se obtiene la declinación exacta.

En efecto, si la recta *ce* representa el eje de figura de la aguja, y la *ab* su eje magnético ([fig. 407](#)), no es la verdadera declinación el arco *cN*, por ser demasiado grande, sino el *aN*. Invertiendo la aguja, no toma el eje magnético *ab* la posición *a'b'*, sino que recobra exactamente su primera dirección, mientras que la extremidad *c*, que pasa entonces entre los puntos *a* y N, señala un arco demasiado pequeño, precisamente según una cantidad igual al exceso del primer arco. La media entre los dos arcos observados da, pues, la verdadera declinación.

572. Brújula marina. -La acción directriz de la tierra sobre la aguja imantada ha recibido una importante aplicación en la *brújula marina*, conocida también con los nombres de *compás de variación* o *compás de mar*. Éste es una brújula de declinación que dirige la derrota de los buques. La [fig. 408](#) la representa encerrada en una caja rectangular, que se coloca a su vez en una caja mayor, que se denomina *bitácora*, fija sobre cubierta, en la popa del buque. La [fig. 409](#) da su sección trasversal. En estas dos figuras, las letras iguales indican los mismos objetos.

La aguja *ab* ([fig. 409](#)), muy móvil sobre un eje, se encuentra fija en la cara inferior de una lámina de talco *t*, sobre la cual se traza una estrella o *rosa* de 32 radios, que marcan los ocho rumbos del viento, los semi-rumbos y los cuartos. A fin de que pueda conservar constantemente la aguja su posición horizontal a pesar del balance y de las cabezadas y arfadas del buque, se halla en *suspensión a la Cardan*, es decir, que está sostenida por dos anillos concéntricos móviles, uno alrededor del eje *zx*, y el otro *cd* perpendicular al primero ([fig. 408](#)).

Una abertura M, cerrada por un cristal deslustrado, sirve para alumbrar de noche la brújula, pues una luz que existe fuera de la caja, enfrente del cristal, proyecta al interior sus rayos. El fondo *n* de la caja cilíndrica O, en que está la aguja, tiene un cristal trasparente que da paso a la luz que ha de alumbrar a la

hoja de talco *t*, que sostiene la rosa. Un segundo cristal *m* cubre la brújula, y un eje *i*, fijo en su centro, sirve para colocar una alidada A, que sólo se emplea cuando se quiere marcar la costa.

Para dirigir un buque con la brújula, se investiga primero sobre una carta marina el rumbo para llegar a su destino. Entonces, fija la vista sobre la brújula, hace girar el timonel la caña del timón, hasta que el rumbo en cuestión, marcado sobre la rosa, coincida con una *línea de fe* que pasa por dos puntos *c* y *d*, marcados en los bordes de la caja (fig. 408), y dirigida en el sentido de la quilla. Sin embargo, las variaciones de declinación en los diferentes puntos del globo, obligan a los navegantes a corregir de continuo las observaciones que hacen con la aguja.

No se conoce el inventor de la brújula, ni la época fija de su invención. Guyot de Provins, poeta francés del siglo XII, es el primero que habla del uso del imán para la navegación. Los antiguos marinos que desconocían la brújula, no tenían más guía que el sol o la estrella polar, y por eso navegaban siempre a la vista de las costas, para no equivocarse la derrota cuando el cielo se encontraba cubierto.

573. Inclinación; ecuador magnético. -En vista de la dirección hacia el norte que afecta la brújula de declinación, pudiera creerse que la fuerza que la solicita proviene de un punto del horizonte; pero no es así, porque si se dispone la aguja de modo que pueda moverse libremente en un plano vertical, alrededor de un eje horizontal, se observa que, aun cuando el centro de gravedad de la aguja coincida exactamente con el eje de suspensión, su polo austral, en nuestros climas, se inclina constantemente hacia el polo boreal de la tierra. En el otro hemisferio es el polo boreal de la aguja el que se inclina hacia el austral del globo.

Cuando el plano vertical en que se mueve la aguja coincide con el meridiano magnético, se denomina *inclinación* el ángulo que ella forma con el horizonte. En un plano distinto del meridiano magnético aumenta la inclinación, que llega a valer 90 grados en uno perpendicular a aquél, pues, descomponiéndose entonces la acción magnética de la tierra en dos fuerzas, una vertical y otra horizontal, hace tomar la primera a la aguja su posición vertical, mientras que la segunda, actuando en la dirección del eje de suspensión, no puede hacerla girar.

La inclinación, lo mismo que la declinación, varía con los lugares, pero siguiendo una ley más determinada. Obsérvense, en efecto, cerca del polo boreal de la tierra, varios puntos en los cuales vale 90 grados la inclinación; y luego, a partir de allí, decrece con la latitud hasta el ecuador, en donde es nula, ya en este mismo círculo, ya en puntos poco distantes del mismo. Reaparece la declinación en el hemisferio austral, pero en sentido contrario, esto es, que el polo boreal de la aguja es el que desciende debajo del horizonte.

Denomínase *ecuador magnético* la curva que pasa por todos los puntos en donde es nula la inclinación, y *polos magnéticos*, los puntos en los cuales vale aquella 90 grados. Según las observaciones de M. Duperrey, el ecuador magnético corta, al parecer, al terrestre en dos puntos, casi diametralmente opuestos, el uno en el grande Océano, y el otro en el Atlántico. Parece que se hallen animados estos puntos de un movimiento de traslación de oriente hacia occidente. En cuanto a los polos magnéticos, hay, por lo visto, dos, situados uno, en el norte de la América septentrional, y el otro en el sur de la Nueva Holanda, el primero a los 70° 10' de latitud y 100° 40' de longitud, y el segundo a los 75 grados de latitud y 136 grados de longitud.

También varía la inclinación en un mismo lugar, según las épocas. En 1671 varía en París 75 grados; después ha ido siempre decreciendo, y el 20 de noviembre de 1859 era de 66° 14'. Según las observaciones hechas en el Observatorio de París, es sensiblemente de 3' la disminución anual de la declinación.

Al hablar de la electricidad indicaremos la causa probable del magnetismo terrestre.

574. Brújula de inclinación. -Denomínase *brújula de inclinación* un instrumento que sirve para medir la inclinación magnética. Esta brújula, montada en cobre, se compone primero de un círculo horizontal *m*, graduado y sostenido por tres tornillos que suben y bajan (fig. 410). Encima de este círculo existe una plancha A, móvil alrededor de un eje vertical, y que sostiene, por medio de dos columnas, un segundo

círculo graduado M, que mide la inclinación: un bastidor  $r$  sostiene la aguja  $ab$ , y un nivel  $n$  con tres tornillos da la horizontalidad del diámetro que pasa por los dos ceros del círculo M.

Para observar la inclinación, se principia por determinar el meridiano magnético, lo cual se consigue dando vuelta a la plancha A sobre el círculo  $m$  hasta que quede vertical la aguja, que es la posición que acepta cuando se halla en un plano perpendicular a meridiano magnético (573). Haciendo girar en seguida la plancha A 90 grados sobre el círculo  $m$ , se conduce el círculo vertical M al meridiano magnético. El ángulo  $dca$ , que forma entonces la aguja imantada con el diámetro horizontal, es el ángulo de inclinación.

Sin embargo, deben considerarse dos causas de error, a saber 1.<sup>a</sup> el eje magnético de la aguja puede no coincidir con su eje de figura, lo cual se corrige por la inversión, como en la brújula de declinación (571); y el centro de gravedad de la aguja puede no coincidir con el eje de suspensión, y entonces el ángulo  $dca$  es demasiado pequeño o demasiado grande, según esté el centro de gravedad encima o debajo del de suspensión; porque, en el primer caso, la acción de la gravedad es contraria a la del magnetismo terrestre para hacer inclinar la aguja, mientras que en el segundo tiene el mismo sentido. Corrígese este error invirtiendo los polos de la aguja, lo cual se consigue haciendo fricciones con los polos contrarios de dos barras, de modo que cada polo del imán está frotado por otro de su mismo nombre. Mudando entonces de sentido la dirección de la aguja, si su centro de gravedad estaba encima del punto de suspensión, está actualmente debajo, y el ángulo de inclinación, que era demasiado pequeño, se vuelve demasiado grande. Se tendrá, pues, su verdadero valor tomando la media entre los resultados obtenidos en las operaciones que acabamos de indicar.

575. Aguja y sistema astáticos. -Denomínase *aguja astática* la que se halla libre de la acción magnética de la tierra. Tal sería una aguja móvil alrededor de un eje situado en el plano del meridiano magnético, paralelamente a la inclinación; porque el par magnético terrestre obra entonces en el sentido del eje, y no puede, por lo mismo, comunicar a la aguja ninguna dirección determinada.

Un *sistema astático* es la reunión de dos agujas de igual fuerza, unidas paralelamente y enfrente uno de otro los polos contrarios (fig. 411). Si tienen rigurosamente la misma fuerza ambas agujas, se destruyen las acciones contrarias del globo sobre los polos  $a'$  y  $b$ , como también sobre los  $a$  y  $b'$ , y el sistema es completamente astático. Pronto se verá en el galvanómetro una importante aplicación del sistema magnético astático.

▽△

## Capítulo III

▽△

### Imantación y ley de las acciones magnéticas

576. Manantiales de imantación; saturación. -Los diversos manantiales de imantación son la influencia de poderosos imanes, el magnetismo terrestre y la electricidad más adelante daremos a conocer esta última causa de imantación. Tres métodos existen para imantar con los imanes, que son: por simple contacto, por contacto separado y por doble contacto.

Sea cual fuere de estos tres métodos el que se use para imantar una barra de acero, reconoce un límite la potencia magnética que adquiere ésta, límite que depende de: grado de su temple y de la potencia de los imanes que sirven para la imantación. Cuando se alcanza este límite, se dice que la barra está imantada a *saturación*. Si se ha traspasado dicho punto de saturación, vuelve a él muy pronto la barra, y aun tiende a descender, si no se mantiene su fuerza magnética por medio de armaduras como veremos en breve (581).

577. Método por simple contacto. -El método por simple contacto consiste en hacer deslizar el polo de un fuerte imán desde uno a otro extremo de la barra que se va a imantar, y en repetir muchas veces las fricciones, siempre en el mismo sentido. Descompuesto así sucesivamente el fluido neutro en toda la

longitud de la barra, la última extremidad que toca el imán móvil presenta un polo contrario a aquél con el cual se frota. Este procedimiento ofrece una imantación muy débil, de suerte que sólo es aplicable a pequeñas barritas, y además adolece con frecuencia del defecto de producir puntos consecuentes (558).

578. Método por contacto separado. -El método por contacto separado que adoptó Knight en Inglaterra, en 1745, consiste en colocar los dos polos contrarios de dos barras de igual fuerza en medio de la barra que se ha de imantar, y en hacerlas correr cada una simultáneamente hacia uno de los extremos de la barra, teniéndolas verticalmente. Trasládase luego cada imán hacia la parte media de la barra, y se principia otra vez del mismo modo. Después de repetir semejantes fricciones sobre las dos caras, queda imantada la barra.

Duhamel ha perfeccionado este método colocando los dos extremos de la barra que se va a imantar sobre los polos contrarios de dos imanes fijos, cuya acción concurre con la de los móviles que operan las fricciones, siendo la posición relativa de los polos la que indica la [figura 412](#).

Este procedimiento es el que procura la imantación más regular.

579. Método por doble contacto. -En el método por doble contacto, debido a Mitchell, se colocan también los dos imanes frotantes en medio de la barra que se ha de imantar, con sus polos contrarios enfrente; pero, en vez de resbalar en sentido contrario hacia sus extremidades, se hallan mantenidos a una distancia fija por medio de una piececita de madera colocada entre ellos ([fig. 412](#)), corriendo juntos desde la parte media a una extremidad, desde ésta a la otra y así sucesivamente, de modo que reciba cada mitad de la barra igual número de fricciones.

En 1758 perfeccionó Epinus este método, disponiendo, como en el del contacto separado, dos fuertes barras imantadas debajo de la que se va a imantar, y dando a las móviles una inclinación de 15 a 20 grados ([fig. 412](#)). Así se imantan grandes barras, pero se obtienen con frecuencia puntos consecuentes.

Obsérvese que en los diversos procedimientos de imantación por los imanes, no pierden éstos nada de su fuerza, lo cual demuestra que los fluidos magnéticos no pasan de una a otra barra.

580. Imantación por la acción de la tierra. -La acción de la tierra sobre las sustancias magnéticas es comparable a la de los imanes, y por lo mismo, tiende constantemente el magnetismo terrestre a separar los dos fluidos que se hallan en estado neutro en el hierro dulce y en el acero. Pero en este último cuerpo es muy grande la fuerza coercitiva (563), y no basta la acción de la tierra para producir la imantación. No sucede otro tanto con una barra de hierro dulce, sobre todo si se la coloca en el meridiano magnético paralelamente a la inclinación, pues se separan entonces los dos fluidos, dirigiéndose el austral hacia el norte y el boreal al sur. Con todo, la imantación es inestable, porque invirtiendo la barra se invierten al instante los polos, demostrándose así que es inapreciable la fuerza coercitiva del hierro dulce.

Sin embargo, se consigue darle una fuerza coercitiva muy sensible si, mientras se halla bajo la influencia de la tierra y en la dirección antes indicada, se la somete a una fuerte torsión, o si se la martillea en frío sobre un yunque. La fuerza coercitiva que surge así, es débil y se pierde muy pronto por completo, lo cual no sucede en el acero.

Por la influencia prolongada del magnetismo terrestre se explica la formación de los imanes naturales, así como la imantación que con frecuencia se observa en los objetos antiguos de acero o de hierro; porque los hierros ordinarios del comercio, que no son puros, poseen una fuerza coercitiva muy débil, y casi siempre ofrecen vestigios de imantación, conforme se nota en los clavos, en las badilas, en las pinzas, etc. El hierro fundido tiene, en general, gran fuerza coercitiva, y se imanta muy bien.

581. Haces magnéticas; armaduras de los imanes. -Un haz magnético es un conjunto de barras imantadas reunidas paralelamente por sus polos del mismo nombre. Se les da unas veces la forma de herradura ([fig. 413](#)), y otras son rectilíneas ([fig. 414](#)). El haz que presenta la [figura 413](#) se compone de cinco láminas de acero yuxtapuestas, y el de la [414](#) de doce dispuestas en tres capas de cuatro láminas cada una. Es preferible la forma de herradura para sostener pesos, porque funcionan a la vez los dos polos. En las dos especies de haces están templadas las láminas imantadas por separado, y luego superpuestas y reunidas por tornillos o por casquillos.

La fuerza de un haz no es igual a la suma de las fuerzas de los haces de cada barra, a causa de las acciones repulsivas de los polos próximos; y se aumenta su fuerza haciendo uno o dos centímetros más cortas las láminas laterales que la del centro ([fig. 413](#) y [414](#)).

Llámanse *armaduras*, en los imanes, unas piezas de hierro dulce que se ponen en contacto con los polos, para conservar o también para aumentar su poder magnético, como resultado de una acción por influencia.

La [figura 415](#) representa, con sus armaduras, una piedra imán natural; observándose en las caras que corresponden a los polos dos planchas de hierro dulce, cada una de las cuales termina según un talón macizo. Por la influencia del imán natural se imantan estas láminas, y si A y B son los polos de aquél, *a* y *b* serán los de las armaduras. Una vez imantadas éstas, reaccionan sobre el fluido neutro del imán natural, lo descomponen y aumentan así su poder magnético. Sin armadura, son muy débiles los imanes naturales, pero armados, pueden ir sosteniendo progresivamente pesos cada vez mayores, aunque se llega al fin a un límite del cual no se puede pasar.

El *porta-pesos a b'*, de hierro dulce, hace a su vez el oficio de una segunda armadura, porque imantándose por influencia, reaccionan sus polos *a'* y *b'* sobre los *a* y *b* de la primera.

Para armar los imanes artificiales se disponen por pares ([fig. 416](#)), colocando enfrente los polos contrarios, luego se cierra el circuito con dos barritas de hierro dulce A, B, e imantándose éstas por influencia, reaccionan sus polos sobre las barras imantadas para conservarles su fuerza magnética. En cuanto a las agujas movibles, como se dirigen hacia los polos magnéticos del globo, hace veces de armadura la influencia de éste.

582. Ley de las atracciones y de las repulsiones magnéticas. -Coulomb fue el primero en comprobar la ley de que *las atracciones y las repulsiones magnéticas se ejercen en razón inversa del cuadrado de la distancia*, demostrándola por dos métodos, el de la balanza de torsión y el de las oscilaciones.

1.º *Método de la balanza de torsión*. -La balanza de torsión consiste en una caja de vidrio ([fig. 417](#)) cubierta con un cristal que se quita cuando se quiere, y que tiene cerca de los bordes una abertura por la cual entra un imán *ab*. En el centro de la misma tapa existe otra abertura, a la cual va adaptado un tubo de vidrio, que puede girar a frotamiento suave por los bordes del orificio, y en cuya parte superior se encuentra un *micrómetro*. Así se denomina un sistema de dos piezas, una de las cuales D, que es fija, está dividida en su contorno en 360 grados, y la otra E, móvil, lleva un índice fijo que indica cuántos grados ha girado sobre el cuadrante D. A la izquierda del dibujo, en *e* y en *d*, se han representado en mayor escala las dos piezas del micrómetro. En el disco *e* se ven dos pies atravesados por un eje horizontal, en el cual se arrolla un alambre de plata muy fino que sostiene una aguja imantada AB. Finalmente, en el fondo de la caja hay un cuadrante dividido, o bien una tira de papel pegada a la caja, en la cual se encuentran trazadas a la derecha y a la izquierda del cero *o*, divisiones que sirven para medir los movimientos de la aguja AB, y de consiguiente, la torsión del alambre de plata.

Estando el índice *a* del disco *e* en el cero del cuadrante, se principia orientando la caja de manera que el centro del hilo que sustenta la aguja AB y el cero del cuadrante inferior, o el de la tira de papel se hallan en el meridiano magnético; retirando entonces la aguja AB de su chapa, se la reemplaza por otra semejante de cobre o de cualquiera otro metal magnético; y luego se hace girar el tubo de vidrio y con él las piezas E y D, de manera que dicha aguja vaya a pararse en el cero de la graduación. Como no se halla aún en su sitio la aguja imantada, se quita la no magnética de la chapa, y se repone la imantada AB, la cual, situándose entonces exactamente en el meridiano magnético, prueba que ha sido nula la torsión del alambre de plato.

Dispuesto así el aparato, es necesario, antes de introducir el imán *ab* conocer la acción de la tierra sobre la aguja móvil AB, cuando se halla desviada del meridiano magnético cierto número de grados. Se hace girar al efecto la pieza E hasta que la aguja AB se mueva un grado en el mismo sentido. El número de grados, menos uno, que ha corrido el micrómetro, representa evidentemente la torsión total del alambre. En los experimentos de Coulomb era 35, pero varía este número con la longitud del alambre, con su diámetro y con la intensidad de la barra AB. Permaneciendo actualmente en equilibrio la aguja, claro está que la fuerza de torsión del alambre es precisamente igual y contraria a la acción directriz de la tierra. Esta acción, en los experimentos de Coulomb, estaba representada por 35, para una desviación de 1

grado; pero siendo proporcional la fuerza de torsión al ángulo torsión ( $70, 2^\circ$ ), y siéndole igual la acción directriz de la tierra cuando hay equilibrio, resulta que esta última fuerza, para desviaciones de 2, 3 grados... está representada por 2 veces, 3 veces... 35 grados.

Determinada la acción de la tierra, se baja el imán  $ab$ , cuidando de colocar enfrente, los polos del mismo nombre. Es repelido el polo A de la aguja móvil, si se representa por  $d$  el número de grados que mide el ángulo de desviación, cuando se halla en equilibrio la aguja AB, tiende ésta a dirigirse hacia el meridiano magnético con una fuerza representada por la suma  $d+35\times d$ , dependiendo la parte  $d$  de la torsión del alambre, y la  $35d$  de la acción de la tierra; pero como no llega al meridiano, es preciso que la fuerza repulsiva que se ejerce entre los polos  $a$  y A sea a su vez igual a  $d+35\times d$ . Se hace girar el disco E de manera que el ángulo de desviación  $d$  llegue a ser dos veces menor. Según la posición de la aguja AB, en la figura anterior, habría que dar vuelta de derecha a izquierda. Representando por  $n$  la separación del disco E, se ve que el alambre de suspensión se halla torcido, en su extremidad superior,  $n$  grados a la derecha, y en la inferior  $d/2$  grados a la izquierda; su torsión es, pues,  $n+d/2$ . Por consiguiente, la fuerza real que tiende llevar a la aguja hacia el meridiano magnético, es  $(n+d/2)+35\times d/2$ , representando la parte  $n+d/2$  la fuerza de torsión, y la  $35\times d/2$  la acción de la tierra. No volviendo la aguja hacia el meridiano, es menester que la fuerza repulsiva que se ejerce entre los dos polos  $a$  y A esté a su vez representada por

$$(n+d/2)+35\times d/2.$$

Efectuando los cálculos, es decir, reemplazando  $n$  y  $d$  por los números que da el experimento, se encuentra que la cantidad

$$(n+d/2)+35\times d/2.$$

es precisamente el cuádruplo de la  $d+35\times d$ , que se obtuvo en el primer experimento; de modo que queda demostrada la ley de Coulomb, porque se experimenta con arcos  $d$  y  $d/2$  bastante pequeños para que se confundan sensiblemente con sus cuerdas, es decir, que cuando el arco se hace dos veces menor, le sucede sensiblemente otro tanto a la distancia  $aA$  de los polos.

2.º *Método de las oscilaciones.* -Consiste este método en hacer oscilar una aguja imantada durante tiempos iguales, primero bajo la sola influencia de la tierra, y luego bajo la misma influencia combinada con la del polo atractivo de un imán colocado sucesivamente a dos distancias desiguales. De los tres números de oscilaciones observadas, se deduce en seguida por cálculo la ley de Coulomb.

583. Medida del magnetismo terrestre. -Muchos físicos y navegantes han tratado de medir la intensidad magnética del globo en diversos lugares y en épocas distintas. Se han adoptado varios métodos que se reducen todos a hacer oscilar una aguja de inclinación o de declinación durante un tiempo dado, y en deducir de los números de oscilaciones las intensidades relativas. De dichas observaciones se han formulado las leyes siguientes:

- 1.ª La intensidad del magnetismo terrestre crece a medida que nos alejamos del ecuador magnético, y parece vez y media mayor en los polos que en esta línea. La línea sin inclinación es, pues, al propio tiempo la de menor intensidad.
- 2.ª La intensidad magnética del globo decrece a medida que ascendemos en la atmósfera, probablemente en razón inversa del cuadrado de las distancias.
- 3.ª La intensidad magnética de la tierra varía con las horas del día, siendo su mínimo entre 10 y 11 de la mañana, y su máximo entre 4 y 5 de la tarde.
- 4.ª La intensidad magnética presenta variaciones irregulares, y, como la inclinación y la declinación, sufre perturbaciones accidentales por la influencia de las auroras boreales.

Se denominan *líneas isodinámicas* las que, sobre la superficie del globo, presentan en todos sus puntos la misma intensidad magnética; *líneas isógonas*, las que ofrecen donde quiera la misma declinación; y *líneas isóclinas*, las de igual inclinación. M. Duperrey construyó nueve curvas isodinámicas al norte, y otras

tantas al sur del ecuador magnético, y encontró que estas líneas, por su curvatura y su dirección, tienen gran analogía con las *isotermas*, o sea de igual temperatura.

▽△

## Libro noveno

Electricidad estática

▽△

## Capítulo primero

▽△

### Principios fundamentales

584. Electricidad, hipótesis sobre su naturaleza. -La *electricidad*<sup>(7)</sup> es un agente físico de gran energía, cuya presencia se manifiesta por medio de atracciones y repulsiones, por apariencias luminosas, por violentas conmociones, por descomposiciones químicas y por otros fenómenos muy numerosos. Las causas que desarrollan la electricidad son el frotamiento, la presión, las acciones químicas, el calor, el magnetismo y la misma electricidad.

Seiscientos años antes de la era cristiana había observado el filósofo Tales la propiedad que posee el ámbar amarillo frotado de atraer los cuerpos ligeros. Dice Plinio al hablar de esta sustancia: «Cuando el frotamiento le ha dado calor y vida, atrae las pajitas, de igual manera que el imán atrae al hierro». Pero a esto se limitaron los conocimientos de los antiguos sobre la electricidad; hasta que a fines del siglo XVI volvió a llamar Gilbert, médico de la reina Isabel en Londres, la atención de los físicos sobre las propiedades del ámbar amarillo, demostrando que otras muchas sustancias pueden adquirir también la propiedad atractiva por el frotamiento. Dado ya el impulso, se sucedieron descubrimientos tan numerosos como rápidos. Los físicos que más han contribuido después de Gilbert a los progresos de la electricidad, son Otto de Guericke, Dufay, Aepinus, Franklin, Coulomb, Volta, Davy, Oersted, Ampere, Schweigger, Seebeck, y los señores de la Rive, Faraday y Becquerel, a quienes somos deudores casi por completo de la electro-química.

A pesar de las numerosas investigaciones de que ha sido objeto la electricidad, no se conoce el origen ni la naturaleza de este agente; y lo mismo que para el calórico, la luz y el magnetismo, los físicos se concretan tan sólo a meras hipótesis. Creía Newton que la producción de la electricidad era el resultado de un principio etéreo, puesto en movimiento por las vibraciones de las partículas de los cuerpos. El abate Nollet, fundándose en los efectos luminosos y caloríficos de la electricidad, la consideraba como una modificación particular del calórico y de la luz, y Symmer, en su teoría que en breve expondremos (590), admite dos fluidos eléctricos, siendo así que Franklin, en la suya sólo considera uno.

585. Electricidad estática y electricidad dinámica. -Aparte todas las hipótesis, se divide el estudio de la electricidad en dos grandes secciones, que comprenden respectivamente los fenómenos de la *electricidad estática* o en reposo, y los de la *dinámica* o en movimiento. En el estado estático, el frotamiento es principalmente la causa de la electricidad; se acumula entonces en la superficie de los cuerpos, y se mantiene en ella en equilibrio en un estado de *tensión* que se manifiesta por medio de atracciones y de chispas. En el estado dinámico resulta principalmente la electricidad de acciones químicas, y atraviesa los cuerpos en la forma de *corriente* con una velocidad comparable a la de la luz. La electricidad dinámica se distingue particularmente de la estática, por fenómenos químicos y por sus relaciones con el magnetismo.

Trataremos primero de la electricidad estática, considerando especialmente la que desarrolla el frotamiento, y diremos que un cuerpo está *electrizado*, cuando posee la propiedad de atraer los cuerpos ligeros, o de producir efectos luminosos.

586. Desarrollo de la electricidad por frotamiento. -Muchas sustancias, frotadas con un pedazo de paño o con una piel de gato, adquieren inmediatamente la propiedad de atraer los cuerpos ligeros, como las barbas de pluma, las pajitas, etc. Nótase, particularmente, esta propiedad en el ámbar amarillo, en el lacre, en la resina, en la guta-percha, en el azufre, en el vidrio, en la seda y en otros muchos cuerpos.

Reconócese que está electrizado un cuerpo por medio de pequeños aparatos denominados *electrómetros*, siendo el más sencillo de ellos el *péndulo eléctrico* (fig. 418), que consiste en una esferita de médula de saúco, suspendida, por una hebra de seda, de un pie de vidrio. Al aproximarle un cuerpo electrizado, es atraída primero la esferita, y repelida inmediatamente después del contacto.

También puede electrizarse un cuerpo sólido por el rozamiento con un líquido o con un gas, pues en el vacío barométrico el movimiento del mercurio electriza al vidrio, y en un tubo sin aire, pero con algunos globulillos de azogue, se vuelve luminoso en la oscuridad cuando se le agita. Wilson había observado que una corriente de aire dirigida sobre la turmalina, el vidrio o la resina, electrizaba positivamente estas sustancias; pero M. Faraday reconoció después que no se produce el efecto eléctrico sino en el caso de que esté húmedo el aire, o de que tenga en suspensión polvos secos.

A primera vista no desarrolla electricidad el frotamiento sobre muchas sustancias, y en particular sobre los metales; porque, si teniendo en la mano una barra metálica, se la frota con un pedazo de tela, no se nota el más mínimo vestigio de atracción cuando se la presenta al péndulo eléctrico. No por eso debe deducirse que el frotamiento no electrice a los metales, pues es una propiedad general de los cuerpos, pero que sólo se manifiesta (588) cuando se hallan en condiciones adecuadas.

Ignórase la causa del desarrollo de la electricidad por frotamiento

atribuyola Wollaston a una oxidación; pero anteriormente había demostrado Gray que se desarrolla en el vacío, y Gay-Lussac la obtuvo también en el ácido carbónico seco.

587. Cuerpos conductores y cuerpos no conductores. -Cuando se presenta al péndulo eléctrico una barra de lacre frotada por un extremo, se nota que sólo atrae por la extremidad frotada, pues la otra no da muestra alguna de atracción ni de repulsión. Lo propio sucede con un tubo de vidrio o con una barra de azufre, mientras no hayan sido frotadas en toda su longitud. Dedúcese de aquí que en estos cuerpos no se propaga la propiedad eléctrica de un punto a otro, lo cual se expresa diciendo que *no conducen* la electricidad. Al contrario, la experiencia demuestra que, apenas un cuerpo metálico ha adquirido sobre uno de sus puntos la propiedad eléctrica, se propaga instantáneamente por toda la superficie del cuerpo, sea cual fuere su extensión, es decir, que los metales *conducen* bien la electricidad.

De aquí la distinción de cuerpos *buenos conductores* y *malos conductores*. Los mejores entre los primero son los metales, la antracita, la plumbagina, el coke, el carbón de leña bien calcinado, las piritas y la galena, siguiendo luego las disoluciones salinas, cuyo poder conductor es muchos miles de veces menor que el de los metales, el agua en los estados de vapor y líquido, el cuerpo humano, los vegetales y todos los cuerpos húmedos. Los cuerpos malos conductores son: el azufre, la resina, la goma laca, la guta-percha, la seda, el vidrio, las piedras preciosas, el carbón no calcinado, los aceites y los gases secos; pero el aire y los gases son tanto menos aisladores (588), cuanto más húmedos están. Por lo demás, el grado de conductibilidad de los cuerpos no depende tan sólo de la sustancia que los forma, sino también de su temperatura y estado físico. Por ejemplo, el vidrio, que es muy mal conductor a la temperatura ordinaria, es buen conductor al rojo; de igual manera la goma laca y el azufre pierden en parte la propiedad de aislar cuando calientan; y el agua, que conduce muy bien en el estado líquido, es mal conductor en el de hielo. El vidrio pulverizado y la flor de azufre conducen bastante bien.

588. Cuerpos aisladores; depósito común. -Los cuerpos malos conductores han recibido el nombre de *cuerpos aisladores*, porque se emplean para pies o puntos de apoyo, cuando se desea que se conserve la electricidad en un cuerpo conductor. Es indispensable esta condición, porque, como se compone la tierra de sustancias que conducen la electricidad, apenas comunica con ella un cuerpo conductor electrizado,

por el intermedio de otro que sea también conductor, se escapa inmediatamente la electricidad al suelo, el cual se llama por esto *depósito común*. Se aísla un cuerpo sosteniéndolo sobre pies de vidrio, suspendiéndolo de cordones de seda, o colocándolo sobre panes de resina. Con todo, jamás aíslan por completo los malos conductores; de donde resulta que todo cuerpo electrizado pierde siempre con más o menos lentitud su electricidad al través de los sostenes, y además sufre una pérdida por efecto del vapor acuoso del aire, y esta última es de ordinario la causa más eficaz.

Por efecto de su gran conductibilidad, no pueden electrizarse por frotación los metales, como no se aíslan y se froten con un cuerpo mal conductor, como la seda o el tafetán engomado. Pero, si se satisfacen estas condiciones, se electrizan perfectamente por frotamiento los metales. Para demostrarlo, se fija en una barra de latón un mango de vidrio ([fig. 419](#)), se la frota con una tela de seda o de tafetán engomado, y aproximándola en seguida al péndulo eléctrico se nota una atracción que demuestra que está electrizado el metal. Teniendo éste en la mano, se desarrolla también electricidad; pero se pierde inmediatamente en el suelo.

Antiguamente se daba a los cuerpos aisladores el nombre de cuerpos *idio-eléctricos* propios para la electricidad), porque se creía que eran los únicos a propósito para ser electrizados por frotamiento; y a los buenos conductores, la denominación de cuerpos *aneléctricos* (privados de electricidad). Ahora que se sabe que todos los cuerpos se electrizan por frotamiento, se han abandonado estas denominaciones.

589. Distinción de dos especies de electricidad. -Se ha visto (586) que, cuando se presenta al péndulo eléctrico un tubo de vidrio frotado con un pedazo de paño, hay primero atracción, y repulsión luego después del contacto. Produciéndose los mismos efectos con una barra de lacre frotada de igual manera, parece que la electricidad desarrollada en el vidrio ha de ser idéntica a la de la resina; pero la observación revela lo contrario. En efecto, electrizadas, conforme hemos dicho, las barras de vidrio y de resina, si mientras es repelido el péndulo eléctrico por el vidrio se acerca la resina, se atrae vivamente la esfera de saúco; aconteciendo también, que si al péndulo rechazado por la resina después del contacto se presenta el tubo de vidrio, surge igualmente una fuerte atracción; es decir, que *un cuerpo repelido por la electricidad del vidrio es atraído por la de la resina*, y recíprocamente, que *un cuerpo rechazado por ésta es atraído por aquélla*.

Fundándose el físico francés Dufay en los hechos que acabamos de exponer, admitió, en 1734, la existencia de dos electricidades de distinta naturaleza: la una se desarrolla en el vidrio cuando se le frota con lana, y la otra, en la resina o en el lacre, al frotar estas sustancias con paño, o con piel de gato. La primera se denomina *electricidad vítrea*, y la segunda *electricidad resinosa*.

590. Teorías de Symmer y de Franklin. -Para explicar los efectos contrarios de la electricidad, según sea vítrea o resinosa, propuso el físico inglés Symmer la admisión de dos *fluidos eléctricos*, obrando cada uno por repulsión sobre sí mismo y por atracción sobre el otro. Según dicho físico, existen estos fluidos en todos los cuerpos en el estado de combinación, formando lo que se denomina el *fluido neutro* o el *fluido neutral*. Diferentes causas, y sobre todo el frotamiento y las acciones químicas, pueden separarlos, apareciendo entonces los fenómenos eléctricos; pero tienen suma tendencia a reunirse uno a otro para constituir de nuevo el fluido neutro.

Desígnanse los dos fluidos eléctricos con las calificaciones de *vítreo* y de *resinoso*, o con las de *positivo* y de *negativo*, aceptadas estas últimas de la teoría de Franklin. Este físico sólo consideraba un fluido que obraba por repulsión sobre sus propias moléculas, y por atracción relativamente las de la materia, y admitía a la par que todos los cuerpos contienen, en el estado latente, una cantidad determinada de este fluido: cuando aumenta, están electrizados *positivamente* los cuerpos y poseen las propiedades de la electricidad vítrea; y cuando disminuye, lo están *negativamente*, y ofrecen las propiedades de la electricidad resinosa. Las denominaciones de *electricidad positiva* o de *fluido positivo* equivalen a la de *electricidad vítrea*; y las de *electricidad negativa* o de *fluido negativo*, a la de *electricidad resinosa*. Representase la electricidad positiva por medio del signo + (*más*), y la negativa por el - (*menos*), fundándose en que así como en el álgebra sumando  $+a$  con  $-a$  se tiene cero, del mismo modo, dando a un cuerpo que posea ya cierta cantidad de electricidad positiva una cantidad igual de electricidad negativa, se obtiene el estado neutro.

Ya teoría de Symmer sobre los dos fluidos eléctricos se presta con gran sencillez a la explicación de los fenómenos; así es la que generalmente se admite, cuando menos en Francia; pero no debe ponerse en

olvido que es una mera hipótesis; y téngase también presente cuán vaga es la denominación de *fluido* aplicada a las causas del calórico, de la luz, del magnetismo y de la electricidad. En efecto, ¿qué es un fluido? ¿Cuál es su naturaleza? Ningún físico contesta categóricamente a estas preguntas. Debemos limitarnos, pues, a considerar la hipótesis de los dos fluidos eléctricos, como la expresión de dos estados en los cuales la electricidad se presenta bajo el aspecto de dos fuerzas iguales y contrarias que tienden a equilibrarse. «Es muy probable, dice M. de La-Rive en su *Tratado de electricidad*, que en vez de consistir en uno o en dos fluidos especiales, no sea más que el resultado de una modificación particular en el estado de los cuerpos, modificación que probablemente depende de la acción mutua que ejercen entre sí las partículas ponderables de la materia y el fluido sutil que las rodea por todas partes, que se designa con el nombre de *éter*, y cuyas ondulaciones constituyen la luz y el calor». Más adelante añade el mismo físico: «Todos los fenómenos de las electricidades positiva y negativa pueden explicarse probablemente por la acción y reacción de una fuerza capaz de manifestarse, según distintos grados, en las diferentes sustancias, de un modo más sencillo que por la hipótesis de los fluidos imponderables. Las dos fuerzas opuestas de la electricidad se asemejan de hecho a la acción y a la reacción, puesto que se encuentran constantemente aunadas».

591. Acciones que originan entre sí los cuerpos electrizados. -Admitida la hipótesis de las dos especies de electricidad, se reasumen los efectos de atracción y de repulsión que ofrecen los cuerpos electrizados (589) en el enunciado del principio siguiente que sirve de base a la teoría de todos los fenómenos de la electricidad estática.

*Dos cuerpos cargados de la misma electricidad se repelen; en cambio se atraen si la electricidad es contraria; pero estas atracciones y repulsiones no se efectúan sino en virtud de la acción de las dos electricidades entre sí, y no por su acción sobre la materia.*

592. Ley de la electrización por frotamiento. -Cuando se frotan entre sí dos cuerpos de cualquiera naturaleza, se descompone el fluido neutro de cada uno de ellos, y siempre toma *el uno el fluido positivo y el otro el negativo*.

Para demostrarlo, se comunica al péndulo eléctrico una electricidad conocida, y se le presentan por separado los dos cuerpos frotados, que deben aislarse en el caso de que sean buenos conductores: el uno atrae la esfera de médula de saúco, y el otro la repele, lo cual demuestra que están cargados de electricidad contraria. Lo están, además, en cantidad igual, porque, presentándolos al péndulo mientras se hallan en contacto, no hay atracción, ni repulsión, puesto que se equilibran las dos electricidades. Se hacen de ordinario estos experimentos con dos discos de vidrios frotados entre sí y que se separan bruscamente.

La electricidad que desarrolla el frotamiento en un cuerpo, varía con la naturaleza de éste, pues el vidrio en su estado natural y el vidrio deslustrado, frotados con lana, le electrizan, el primero positivamente y el segundo negativamente. También depende de la naturaleza del cuerpo frotante, puesto que las sustancias que ponemos a continuación se electrizan positivamente cuando están frotadas por las que les siguen, y negativamente cuando lo son por las que las preceden, a saber: la piel de gato, el vidrio en su estado natural, la lana, la pluma, la madera, el papel, la seda, la goma laca y el vidrio deslustrado.

La índole de la electricidad por frotación depende también del grado de pulimento, del sentido de las fricciones y de la temperatura. En efecto, si se frotan entre sí dos discos de vidrio desigualmente pulimentados, el que lo está más, adquiere la electricidad positiva y el otro la negativa. Frotando en cruz dos cintas de seda blanca, cortadas de la misma pieza, la que se frota transversalmente se electriza positivamente, y la otra al contrario. Frotando entre sí dos cuerpos de la misma sustancia, de igual pulimento, pero de diferente temperatura, el que posee la más elevada, adquiere el fluido negativo. En general, los cuerpos cuyas partículas pueden moverse con mayor facilidad, se electrizan negativamente.

593. Diferentes orígenes de la electricidad. -Además del frotamiento, las causas que pueden originar la electricidad, son la presión, la exfoliación, las acciones químicas y el calórico. Aepinus fue el primero en comprobar el desarrollo de la electricidad por presión; y luego demostró Libes que, oprimiendo ligeramente sobre un disco de madera cubierto de tafetán engomado un disco de metal aislado por medio de un mango de vidrio, este disco se electriza negativamente. Posteriormente demostró Haüy que el espato de Islandia adquiere la electricidad positiva oprimiéndolo un momento entre los dedos, y que conserva el estado eléctrico durante muchos días. Reconoció la misma propiedad en muchas especies

minerales; pero M. Becquerel descubrió que pertenece a todos los cuerpos, sin exceptuar a los conductores, con tal que estén aislados. El corcho y el cautchouc, oprimidos el uno contra el otro, toman, el primero la electricidad positiva y el segundo la negativa. Un disco de corcho, oprimido sobre una naranja, se lleva consigo una considerable cantidad de fluido positivo, cuando se interrumpe rápidamente el contacto; pero si se efectúa con lentitud la separación, es muy débil la cantidad de fluido que absorbe, porque, separados por la presión los dos fluidos, han tenido tiempo de recomponerse en parte, en el momento en que cesa. Debido a esta causa es nulo el efecto cuando son buenas conductoras las dos sustancias oprimidas.

También ha observado M. Becquerel que la *exfoliación*, esto es, la división natural de los minerales cristalizados, puede ser un manantial de electricidad. Exfoliando rápidamente la mica en la oscuridad, se nota un débil resplandor fosfórico. Para cerciorarse M. Becquerel de que la electricidad era la causa de este fenómeno, fijó un mango de vidrio a cada lámina antes de su separación; desprendiolas en seguida rápidamente, y presentándolas al péndulo eléctrico o a un electrómetro de panes de oro (605), encontró que poseen una electricidad contraria.

El talco hojoso y todas las sustancias cristalizadas, poco conductoras, se electrizan también por exfoliación. En general, siempre que se separan dos moléculas, acepta una de ellas electricidad distinta de la de la otra, como no sea buen conductor el cuerpo a que pertenezcan, porque entonces no es bastante rápida la separación para oponerse a la recomposición de las dos electricidades. A este fenómeno debemos referir la luz que despiende el azúcar citando se parte en la oscuridad.

La electricidad que originan las acciones químicas y el calórico, serán más adelante objeto de nuestro estudio.

▽△

## Capítulo II

▽△

### Medida de las fuerzas eléctricas

594. Leyes de las atracciones y repulsiones eléctricas. -Las acciones mutuas que ejercen los cuerpos electrizados entre sí se hallan sometidas a las dos leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Las repulsiones y atracciones entre dos cuerpos electrizados están en razón inversa del cuadrado de la distancia;*

2.<sup>a</sup> *Permaneciendo constante la distancia, estas mismas fuerzas están en razón compuesta de las cantidades de electricidad que poseen los dos cuerpos.*

*Primera ley.* -Estas dos leyes las ha demostrado Coulomb, valiéndose de la balanza de torsión usada ya para poner de manifiesto las leyes de las atracciones y repulsiones magnéticas (582). La única modificación que debe introducirse en la balanza consiste en que la aguja imantada, suspendida del alambre, se reemplaza por una barra de goma laca que termina en un pequeño disco de oropel  $n$  (fig. 420), y en que, la aguja imantada vertical se sustituye por una barrita de vidrio  $i$ , terminada por una esfera de cobre  $m$ . La [figura 420](#) presenta también algunas otras modificaciones relativamente a la 417, pero son arbitrarias: en vez de ser rectangular la caja, es cilíndrica, y en su contorno se encuentra pegada una tira de papel dividida en 360 grados, de suerte que la graduación ofrece inmediatamente el ángulo de separación, siendo así que la figura 417, marca la tangente de este ángulo. Por último, se compone el micrómetro de un pequeño disco graduado  $e$ , móvil independientemente del tubo  $d$  y de un índice  $a$  fijo, que sirve para marcar los grados que gira el disco  $e$ : en su centro existe un botón que gira con él, y cuyo pie abraza la extremidad del alambre que sustenta la aguja  $on$ .

Para demostrar la primera ley, se seca el aire del aparato para que sea menor la pérdida de electricidad, lo que se obtiene por medio de una cápsula llena de cal viva que se deja muchos días dentro del mismo

aparato. Completamente seco el aire, correspondiendo el cero del micrómetro al índice  $a$ , se da vuelta al tubo móvil  $d$ , hasta que la aguja  $on$  marque el cero del círculo graduado  $e$ , que es la posición de la esfera  $m$  cuando se halla dentro de la caja. Sacando entonces dicha esfera, y cogiéndola por su tubo aislador  $i$ , se la electriza, poniéndola en contacto con un manantial de electricidad, con la máquina eléctrica, por ejemplo, y luego se introduce nuevamente en el aparato por la abertura  $r$  del platillo que le cubre. En el acto mismo es atraído el disco  $n$ , se electriza luego con el contacto de la esfera y es repelido, y después de algunas oscilaciones se para, cuando la torsión del alambre equilibra la fuerza repulsiva que se ejerce entre el disco y la esfera. Supongamos que la torsión de la aguja sobre el cuadrante  $c$  valga 20 grados, como la torsión del alambre es proporcional a la fuerza de torsión (70, 2.º), podemos considerar este número 20 como representante de la repulsión eléctrica a la distancia  $a$  que se encuentra la aguja. Para medir esta fuerza a una distancia menor, se da vuelta al disco  $e$  en el sentido de la flecha, hasta que la distancia del oropel  $n$  a la esfera  $m$  sea sólo de 10 grados, es decir, dos veces menor, siendo preciso que la aguja recorra 70 grados para que llegue a dicho punto. Así, pues, el alambre se habrá torcido en su extremidad superior 70 grados en el sentido de la flecha y 10 grados en sentido contrario respecto a su parte inferior. Sumando las dos torsiones, se obtiene, por consiguiente, una total de 80 grados, o sea cuádruple de la que corresponde a una distancia doble: por otra parte, siendo siempre la fuerza de torsión igual y contraria a la repulsión, es preciso que se haga ésta a su vez cuatro veces mayor, para una distancia dos veces menor. Compruébase también que, para una distancia tres veces más pequeña, es nueve veces más considerable la repulsión, hechos que demuestran la ley de las repulsiones.

Del mismo modo se puede demostrar la ley de las atracciones, dando electricidades contrarias a la esfera y al disco, y equilibrando su atracción por medio de una torsión adecuada del alambre.

*Segunda ley.* -Para demostrar que las fuerzas eléctricas son proporcionales a las cantidades de electricidad de los cuerpos, se electriza igualmente la esfera de cobre  $m$ , y luego, observando la repulsión de la aguja  $on$ , se quita la esfera  $m$  y se la toca con otra de cobre del mismo diámetro, en el estado neutro y aislada por un mango de vidrio, en cuyo caso cede la esfera  $m$  la mitad de su electricidad a la otra, supuesto que son iguales las superficies de ambas esferas (596). Introduciendo de nuevo la primera en el aparato, se nota que la repulsión no vale ya más que la mitad de su valor anterior; y si otra vez se quita a  $m$  la mitad de la electricidad que le queda, la repulsión no es más que el cuarto de la primitiva, y así sucesivamente, con lo cual queda demostrada la ley que nos ocupa.

En estos experimentos sirve de intervalo de los cuerpos eléctricos el arco que mide la torsión, es decir, que se toman los arcos por sus cuerdas, lo cual no es más que una aproximación; pero el error no influye sensiblemente en los resultados, por ser bastante pequeños los arcos para que puedan sustituirlos sus cuerdas<sup>(8)</sup>.

595. Transporte de la electricidad a la superficie de los cuerpos. -Cuando un cuerpo aislado, de forma cualquiera, se electriza, la positiva, ya negativamente, se dirige el fluido eléctrico a la superficie del cuerpo, en donde forma una capa muy tenue. Esta acumulación de la electricidad en la superficie se demuestra por los experimentos que siguen, y de los cuales respecto a los dos primeros, somos deudores a Coulomb:

1.º Se toma una esfera hueca de cobre, aislada sobre un pie de vidrio, y con una abertura circular en su parte superior (fig. 421). Electrizada por su contacto con un foco eléctrico, se tocan sucesivamente sus superficies interior y exterior con un *plano de prueba*, o sea una barrita de goma laca, terminada por un disco metálico que sirve para recoger la electricidad. Tocando exteriormente, con el plano de prueba, la esfera electrizada, recogía Coulomb parte de la electricidad, puesto que presentando dicho plano a la aguja  $on$  de la balanza de torsión (fig. 420), se notaba una atracción. Tocando la superficie interna, no observaba Coulomb vestigio alguno de electrización, deduciendo de aquí que sólo había electricidad libre en la superficie exterior de la esfera.

Con todo, no es, al parecer, rigurosa esta consecuencia, porque habiendo repetido recientemente M. Bourbouze el experimento anterior, haciendo comunicar cada una de las dos caras de la esfera hueca con un electrómetro de panes de oro (605), encontró que ambos estaban cargados de la misma electricidad y en cantidad igual, lo cual prueba que no sólo se dirige este fluido a la superficie externa, sino también a la interna. A la par se da cuenta de la existencia de la electricidad que posee el plano de prueba, después de haber tocado el interior de la esfera, diciendo que proviene de la barrita de goma laca, en la cual el fluido

neutro puede descomponerse por la influencia de la electricidad que se encuentra sobre los bordes de la abertura de la esfera hueca.

2.º Sobre una esfera de cobre, aislada por un pie de vidrio, se aplican dos hemisferios huecos, también de cobre, del mismo diámetro que ella, y que pueden cubrirla exactamente y separarse cuando así se quiera, por medio de mangos de vidrio. Electrizada la esfera, se aplican sobre la misma los dos hemisferios que se cogen por los mangos de vidrio, y luego se retiran a un mismo tiempo y de una manera brusca ([fig. 422](#)). Obsérvase que quedan ambos electrizados, pero que no conserva huella alguna, de electricidad la esfera, de manera que todo el fluido se encontraba en la superficie, supuesto que se lo han sustraído por completo las dos cubiertas.

3.º Púédese comprobar que se dirige la electricidad a la superficie de los cuerpos, por medio del aparato representado en la [fig. 423](#). Consta de un cilindro de cobre aislado, en el cual se ve una lámina metálica muy flexible, que puede arrollarse o desarrollarse cuando así se quiera, haciendo girar al cilindro por medio de un manubrio. Por fin, sobre una esfera de metal, en comunicación con el cilindro, existe un pequeño electrómetro compuesto de un cuadrante de marfil, y en el centro una varilla ligera terminada por una esferita de médula de saúco. Cuando se comunica electricidad al cilindro, se ve que diverge el pequeño electrómetro en virtud de una repulsión eléctrica. Dando vuelta entonces al cilindro, de modo que se desarrolle la lámina metálica que lo cubre, disminuye la divergencia, la cual aumenta al arrollarla. Dedúcese de esto que, no variando la cantidad total de electricidad que posee fin cuerpo, la repulsión que ejerce la electricidad en cada punto de la superficie, es tanto menor, cuanto mayor es ésta, quedando así demostrado que la electricidad se dirige a la superficie.

4.º Una cuarta experiencia, dispuesta por M. Faraday, consiste en fijar sobre un aro metálico aislado una bolsita cónica de muselina, bastante parecida a las que se usan para coger mariposas ([fig. 424](#)). Mediante dos hebritas de seda sujetas a los dos lados del vértice del cono, se puede desfundar la bolsa, cuando se quiera. Entendido esto, se electriza la muselina tocándola con un cuerpo electrizado, y se encuentra, con el auxilio de un plano de prueba, que su superficie exterior es la única electrizada; luego, tirando de la hebra de seda interior, se vuelve la bolsita, de modo que su superficie interna venga a ser la externa, y recíprocamente; en cuyo caso se reconoce que también es la superficie externa la única que está electrizada.

5. Finalmente, la experiencia manifiesta que una esfera maciza de metal no adquiere más electricidad que una esfera de madera del mismo diámetro, recubierta con una lámina metálica muy delgada.

Considérase la propiedad que tiene la electricidad de acumularse en la superficie de los cuerpos, como una consecuencia de la fuerza repulsiva que cada fluido ejerce sobre sí mismo. En efecto, sometiendo al cálculo la hipótesis de los dos fluidos, y admitiendo que se atraen mutuamente en razón inversa del cuadrado de la distancia, y que rechazan sus propias moléculas, siguiendo la misma ley, llegó Poisson a la misma consecuencia que Coulomb sobre la distribución de la electricidad en los cuerpos. Supónese, pues, que la electricidad libre se halla como acumulada, en forma de una capa sumamente tenue, en la superficie de los cuerpos electrizados, de la cual tiende sin cesar a escaparse, encontrándose tan sólo retenida por la resistencia que le opone la débil conductibilidad del aire<sup>(9)</sup>.

El esfuerzo de la electricidad para escaparse de los cuerpos se denomina *tensión*. No tardaremos en indicar las causas que originan su variación.

596. Influencia de la forma de los cuerpos respecto a la acumulación de la electricidad. -En una esfera metálica, el espesor de la capa eléctrica es igual en todos los puntos de su superficie, como así debe acontecer, atendida la forma simétrica del cuerpo. Se comprueba este hecho por medio del plano de prueba y de la balanza de torsión ([fig. 420](#)). Electrízase al efecto una esfera aislada, igual a la de la [fig. 421](#), y tocándola sucesivamente en diversos puntos con el plano de prueba, al presentarse este cada vez a la aguja, se observa constantemente la misma tensión, con lo cual se ve que en todas partes ha recogido el plano de prueba una cantidad igual de electricidad.

Si el cuerpo es un elipsoide prolongado ([fig. 425](#)), ya no es uniforme el espesor de la capa eléctrica; pues obedeciendo el fluido a su propia repulsión, se acumula hacia las partes más agudas, en las cuales adquiere así la electricidad un máximo de espesor. Para demostrarlo, se tocan diferentes puntos del elipsoide con el plano de prueba, y llevando éste a la balanza de Coulomb, se nota el máximo de torsión

cuando se toca la extremidad a del elipsoide, y el mínimo al efectuarse el contacto con la región media *e*. Poisson ha deducido por medio del cálculo, que la tensión en cada punto es proporcional al cuadrado del espesor de la capa eléctrica.

597. Acción de las puntas. -Denomínase así, en los cuerpos conductores, la propiedad que poseen cuando terminan en punta de dejar escapar el fluido eléctrico. Esta propiedad, descubierta por Franklin, se explica por la ley que rige la distribución de este fluido en la superficie de los cuerpos. En efecto, acumulándose la electricidad (596) hacia las partes agudas, crece el espesor eléctrico cerca de las puntas, y aumentando a la par la tensión, supera muy pronto la resistencia del aire, y se desprende en la atmósfera. Acercando la mano a la punta, se nota al parecer un ligero soplo, emitido por ella, y en la oscuridad es visible en la misma un penacho luminoso.

598. Comunicación y distribución de la electricidad en los cuerpos en contacto. -Cuando se ponen en contacto dos cuerpos conductores, electrizado uno y en el estado natural el otro, se divide la electricidad entre los dos según una relación que depende de la que medie entre sus superficies; y cuando se separan, ha ganado uno y perdido el otro electricidad, en todos sus puntos. Si no son conductores, sólo se nota el aumento o disminución en los puntos de contacto.

Valiéndose del plano de prueba y de la balanza de torsión, hizo Coulomb muchos experimentos sobre la distribución de la electricidad en la superficie de los cuerpos en contacto. Con esferas metálicas aisladas, puestas en contacto y electrizadas en tal estado, encontró que se distribuye distintamente el fluido eléctrico en sus superficies, siguiendo la relación de los diámetros. Siendo éstos iguales, es nulo el espesor eléctrico en el punto de contacto, el cual sólo es sensible a los 20 grados de dicho punto; en cambio crece rápidamente de 20 a 30 grados, con mayor lentitud de 60 a 90, permaneciendo casi constante de 90 a 180 grados.

Cuando son desiguales los diámetros, según la relación de 2 a 1, el espesor eléctrico, que es aún nulo en el punto de contacto, al principio es más considerable en la esfera mayor, pero aumenta luego con más rapidez en la pequeña, y en ésta a 180 grados del punto de contacto existe el espesor máximo.

599. Pérdida de la electricidad en el aire. -Los cuerpos eléctricos, aunque aislados, pierden siempre con mayor o menor rapidez su electricidad. Depende esta pérdida de dos causas, que son: 1.<sup>a</sup> la conductibilidad del aire y de los vapores que rodean a los cuerpos, y 2.<sup>a</sup> la conductibilidad de los aisladores que los sustentan.

La pérdida originada por el aire varía con la tensión eléctrica, con la renovación del aire y con su estado higrométrico. El aire seco conduce mal la electricidad, pero el húmedo es buen conductor, siéndolo tanto más, cuanto mayor es la cantidad de vapor que contiene. Coulomb demostró que, cuando el *aire se encuentra en calma y en un estado higrométrico constante la pérdida en un tiempo muy corto es proporcional a la tensión*; ley análoga a la de Newton sobre el enfriamiento (363).

Coulomb efectuó sus experiencias en un aire húmedo; pero en los gases perfectamente desecados, M. Matteucci ha encontrado que la pérdida de la electricidad no sigue la ley de Coulomb, y que, entre ciertos límites de tensión, la pérdida es independiente de la cantidad de electricidad y proporcional al tiempo; es decir, que en tiempos iguales las pérdidas sucesivas son iguales.

Según el mismo físico, siendo iguales la temperatura y la presión, la pérdida es la misma en el aire, en el hidrógeno y en el ácido carbónico, cuando estos gases se hallan completamente desecados; con cuerpos electrizados enérgicamente, la pérdida es mayor cuando están electrizados negativamente, que cuando lo están positivamente; en los gases secos, según una presión constante, la pérdida aumenta con la temperatura; finalmente, en los gases secos, es siempre la pérdida independiente de la naturaleza del cuerpo electrizado, es decir, que es la misma, así cuando el cuerpo es bueno como mal conductor.

En cuanto a la pérdida ocasionada por los soportes, además de que nunca aíslan perfectamente, ha notado Coulomb, que causan una gran merma de fluido en los cuerpos enérgicamente electrizados. Disminuye gradualmente esta pérdida, y llega a ser constante cuando es muy débil la tensión eléctrica. Hasta puede despreciarse en este caso, dando suficiente longitud a los aisladores; longitud que según Coulomb, debe

aumentar proporcionalmente al cuadrado de la tensión eléctrica del cuerpo aislado. La goma laca aísla entonces por completo; mas no así el vidrio, que hay que secarle con cuidado por ser higrométrico.

600. Pérdida de la electricidad en el vacío. -Retenida la electricidad en la superficie de los cuerpos por la mala conductibilidad del aire, aumenta la pérdida cuando se halla éste enrarecido, disipándose por completo aquel fluido en el vacío, donde es nula la resistencia. Tal es, por lo menos, la deducción a la cual conduce la teoría matemática que explica el equilibrio de la electricidad en la superficie de los cuerpos; pero Hawksbee, Gray, M. Harris y M. Becquerel han demostrado que podían conservarse débiles tensiones eléctricas en el vacío. El último físico llegó a observar que, en el vacío que mide un milímetro (178), un cuerpo a los quince días conservaba todavía su electricidad; y es probable que, si se encontrase aquél en un vacío perfecto, lejos de cualquier materia que pudiese ejercer en él una acción por influencia (601), conservaría indefinidamente, cierta tensión eléctrica.

▽△

### Capítulo III

▽△

#### **Acción de los cuerpos electrizados sobre los que se encuentran en estado neutro; máquinas eléctricas**

601. Electrización por influencia o por inducción. -Un cuerpo electrizado actúa sobre otro en estado neutro de la misma manera que el imán sobre el hierro dulce (562); es decir, que, descomponiendo al fluido neutro, atrae la electricidad de nombre contrario a la que posee, y repele la del mismo nombre. Para expresar este efecto, que es una consecuencia de la acción mutua de las dos electricidades, se dice que el cuerpo que primero se hallaba en estado neutro, se encuentra después electrizado por *influencia* o por *inducción*.

Demuéstrase la electrización por influencia merced a un cilindro de latón A, aislado sobre un pie de vidrio, en cuyos dos extremos existen dos pendulitos eléctricos formados por esferas de médula de saúco, suspendidas de hilos de cáñamo que son conductores ([fig. 426](#)). Colocando este cilindro a algunos centímetros de uno de los conductores M de la máquina eléctrica, ésta, que, según veremos en breve, está cargada de fluido positivo, atrae al negativo y repele al positivo, de suerte que distribuyéndose entonces los fluidos conforme lo indican los signos + y -, se desvían ambos péndulos.

Para conocer la clase de electricidad de que están cargadas las extremidades del cilindro, se frota una barra de lacre, y aproximándola al péndulo que se halla más cerca de la máquina eléctrica, se observa una repulsión que indica que dicho péndulo tiene la misma electricidad que la resina, o sea la negativa. Presentando de igual manera al segundo péndulo un tubo de vidrio frotado, surge también la repulsión, y por lo tanto, debe estar electrizado positivamente el péndulo. Así pues, un cuerpo electrizado por influencia, posee a la vez, en dos regiones opuestas, las dos especies de electricidad en el estado libre. Entre estas partes electrizadas en sentido contrario existe necesariamente una zona en el estado neutro, como puede comprobarse disponiendo muchos pendulitos con esfera de médula de saúco a lo largo del cilindro, pues decrece rápidamente su divergencia alejándose de las extremidades, y llega a ser nula en cierto punto, que es el punto neutro. Jamás se halla éste en medio del cilindro, pues su posición depende de la carga eléctrica y de la distancia del cilindro al cuerpo que sobre él actúa por influencia, y así es que se halla siempre más aproximado de la extremidad más inmediata a dicho cuerpo.

Un cuerpo electrizado por influencia actúa a su vez sobre los cuerpos cercanos para separar sus dos fluidos, como se ve en la disposición relativa de los signos + y - sobre el segundo cilindro.

Todo cuerpo electrizado por influencia presenta estos dos principios: 1.º Luego que cesa la influencia, se recomponen los dos fluidos, y no conserva el cuerpo indicio alguno de electricidad. Compruébase este principio con los cilindros de la [figura 426](#), porque caen los péndulos apenas se los aleja del manantial

eléctrico, o desde que pasa éste al estado neutro tocándolo con el dedo. 2.º Cuando está electrizado por influencia un cuerpo conductor, si se le toca *en cualquier punto* con una barrita metálica o con el dedo, siempre se *escapa al suelo el fluido del mismo nombre que el del manantial eléctrico, quedando retenido el de nombre contrario por la atracción del fluido del manantial*. Por ejemplo, en los cilindros anteriores queda el fluido negativo, tanto si se los toca por la extremidad positiva, como por la negativa, o bien por su mitad.

Por un efecto de la electrización por influencia no puede cargarse una máquina eléctrica, si se encuentra aproximada una punta metálica en comunicación con el suelo; pues, obrando el fluido positivo de la máquina por influencia sobre la punta, pasa por ésta (597) una corriente continua de fluido negativo que neutraliza la electricidad de la máquina.

602. Teoría de M. Faraday respecto a la electrización por influencia. -La teoría de la electrización por influencia, tal cual acabamos de exponerla, es la admitida hasta aquí por todos los físicos; pero investigaciones recientes de Faraday sobre la polaridad eléctrica tienden a modificarla y acaso a destruirla por completo. Un efecto, hasta ahora no se había tomado en consideración, en los fenómenos citados, el medio que separa el cuerpo electrizado de aquél en el cual se deja sentir la influencia. Los nuevos experimentos de M. Faraday conducen más bien a admitir que por la existencia misma de este medio se operan todos los fenómenos por influencia, y no por una acción a distancia, o por lo menos a una distancia que no exceda del intervalo que existe entre dos moléculas adyacentes. Admite M. Faraday que se produce entonces en el medio intermedio, una serie de capas moleculares alternativamente positivas y negativas, constituyendo lo que ha denominado *polarización* de dicho medio. Dependería, pues, en la nueva teoría de la polarización de las moléculas del aire o de otro medio la acción que al parecer ejercen a distancia los cuerpos electrizados sobre los que se hallan en el estado neutro, mientras que, según la teoría hasta hoy día admitida, sólo desempeña el aire un papel pasivo, pues únicamente por su no conductibilidad se opone a la recomposición de las electricidades contrarias. En una palabra, tiende la nueva teoría a suprimir las acciones a distancia, reemplazándolas por la acción continua y constante de un medio, de una materia intermedia propia para transmitir la acción de uno a otro cuerpo<sup>(10)</sup>.

Llamando *poder inductor* a la propiedad que tienen los cuerpos de transmitir al través de su masa la influencia eléctrica, M. Faraday encuentra que todos los cuerpos aisladores no poseen el mismo poder inductor. Para comparar los poderes inductores de las diferentes sustancias, hizo uso del aparato representado en la [figura 428](#), y del que la [figura 427](#) representa un corte vertical. Este aparato se compone de una cubierta esférica PQ, formada de dos hemisferios de latón, que se separan como los hemisferios de Magdeburgo ([fig. 93](#)), y, como ellos, se ajustan por sus bordes de manera que cierren herméticamente. En el interior de esta cubierta existe una esfera de latón C, de un diámetro menor que el de la cubierta, y comunicando con una esferita exterior B, mediante una varilla metálica, pero aislada de la cubierta PQ por una gruesa capa de goma laca A. En cuanto al intervalo *mn*, se halla destinado a recibir la sustancia cuyo poder inductor trata de medirse. Finalmente, el pie del aparato tiene un taladro con su llave, que puede atornillarse sobre la máquina neumática cuando se quiere extraer o enrarecer el aire comprendido en el espacio *mn*.

Entendido esto, se tienen dos aparatos semejantes al que acabamos de describir, idénticos entre sí, y no conteniendo ambos desde luego más que aire en el intervalo *mn*; luego, comunicando las cubiertas PQ con el suelo, se pone la esferita B de uno de los aparatos en comunicación con un manantial de electricidad. La esfera C se carga entonces, como la armadura interior de una botella de Leyden, representando la capa de aire *mn* la lámina aisladora que separa las dos armaduras. Una vez cargado el aparato, se mide la tensión de la electricidad que ha quedado libre sobre la esfera C, tocando con un plano de prueba la esferita B, y llevándole a la balanza de torsión. En el experimento de M. Faraday, ha obtenido así este físico una torsión de 250° que representaba la tensión sobre la esfera C. Poniendo, finalmente, en comunicación la esferita B del aparato cargado de esta manera, con la esferita B del segundo aparato, no cargado todavía, se encuentra, mediante el plano de prueba y la balanza de torsión, que la tensión sobre las dos esferas C es sensiblemente 125, es decir, que la electricidad se ha distribuido igualmente sobre los dos aparatos, lo cual se podía prever de antemano, puesto que son idénticos y que ambos contienen aire en el intervalo *mn*.

Hecha esta primera experiencia, se repite, pero llenando preliminarmente el intervalo *mn*, en el segundo aparato, de la sustancia cuyo poder inductor se quiere estudiar, por ejemplo, de goma laca. Luego, habiendo cargado el otro aparato, aquél en el cual el intervalo *mn* está siempre lleno de aire, se mide la

tensión sobre la esfera C; supongamos que sea 290, que es el número encontrado por M. Faraday. Pero si se hace comunicar actualmente la esferita B del aparato en que está la goma laca con la esferita B del aparato cargado, ya no se encuentra, como en el caso anterior, que cada aparato posea la mitad de 290, o sean 145. En efecto, el aparato con aire solo acusa una tensión de 114, y el de la goma laca una tensión de 113. El aparato con aire, que tenía 290 y sólo tiene 114, ha perdido, pues, 176; por consiguiente, debería encontrarse sobre el aparato con goma laca 176 en vez de 113. Y puesto que sólo se halla 113, esto manifiesta que se ha neutralizado una cantidad mayor de electricidad al través de la capa de goma laca, que al través de la de aire, de igual espesor que en el primer experimento; de donde se deduce, que el poder inductor de la goma laca es mayor que el del aire.

Operando según acabamos de describir, se encuentra que, representando por 1 el poder inductor del aire, los poderes de las sustancias siguientes son:

Aire.	1	Cera amarilla.	1,86
Flint.	1,76	Vidrio.	1,90
Resina.	1,77	Goma laca.	2
Pez.	1,80	Azufre.	2,24

En cuanto a los gases, ha encontrado Faraday que todos poseen sensiblemente el mismo poder inductor, y que este poder no se modifica ni por la temperatura ni por la presión del gas.

Según la capacidad inductriz propia que poseen los cuerpos aisladores, M. Faraday ha dado a estos cuerpos el nombre de *dieléctricos*, por oposición a los cuerpos conductores que no gozan de igual propiedad. El mismo físico, que ha hecho un profundo estudio de la propiedad que gozan los dieléctricos en la inducción, ha llegado a estos dos resultados:

1.º *Que no hay inducción al través de los cuerpos conductores cuando se encuentran en comunicación con el suelo;*

2.º *Que la inducción de un cuerpo sobre otro puede ejercerse en línea curva, cuando entre los dos cuerpos se interpone un dieléctrico.*

Estos principios no sólo se han admitido por todos los físicos, sino que es preciso consignar que las experiencias de las cuales se han deducido, pueden interpretarse de distinta manera que lo ha efectuado M. Faraday.

M. Matteucci que ha estudiado también concienzudamente la inducción de los cuerpos electrizados, sobre los que son malos conductores, ha evidenciado recientemente, y de una manera completa, la polarización eléctrica molecular, habiendo probado además que el poder aislador de una sustancia es tanto mayor, cuanto más débil es su polarización molecular.

Consignemos pues, como resultado de las investigaciones de Faraday y de Matteucci, que los cuerpos malos conductores pueden transmitir lentamente la electricidad, no sólo por su superficie, sino también por su masa. Nótese, por ejemplo, al dejar en contacto una barra de resina por algún tiempo con una máquina eléctrica cargada, que se electriza positivamente según una extensión más o menos notable, y que frotándola entonces con lana, se electriza negativamente, pasando después de una manera gradual al estado neutro, hasta que reaparece de nuevo la electricidad positiva, hecho que reconoce por causa, el que habiendo polarizado la electricidad de la máquina las moléculas hasta cierta profundidad, después su reacción sobre la superficie, reducen ésta al principio al estado neutro y en seguida al positivo.

603. Comunicación de la electricidad a distancia. -En el experimento representado en la [figura 426](#), tienden a reunirse las electricidades contrarias del conductor M y del cilindro A, manteniéndose tan sólo en la superficie de estos dos cuerpos por la resistencia del aire; pero, si ésta disminuye o si aumenta la tensión, supera la fuerza atractiva de ambas electricidades al obstáculo las separa, y se recomponen entonces al través del aire, dando origen a una chispa más o menos viva, acompañada de un ruido seco.

Encontrándose así neutralizada la electricidad negativa del cilindro por la positiva que le cedió la máquina, no queda sobre aquél más que fluido positivo que conserva, aunque cese la influencia.

El mismo fenómeno ocurre presentando el dedo a un cuerpo muy electrizado, pues éste descompone por influencia la electricidad natural de la mano, atrae con chispa al fluido contrario, y rechaza al suelo el fluido del mismo nombre.

La distancia explosiva varía según la tensión del fluido eléctrico, la forma de los cuerpos, su poder conductor y la mayor o menor resistencia de los medios que los circuyen.

Todo cuanto hemos expuesto se aplica a la electrización por influencia de los cuerpos buenos conductores, pues los que lo son malos, difícilmente se electrizan por influencia; pero cuando se han electrizado, persiste el fluido mucho más tiempo que la causa que lo ha producido, lo cual se explica por su polarización molecular (602).

604. Movimientos de los cuerpos electrizados. -La teoría de la electrización por influencia explica los movimientos de atracción y de repulsión que ofrecen entre sí los cuerpos electrizados. En efecto, dado un cuerpo fijo M (fig. 429), que supondremos electrizado positivamente, y otro móvil N, situado a corta distancia del primero, se pueden considerar tres casos:

1.º *El cuerpo móvil se halla en el estado natural y es buen conductor.* -Obrando en este caso el cuerpo M por influencia sobre el fluido neutro de N, atrae al negativo y repele al positivo; de suerte que el máximo de tensión de ambos fluidos está respectivamente en los puntos *a* y *b*. Como las atracciones y repulsiones eléctricas se ejercen en razón inversa del cuadrado de la distancia (594), es mayor la atracción entre los puntos *a* y *c*, que la repulsión entre los *b* y *c*, y el cuerpo móvil se acerca al fijo por efecto de una resultante igual al exceso de la fuerza atractiva sobre la repulsiva.

2.º *El cuerpo móvil está electrizado y es conductor.* -Si el cuerpo móvil está cargado de electricidad contraria a la del M, hay siempre atracción; y si la electricidad es del mismo nombre, hay repulsión a cierta distancia, pero más cerca puede haber atracción sin necesidad de contacto. Obsérvese, para explicar esta anomalía, que además del fluido libre que contiene ya el cuerpo móvil, lleva también fluido natural, y que, descompuesto éste por la influencia del positivo de M, recibe el hemisferio *b* nueva cantidad de fluido positivo, mientras que el *a* sólo se carga del negativo; hay, pues, como en el caso anterior, atracción y repulsión. La segunda fuerza supera en un principio a la primera, porque la cantidad de fluido positivo en N es mayor que la del negativo; pero disminuyendo el intervalo *ac*, crece la fuerza atractiva con más rapidez que la repulsiva, hasta que llega a ser superior a ésta.

3.º *El cuerpo móvil es mal conductor.* -Si el cuerpo móvil es mal conductor y está electrizado, es repelido o atraído, según se halle o no cargado de la misma electricidad que el cuerpo fijo. Si se halla en el estado natural, como un manantial poderoso de electricidad y de acción prolongada, puede siempre, aun en los cuerpos peores conductores, descomponer más o menos el fluido natural, éste se descompone, en efecto, por la influencia del cuerpo M, si se encuentra este último suficientemente electrizado, y entonces hay atracción.

605. Electrómetro de panes de oro. -Se denominan *electrómetros* o *electrómetros* unos aparatitos que sirven para comprobar si un cuerpo está electrizado, y cuál es la índole de su electricidad. El péndulo eléctrico ya descrito (586) es un electrómetro. Se han ideado muchos aparatos de esta especie; pero en la actualidad sólo describiremos el electrómetro de panes de oro, si bien indicaremos después otro más sensible, o sea el *electrómetro condensador* de Volta (626).

El *electrómetro de panes de oro* o *electrómetro de Bennet*, consiste en un frasco B de vidrio (fig. 430), que se apoya sobre un platillo de cobre, y cuyo gollete está cerrado por un tapón cubierto de un barniz aislador, así como toda la parte superior del mismo frasco. Por el tapón pasa un grueso alambre de cobre, terminado exteriormente por una esfera C del mismo metal, e interiormente por dos hojitas de oro batido sumamente ligeras.

Cuando se acerca a este aparato un cuerpo cargado de una electricidad cualquiera, negativa, por ejemplo, como lo indica el dibujo, obrando por influencia sobre el fluido neutro de la esfera y del vástago, es

atraído a la primera el fluido positivo, y repelido el negativo hacia las hojitas de oro. Cargadas éstas así de la misma electricidad, se rechazan, hecho que nos manifiesta que el cuerpo A se halla electrizado.

Si se ignora la especie de electricidad del cuerpo examinado, es fácil reconocerla, tocando la esfera C con el dedo, mientras se halla el instrumento bajo la influencia del cuerpo A, pues la electricidad del mismo nombre que la de éste se escapa al suelo, y la esfera y el vástago quedan cargados de la *contraria* (601). Caen primero las hojitas de oro; pero retirando el dedo y luego el cuerpo A, vuelven a divergir. Si se desea saber entonces la especie de electricidad que conserva el aparato, se acerca lentamente a la esfera C una barra de vidrio frotada con lana, y si aumenta la divergencia de las hojitas, es señal de que la electricidad del electrómetro es repelida a la parte inferior, y de consiguiente, que es de la misma especie que la del vidrio, o sea, positiva. Si disminuye la divergencia, depende de que la electricidad del aparato es atraída por la del vidrio, y por lo tanto, es de nombre contrario, o lo que es lo mismo, negativa.

▽△

## Máquinas eléctricas

606. Electrífico. -Llámanse *máquinas eléctricas* los aparatos que se emplean para obtener un desarrollo más o menos abundante de electricidad estática. La máquina eléctrica más sencilla es el *electrífico*. Este aparato, inventado por Volta, se compone de una torta resinosa B ([fig. 432](#)), fundida en una caja de madera, y de un disco de madera también A, cubierto por papel de estaño y provisto con un mango aislador de vidrio. Para obtener electricidad por medio de este aparato, se principia secando a un calor moderado la torta resinosa y el disco de madera, y luego se sacude fuertemente la resina con una piel de gato que la electriza negativamente. Aplicando entonces el disco de madera cubierto de estaño sobre la resina ([fig. 431](#)), ésta, que es muy mala conductora, conserva su electricidad negativa, y, por su influencia sobre el disco, atrae el fluido positivo hacia la cara que está en contacto con ella, repeliendo a la otra el negativo. Tocando, pues, la lámina de estaño con el dedo, se quita el fluido negativo, y queda electrizado positivamente el disco. En efecto, separándole con una mano por el mango de vidrio, y presentándole la otra mano ([fig. 432](#)), salta una viva chispa que proviene de la recomposición del fluido positivo del disco con el negativo de la mano.

Electrizada la torta resinosa en un aire seco, puede conservar durante meses enteros su electricidad, obteniéndose en el trascurso de dicho tiempo tantas chispas como se quiera, sin necesidad de frotarlo de nuevo con la piel de gato, con tal que se cuide cada vez de tocar primero el disco cubierto de estaño, mientras se halla en contacto con la resina, y luego otra vez cuando se le tiene por el mango de vidrio.

Sirve en química el electrífico para hacer detonar, en el eudiómetro, las mezclas gaseosas por medio de la chispa eléctrica (634).

607. Máquina eléctrica de Ramsden. -Somos deudores de la primera máquina eléctrica a Otto de Guéricke, que es igualmente el inventor de la máquina neumática. Consistía en una esfera de azufre fija a un eje que se hacía girar con una mano, apoyando la otra en la esfera para que sirviese de frotador; no tardó en sustituir a dicha esfera un cilindro de resina, que a su vez reemplazó Hawkesbee por otro de vidrio, pero continuaba siempre la mano sirviendo de frotador. El físico alemán Winkler fue el primero que, hacia 1740, usó una almohadilla de crin cubierta de seda, como frotador; y en la misma época, Bose, profesor en el ducado de Wurtemberg, recogió, en un tubo de hoja de lata aislado, la electricidad que se desprendía por el frotamiento. Finalmente, en 1766, sustituyó Ramsden, en Londres, el cilindro de vidrio por un platillo circular de la propia sustancia frotado por cuatro almohadillas. Desde entonces aceptó la máquina eléctrica la forma que generalmente se le da en la actualidad.

Entre dos montantes de madera ([fig. 433](#)) existe un platillo circular P de vidrio, fijo por su centro a un eje que se hace girar por medio de un manubrio. Este platillo se halla oprimido, en la dirección de su diámetro vertical, entre cuatro *frotadores* o *almohadillas* F, de cuero o de seda. En el sentido de su diámetro horizontal pasa por entre dos tubos de latón, encorvados en forma de herradura, llamados *peines*, en razón a las puntas que, dispuestas a ambos lados de dichas piezas, miran al platillo. Estos

peines están fijos, a los *conductores*, o sea a unos tubos más gruesos C, aislados sobre cuatro pies de vidrio, y que comunican entre sí por un tubo de menor diámetro *r*.

Es sumamente sencilla la teoría de la máquina eléctrica, fundada en la electrización por frotamiento y por influencia. En su movimiento de rotación, se electrizan positivamente el platillo de vidrio, y negativamente las almohadillas; pero como éstas comunican con el suelo por los pies de madera, en los cuales se hallan clavadas, pierden su electricidad al mismo tiempo que se produce. La positiva del platillo obra por influencia sobre los conductores, y atrae la negativa que, al desprenderse por las puntas, va a combinarse con la positiva del vidrio, neutralizándola. Los conductores que pierden así su electricidad negativa, quedan electrizados positivamente. Por lo tanto, nada cede el platillo a los conductores en la máquina eléctrica; al contrario, sólo le roba su fluido negativo, originado por la descomposición del fluido natural.

Cargada la máquina, al aproximar la mano se saca una fuerte chispa, que se renueva girando el disco, pues como es el resultado de la combinación del fluido negativo de la mano con el positivo de la máquina, tiende ésta, a cada chispa, a recobrar el estado neutro, pero en el acto mismo la electriza de nuevo la influencia del disco.

608. Atención que requiere el manejo de las máquinas eléctricas; almohadillas de Steiner. -Para dar a una máquina eléctrica toda la actividad de que es susceptible, hay que secar con cuidado los pies, el platillo y las almohadillas, con un calor moderado y con un trapo caliente.

Merecen una atención particular las almohadillas, así por su disposición, como por su buen estado de conservación. Las de más uso son de cuero delgado, rellenas de crin y cubiertas de oro *musivo*, que es una materia pulverulenta, compuesta de bisulfuro de estaño, y que aumenta mucho el desarrollo de la electricidad, probablemente por una descomposición química, como lo indica el olor sulfuroso que despiden las almohadillas durante el rozamiento.

Digamos, sin embargo, que si bien no puede ponerse en duda que las sustancias oxidables, que en las acciones químicas ofrecen los efectos más enérgicos, son también las que desprenden una cantidad mayor de electricidad en su frotamiento; en cambio Mr. Ed. Becquerel admite que el estado molecular de los cuerpos que se frotan, influye notablemente sobre los resultados obtenidos. En efecto, la experiencia le ha comprobado que los cuerpos reducidos al estado pulverulento y suaves al tacto, tales como el oro musivo, el talco, la plumbagina, la harina, la flor de azufre y el carbón de coke, desarrollan por el rozamiento una cantidad notable de electricidad. Pero quizás la causa de este hecho deba atribuirse a que durante el frotamiento, el estado pulverulento al cual se reducen los cuerpos que hemos enumerado, aumenta en los mismos la propiedad de prestarse a las acciones químicas en presencia del oxígeno del aire.

De algunos años a esta parte, M. Steiner, en Francfort-sur-le Mein, ha vuelto a usar unos antiguos frotadores, ideados, al parecer, por Van-Marum, en 1788, y que dan a las máquinas una tensión eléctrica muy superior a la que se obtiene con las almohadillas de crin. Estos frotadores, representados en la figura anterior, consisten en una placa de madera bien plana y oprimida contra el platillo por un doble resorte, o bien, lo cual es preferible, por dos tornillos de presión que se regulan según se desea. Dicha tabla de madera está cubierta en toda su extensión, por cuatro pedazos de un tejido de lana tan grueso como el de las mantas de Palencia. Sobre el primer pedazo se aplica una hoja de papel de estaño, que se dobla por la parte inferior para pasar entre el primer y segundo pedazo del tejido, luego entre el segundo y el tercero, y así sucesivamente hasta llegar a la tablita, donde se pone en comunicación con un papel dorado pegado detrás de la misma, y con el suelo por medio de papel de estaño y de cadenas metálicas, fijas en los pies que sostienen las almohadillas.

Entendido esto, se recubre el todo de una tela clara, de algodón, sujeta a los contornos de la tablita. Estando ligeramente impregnada de sebo esta tela de algodón, se la recubre de una amalgama de estaño, zinc, bismuto y mercurio, amalgama de la cual M. Steiner no ha publicado las proporciones. Sobre la tela de algodón se aplica en seguida un pedazo de tafetán grueso, cosido al algodón por arriba, por abajo y lateralmente, pero sólo por un lado; por el otro se prolonga en sentido de la rotación del platillo, unos 6 centímetros próximamente, de modo que lo recubre parcialmente. Por último, se sitúa sobre el tafetán una capita de sebo, y luego otra capa de la misma amalgama que se puso sobre el algodón. Esta capa de amalgama, aplicada sobre el tafetán, es la que frota contra el platillo y lo electriza positivamente, mientras

que la amalgama, electrizándose negativamente, trasmite su electricidad a la amalgama del algodón, luego al papel de estaño, y por último, al depósito común.

M. Steiner ha observado que el color del tafetán ejerce alguna influencia sobre el desarrollo de la electricidad. El tafetán amarillo es el que mejor la desarrolla; sigue después el verde, el azul, el rojo y el blanco; en seguida el pardo y el violeta, y por último, el negro, que no produce ninguna electricidad.

Con los frotadores que acabamos de describir, se obtiene, particularmente en tiempo seco, un desarrollo notable de electricidad. Con máquinas cuyos platillos midan 80 centímetros de diámetro, parten constantemente grandes chispas desde las almohadillas a los peines, siguiendo el contorno del platillo, lo cual proviene probablemente de la arista viva de éste y del oro musivo que queda adherido a la misma arista. El único inconveniente de los frotadores que acabamos de describir, consiste en que se engrasa muy pronto el tafetán, de modo que hay que renovarlo, porque, de lo contrario, se debilita muchísimo el efecto.

A fin de evitar la pérdida de electricidad del platillo al través del aire, se fijan a veces en los pies de madera, dos cuartos de círculo de tafetán engomado, que rodean al vidrio por sus dos caras sin tocarle, el uno a la derecha de la almohadilla *a*, y el otro inferiormente en la parte opuesta: estos tafetanes, de forma circular, no se han representado en la figura. Es hecho averiguado que la seda amarilla, de poco cuerpo y dada de aceite, es la que ofrece mejores resultados; téngase presente que el tafetán sólo debe engomarse por un lado, que ha de ser el que no se aplica sobre el vidrio, siendo indispensable, por último, que medie un contacto perfecto entre el tafetán y el platillo de vidrio.

La máquina eléctrica de Ramsden, dispuesta como indica la [fig. 433](#), da necesariamente electricidad positiva, pero puede conseguirse también que la ofrezca negativa. Aíslanse al efecto los cuatro pies de la mesa sobre gruesos apoyos de vidrio o de resina, y se pone luego en comunicación el conductor C con el suelo. Haciendo girar en seguida el platillo, se pierde en el suelo la electricidad positiva del conductor, mientras que la negativa de las almohadillas se difunde por los pies que sostienen al platillo, y por la mesa. Aproximando entonces a éstos la mano, y sobre todo a las tiras de estaño O, se sacan chispas, que con una máquina enérgica causan una impresión mucho más viva que la de la chispa de los conductores.

609. Tensión máxima; electrómetro de cuadrante. -Aun cuando se observen todas las condiciones que acabamos de exponer, reconoce un límite del que no puede pasar la tensión de la máquina eléctrica, sea cual fuere la velocidad de rotación del platillo y el tiempo durante el cual se le haga girar. Este límite, que se presenta cuando la suma de las pérdidas es igual a la producción, depende de tres causas, que son: 1.<sup>a</sup> la pérdida originada por el aire y por el vapor de agua que éste contiene, que es proporcional a la tensión (599); 2.<sup>a</sup> la pérdida causada por los pies, y 3.<sup>a</sup> la recomposición de las dos electricidades de las almohadillas y del vidrio.

Ya hemos estudiado las dos primeras causas (599), y para examinar la tercera basta observar que, creciendo la tensión eléctrica con la velocidad de rotación, se presenta un momento en que supera a la resistencia que ofrece la no conductibilidad del vidrio. A partir desde este instante, se recompone parte de las dos electricidades desarrolladas en el vidrio y en las almohadillas, y permanece constante la tensión; de modo que siempre termina por ser independiente de la velocidad de rotación.

Mídese la tensión de la electricidad en las máquinas eléctricas con el *electrómetro de cuadrante* o *electrómetro de Henley*, que es un pendulito eléctrico compuesto de un vástago de madera en el cual se halla fijo un cuadrante de marfil *c* ([fig. 434](#)), en cuyo centro existe un pequeño eje, alrededor del cual gira una aguja de ballena, terminada por una esfera de médula de saúco *a*. Atornillado el instrumento en uno de los conductores, según se ve en el dibujo, a medida que se carga la máquina, diverge la aguja, que cesa de subir luego que se llega a máximo de tensión. Si no se dan ya entonces más vueltas al platillo, cae rápidamente la aguja en el aire húmedo pero con lentitud cuando se halla seco, lo cual revela que, es débil la pérdida.

610. Conductores secundarios. -Denomínanse *conductores secundarios* unos gruesos cilindros de cobre, de hoja de lata o de madera cubierta de estaño, que se aíslan por medio de pies de vidrio, o suspendiéndolos de cordones de seda, y que se ponen en seguida en comunicación con los conductores C de la máquina eléctrica ([fig. 433](#)). Aumentándose así la superficie sobre la cual se acumula la electricidad, no crece la tensión; pero sí la cantidad de fluido que se recoge en igualdad de tensión proporcionalmente

a la superficie. En efecto, cuando se descarga entonces la máquina, haciéndola comunicar con el suelo, se sacan de ella chispas mucho más intensas, y que producen un vivísimo resplandor en el aire.

611. Máquina eléctrica de Nairne. -Con la máquina eléctrica descrita sólo se recoge electricidad positiva; pero Nairne ideó, en Inglaterra, con objeto de electrizar a los enfermos, otra que conserva su nombre, y por medio de la cual se recogen a la vez las dos electricidades. Esta máquina ([fig. 435](#)) se compone de dos conductores aislados, y que no comunican entre sí; posee el uno un frotador C de cuero relleno de crin, y el otro un peine P con muchas puntas, y entre los dos conductores existe un cilindro de vidrio M que se hace girar con un manubrio, el cual al rodar toca por un lado con el frotador, y pasa por el otro muy cerca de las puntas.

Cuando gira el cilindro, se electrizan negativamente el frotador C y el conductor A, y positivamente el vidrio; y cuando pasa, éste rasando las puntas del conductor B, descompone su fluido natural, atrae el negativo y se queda B electrizado con el positivo. Dos varillas curvas D y E terminan según dos esferas de cobre bastante aproximadas para que parta constantemente de ellas una serie de chispas originadas por la recomposición de las dos electricidades de los conductores.

612. Máquina de Van-Marum. -Van-Marum construyó una máquina eléctrica, por medio de la cual se obtiene, según se desee, una cualquiera de las dos electricidades. Esta máquina ([fig.436](#) y [437](#)) se compone de una rueda de vidrio P, que gira entre cuatro almohadillas *c* fijas en unas esferas de cobre aisladas sobre pies de vidrio. Delante de la rueda existe un arco de cobre *a*, de dos ramas, sostenido por el pie que lleva el árbol de la rueda, y que puede situarse en la posición vertical ([fig. 436](#)), o en la horizontal ([fig. 437](#)). Por último, en el otro lado de la rueda, hay una gran esfera de cobre A, aislada sobre un pie de vidrio, y con un arco *d*, semejante al primero, y que, como él, puede aceptar la dirección horizontal ([fig. 436](#)), o la vertical ([fig. 437](#)).

Dispuestos los arcos *a* y *d* como en la [fig. 436](#), las dos ramas del último tocan las almohadillas, pero las del primero se acercan mucho a la rueda de vidrio sin tocarla. De consiguiente, si por medio del manubrio M se hace girar la rueda, las almohadillas que se electrizan negativamente, ceden su electricidad al arco *d* y a la esfera A, que se encuentra entonces cargada de electricidad negativa; pues la positiva del platillo P obra por influencia sobre el arco *a*, y atrae del suelo fluido negativo que la neutraliza.

Por el contrario, si las ramas *a* y *d* están dispuestas como en la [figura 437](#), comunicando entonces las almohadillas con el suelo por el arco *a*, pierden toda su electricidad, mientras que la rueda que posee fluido positivo y que obra por influencia sobre el arco *d* y la esfera A, atrae la electricidad negativa de éstos, quedándose en tal caso con la positiva la esfera A.

613. Máquina hidro-eléctrica de Armstrong. -La *máquina hidro-eléctrica* desarrolla electricidad, merced al desprendimiento de vapor acuoso, por pequeños orificios. Inventola el físico inglés M. Armstrong, a consecuencia del descubrimiento de un nuevo hecho observado en 1840, cerca de Newcastle, en la caldera de una máquina de vapor. Habiendo surgido un escape de vapor en la válvula de seguridad, iba el fogonero a coger la palanca de la misma con una mano, teniendo la otra cerca de la columna de vapor de agua, cuando experimentó en el acto mismo una fuerte conmoción, no sin notar una viva chispa entre la palanca y su mano.

Informado de este fenómeno, M. Armstrong lo reprodujo en otras calderas, y reconoció que el vapor desprendido estaba cargado de electricidad positiva. Haciendo experimentos en una locomotora que había aislado, observó que se electrizaba negativamente cuando se sustraía por puntas metálicas, al vapor que se escapaba a la atmósfera, su electricidad positiva, y así obtuvo chispas muy considerables. Entonces fue cuando mandó construir la máquina representada en la [438](#).

Es una caldera de palastro, de hogar interior, aislada sobre cuatro pies de vidrio. Tiene cerca de 1<sup>m</sup>,50 de longitud y 0<sup>m</sup>,60 de diámetro. Un tubo de cristal O, situado verticalmente a la derecha de la caldera, y que comunica con ella por sus dos extremidades, indica el nivel interior del agua. Un pequeño manómetro de aire comprimido, no representado en el dibujo marca la presión. Existe sobre la caldera una llave C, que se abre cuando ha adquirido suficiente tensión el vapor, y encima de la misma se ve un depósito B, en el cual circulan los tubos que dan paso al vapor. Estos tubos terminan por ajustes adicionales A, de forma particular, representados a la izquierda del grabado en mayor escala, por la sección M. El interior de dichos tubos adicionales es de madera dura y contorneada en sentido de la flecha, a fin de que sea mayor

el rozamiento; y por último, la caja B está llena de agua para enfriar los tubos de escape. Antes de llegar el vapor a los tubos adicionales, por la disposición descrita, experimenta un principio de condensación, y sale mezclado con vesículas de agua, que es una condición necesaria, porque, según los experimentos de M. Faraday, *no origina* electricidad alguna el paso del vapor *seco*.

Habíase atribuido primero el desarrollo de electricidad en la máquina hidro-eléctrica a la condensación del vapor; pero M. Faraday, que ha efectuado numerosos experimentos con ella, ha encontrado que el desarrollo de la electricidad depende únicamente del rozamiento de los glóbulos de agua con las paredes de los tubos adicionales de salida. En efecto, permaneciendo invariables las demás condiciones, pero variando los cilindritos de madera que guarnecen el interior de los tubos A, cambia la especie de electricidad, que adquiere la caldera. Si son de marfil, no hay indicio alguno de electricidad, sucediendo otro tanto si se introduce una sustancia grasa en la caldera, pues entonces se inhabilitan las guarniciones que se usan. Con todo, sólo se desprende electricidad en el caso de que sea pura el agua, quedando entonces electrizada negativamente la caldera y positivamente el vapor. Inverso es el efecto si se añade esencia de trementina, es decir, que el vapor adquiere la electricidad negativa y la caldera la positiva. La introducción de una disolución salina o de un ácido hace cesar al instante todo desprendimiento de electricidad. También observó M. Faraday efectos análogos con una corriente de aire húmedo; pero con una de aire seco no se nota ningún efecto.

▽△

## Diversos experimentos con la máquina eléctrica

614. Chispa, banquillo aislador. -Uno de los primeros fenómenos que se observan cuando se experimenta con una máquina eléctrica, es la viva chispa que se saca de los conductores al aproximar la mano. Ya hemos visto (603) que la causa de este fenómeno es la acción por influencia que ejerce el fluido positivo de la máquina sobre el fluido neutro de la mano. Descompuesto éste, la atracción entre el fluido positivo de la máquina y el negativo de la mano acaba por vencer la resistencia del aire, y llegado este momento se recomponen los dos fluidos con ruido y luz, apareciendo entonces la chispa viva, instantánea y en zigzag, como el relámpago que precede al ruido del rayo. Esta chispa va acompañada de un pinchazo bastante intenso, sobre todo en las máquinas que son muy poderosas.

Preséntase la chispa eléctrica bajo un aspecto notable, y que sorprende a los que presencian este experimento por vez primera, cuando se la hace surgir del cuerpo humano. Colócase, al efecto, la persona que se ha de electrizar sobre un taburete de pies de vidrio, denominado *banquillo aislador*, y así aislada, pone una mano sobre uno de los conductores de la máquina eléctrica. Como el cuerpo humano es buen conductor de la electricidad, a medida que se carga la máquina se distribuye el fluido por el cuerpo de la persona aislada, al mismo tiempo que por los conductores, de suerte que, tocando dicha persona con las manos en la cara o en los vestidos, se sacan chispas cual de la propia máquina. Mientras no se acerca la mano a la persona aislada, no experimenta esta conmoción alguna por electrizada que esté; sólo se erizan sus cabellos y se dirigen hacia los cuerpos que se les presentan, notando además como un ligero soplo en las manos y la cara.

Se puede electrizar también a un sujeto aislado sobre el banquillo de pies de vidrio, frotándole con una piel de gato, pues atrae entonces al péndulo eléctrico, y se sacan de él chispas con la mano. Si la persona que frota se ha subido a otro banquillo aislador, se electrizan ambos experimentadores, pero el uno positivamente, y negativamente el otro.

El físico francés Dufay fue el primero que, en 1734, sacó una chispa del cuerpo humano.

615. Campanario eléctrico; aparato para el granizo. -El *campanario eléctrico* es un aparatito compuesto de tres timbres o campanitas, suspendidos de una varilla horizontal que comunica con la máquina eléctrica ([fig. 439](#)). Las campanitas A y B penden de cadenas metálicas que establecen la comunicación con la varilla, mientras que la campanita central cuelga de un hilo de seda que la aísla de la máquina, aunque comunica con el suelo por medio de una cadena metálica. Por fin, entre el timbre del centro y los otros dos, existen dos esferitas de cobre suspendidas de hilos de seda. Ahora bien; electrizándose

positivamente los timbres A y B cuando se carga la máquina, atraen las esferas de cobre, y las repelen luego después del contacto. Encontrándose entonces éstas electrizadas positivamente, se dirigen hacia el timbre C, el cual, aunque en comunicación con el suelo, se halla cargado de electricidad negativa por efecto de la influencia de los otros dos. Inmediatamente después del contacto, son rechazadas las esferas hacia A y B, ejecutando así un movimiento de vaivén rápido, y produciendo choques sucesivos que hacen resonar los tres timbres mientras está cargada la máquina.

Para explicar de qué manera puede adquirir a menudo el granizo un volumen muy considerable antes de caer, ideó Volta un aparato fundado, como el anterior, en las atracciones y repulsiones eléctricas.

Consiste en una campana de vidrio, situada sobre un platillo de cobre en el cual se ponen bolitas de médula de saúco (fig. 440). Pasa a rozamiento suave por el cuello de la campana una varilla de cobre, terminada en su parte inferior por una esfera del mismo metal, y comunicando por la superior con la máquina eléctrica. Luego que ésta se carga, se electriza la esfera del aparato, atrae las bolitas de saúco y en seguida; de suerte que se agitan con gran velocidad, marchando del platillo a la esfera y de la esfera al platillo, y cediendo a este último la electricidad que habían recibido de la primera. Fundándose en este experimento, admitía Volta que, cuando los granos de pedrisco se encuentran entre dos nubes cargadas de electricidades contrarias, van así sucesivamente de la una a la otra, y condensan entonces en su superficie al vapor de agua ambiente, el cual, al congelarse, les hace adquirir el volumen que a veces se observa; pero esta teoría, que no basta para explicar el tamaño de las piedras, no se admite en la actualidad.

616. Molinete eléctrico, insuflación. -Denomínase *molinete eléctrico* un aparatito compuesto de cinco o seis radios metálicos encorvados todos en el mismo sentido, terminados en punta, y fijos en una chapa común, móvil sobre un eje (fig. 441). Colocado en la máquina eléctrica este aparato, luego de cargada aquélla, toman los radios y la chapa un rápido movimiento de rotación en la dirección opuesta a las puntas. Este movimiento no es un efecto de reacción comparable con el del molinete hidráulico (85), conforme han admitido muchos físicos, sino de repulsión entre la electricidad de las puntas y la que comunican al aire. Acumulándose el fluido eléctrico hacia las puntas, se escapa al aire, y como éste se encuentra cargado de igual electricidad que aquéllas, las rechaza al mismo tiempo que es a su vez repelido por ellas. Reconócese, en efecto, que el molinete no se pone en movimiento en el vacío, y si se le acerca la mano mientras gira en el aire, se siente un ligero soplo, originado por el desplazamiento que adquiere el aire electrizado.

Cuando se desprende de esta suerte la electricidad por una punta, es repelido con bastante energía el aire electrizado para ocasionar una corriente, que no sólo es sensible en la mano, sino que sopla y puede hasta apagar la llama de una vela, si es muy poderosa la máquina eléctrica. La fig. 442 indica de qué manera se ejecuta este experimento. Obtiénese también el mismo efecto, colocando la vela sobre uno de los conductores, y presentándole una punta metálica que se tiene en la mano (fig. 443). Proviene la corriente, en este último caso, del fluido contrario que se desprende de la punta por la influencia de la máquina.

▽△

## Capítulo IV

▽△

### Condensación de la electricidad

617. Condensadores; exposición de su teoría. -Se designan con el nombre general de *condensadores* los aparatos que se emplean para acumular, sobre superficies relativamente pequeñas, notables cantidades de electricidad. Aunque se han construido según diferentes sistemas, todos se han fundado en el principio de la electrización por influencia (601), y constan esencialmente de dos cuerpos conductores separados por otro que no lo es. Describiremos primero el *condensador de Aepinus*.

Consta este aparato de dos platillos circulares de cobre A y C, y de una lámina de vidrio B, que los separa (fig. 445). Estos platillos, cada uno de los cuales se halla provisto de un pendulito eléctrico *a* y *b*, están

aislados sobre pies de vidrio que pueden correr por una ranura sobre una lancha de madera que sostiene todo el aparato, a fin de que sea dable acercarlos o alejarlos, cuando así se desee.

Para acumular las dos electricidades sobre los platillos de cobre, se pone en contacto con la lámina de vidrio (fig. 444); y luego, por medio de cadenas metálicas, se hace comunicar uno de los dos, el A, por ejemplo, con la máquina eléctrica, y el otro con el suelo. Electrízase entonces positivamente el disco A, como la máquina, y si estuviese solo, adquiriría, en igualdad de superficie, la misma cantidad de electricidad, salvo la influencia de la forma; pero la presencia del disco C cambia completamente el fenómeno, siendo causa de la acumulación de ambas electricidades. En efecto, obrando por influencia el fluido positivo del disco A, al través del vidrio, sobre el platillo C, atrae al fluido negativo y repele al suelo el positivo. A su vez el fluido negativo del disco C reacciona sobre el positivo del A, pero sólo parcialmente, atendido el intervalo que los separa. La tensión eléctrica en el disco A no equilibra, pues, la tensión de la máquina, resultando de aquí que ésta da al platillo una nueva cantidad de fluido positivo, el cual actúa como la primera vez sobre el disco C, así sucesivamente; de suerte que se acumulan sobre los dos platillos notables cantidades de electricidades contrarias; pero sólo hasta un límite que en breve indicaremos.

Cuando se ha cargado el condensador, si se interrumpen las comunicaciones con el suelo y con la máquina eléctrica, retirando las cadenas metálicas *mn* (fig. 444), se observa que sólo surge divergencia en el péndulo A, mientras que el C permanece vertical. Esta divergencia del primer péndulo se explica por el exceso de electricidad del platillo A. Para darnos cuenta de la permanencia observada en el péndulo C, se admite en general que la electricidad negativa del platillo C se neutraliza completamente, aunque a distancia, por la electricidad positiva del platillo A; lo cual se expresa diciendo, que sobre el platillo C, la electricidad permanece *disimulada*, o en estado *latente*. Sin embargo, no por esto debe entenderse en manera alguna que la electricidad haya perdido en nada absolutamente la menor parte de sus propiedades ordinarias, y sí tan sólo que los efectos de cada uno de los fluidos se encuentran equilibrados, a distancia, por los del fluido contrario.

Consignemos, además, que van quedando en desuso las denominaciones de *electricidad disimulada* y de *electricidad latente*, porque, en efecto, la disimulación de la electricidad es más aparente que real, como puede comprenderse por la teoría que vamos a exponer.

618. Segunda teoría de los condensadores. -Consideremos nuevamente el condensador de Aepinus (fig. 445), y convengamos en denominar, en sus dos platillos, *caras anteriores*, a las que miran hacia la lámina de vidrio B, y *caras posteriores* a las opuestas. Supongamos, además, que desde luego el platillo C se encuentre bastante alejado del A, para que no ejerza sobre éste la menor influencia.

Sentado esto, si ponemos en comunicación el platillo A con la máquina eléctrica, adquiere una carga máxima que se distribuye igualmente sobre sus dos caras, y el péndulo *a* manifiesta una divergencia notable. Suprimiendo la comunicación, nada habrá variado, pero acercando lentamente el platillo C, que en un principio supondremos aislado del suelo, descomponiéndose su fluido neutro por la influencia del platillo A, la electricidad negativa se dirige sobre la cara anterior y la positiva sobre la posterior, y se nota que diverge en efecto el péndulo C. Así, pues, la electricidad negativa del platillo C, actuando a su vez por atracción sobre la electricidad positiva del plato A, el fluido de éste deja de distribuirse igualmente sobre las dos caras, acumulándose en gran parte en la que mira hacia el otro platillo, y se nota efectivamente que principia a descender el péndulo *a*.

Si después de esto, se pone en comunicación con el suelo el platillo C, toda su electricidad se pierde y no retiene más que el fluido negativo; pero al mismo tiempo se origina, sobre este platillo, una nueva descomposición del fluido neutro, la cual procura a la cara anterior una cantidad más notable de fluido negativo; por consiguiente, la electricidad positiva pasa nuevamente de la cara posterior del platillo A sobre la anterior, hecho que indica el péndulo *a*, aumentando su descenso.

De esta suerte, habiéndose casi restituido al estado neutro la cara posterior del platillo A, se concibe que si se pone nuevamente en comunicación con la máquina eléctrica, adquirirá una segunda carga de electricidad positiva que se divide nuevamente en dos partes: una, que se condensa sobre la cara anterior del platillo, y la otra que permanece sobre su cara posterior y que aumenta la divergencia del péndulo *a*. El fluido que se acumula así sobre las dos caras, aumentando progresivamente, es causa de que aquél péndulo llegue a alcanzar la misma divergencia, que cuando en un principio se ha cargado el platillo A,

sin someterlo a la influencia del otro platillo C. Estableciéndose en este momento el equilibrio entre la tensión de la electricidad sobre la cara posterior del platillo y sobre la máquina eléctrica, se alcanza el límite de la carga.

Según esta manera de considerar la teoría de los condensadores, sin necesidad de recurrir a la hipótesis de la electricidad disimulada, se explica perfectamente la condensación eléctrica por la acumulación del fluido sobre la cara anterior del platillo colector, acumulación que permite que se dirija una nueva carga eléctrica sobre su cara posterior.

619. Límite de la carga en los condensadores. -La cantidad de electricidad que puede acumularse sobre cada una de las caras del condensador, es en igualdad de circunstancias proporcional a la tensión del manantial y a la superficie de los platillos, si bien disminuye cuando aumenta el espesor de la lámina aisladora. Podemos, pues, manifestar, que constantemente dos causas limitan la cantidad de electricidad que puede acumularse sobre las caras de los platillos: la primera es que creciendo gradualmente, según hemos visto antes, la cantidad de electricidad libre sobre el platillo colector, la tensión sobre éste acaba necesariamente por ser igual a la tensión de la máquina, y a contar desde este momento, nada puede ceder ésta al condensador.

La segunda causa es la resistencia limitada que presenta a la recombinación de las dos electricidades la lámina aisladora situada entre los dos platillos; en efecto, cuando la tensión de los dos fluidos para combinarse es superior a la resistencia de dicha lámina, se agujerea y se retienen los fluidos contrarios.

620. Cálculo de la fuerza condensadora. -Se denomina *fuerza condensadora* la relación entre la carga total que adquiere el platillo colector cuando sobre el mismo ejerce influencia el otro platillo, con la que adquiriría si se encontrase solo; o bien, la relación entre la cantidad total de electricidad del platillo colector y la que en él se encuentra libre porque se admite que la electricidad que permanece libre sobre el platillo colector, es precisamente la que adquiere cuando se encuentra solo.

Sentado esto, para calcular la fuerza condensadora, sea P la cantidad total de electricidad positiva sobre el platillo colector, N la cantidad total de electricidad negativa sobre el segundo platillo, y a la electricidad libre sobre el primero,

$$\text{tendremos, pues, } N=mP \text{ [4],}$$

siendo  $m$  una fracción cuyo valor se aproxima tanto más a la unidad, cuanto más delgada sea la lámina aisladora entre los dos platillos. Pero si se toca el platillo colector, se le sustrae su electricidad libre  $a$ , y por consiguiente varían las funciones, siendo en este caso el segundo platillo aquél cuya carga será mayor, pero según una relación que continuará siendo igual a  $m$ , si es la misma la lámina aisladora; es decir, que tendremos

$$P-a=mN \text{ [2], o } P-a=m^2P \text{ [3],}$$

reemplazando N por su valor que nos procura la igualdad [1]. De la ecuación [3] se deduce

$$P/a=1/1-m^2,$$

relación que no viene a ser otra cosa que la fuerza condensadora que se buscaba. Respecto al valor de  $m$  se determina por la experiencia por medio del plano de prueba y de la balanza de torsión.

621. Descarga lenta y descarga instantánea. -Cuando está cargado el condensador; es decir, cuando se hallan acumuladas en las dos caras las electricidades contrarias, se interrumpen las comunicaciones con la máquina eléctrica y con el suelo, quitando las dos cadenas metálicas, y en vista de lo que hemos dicho más arriba, sólo una parte de la electricidad del platillo A se halla entonces disimulada, mientras que lo está por completo la del C. En efecto, el péndulo A es el único que diverge (fig. 444), encontrándose vertical el C; pero si se alejan los platillos (fig. 445), divergen en tal caso ambos péndulos, porque no se disimulan ya las dos electricidades.

Estando en contacto los platillos con la lámina aisladora ([fig. 444](#)), y separadas las cadenas, se puede descargar el condensador, esto es, volverlo al estado neutro, según dos métodos, a saber: por medio de una descarga lenta, o bien de una instantánea. Para descargarlo lentamente, se toca primero con el dedo el platillo A, o sea el que contiene un exceso de electricidad; todo el fluido positivo no retenido por el negativo del disco C se marcha al suelo, y como el disco C sólo neutraliza una cantidad de electricidad menor que la suya, él es quien, después del contacto, posee la carga más considerable; y por lo mismo se ve que desciende el péndulo A divergiendo el C. Si actualmente se toca el disco C, vuelve a caer su péndulo, mientras que diverge de nuevo el A, y así sucesivamente, si se siguen tocando de un modo alternativo los dos discos. La descarga se efectúa de esta suerte con muchísima lentitud, y si el aire está seco, no es completa hasta después de algunas horas. Si se tocara primero el platillo C, que es el menos electrizado, no se le quitaría electricidad, pues toda la que posee está neutralizada por el disco A.

Cuando se desea descargar instantáneamente el condensador, se hacen comunicar los dos platillos por medio del *excitador*, denominándose así un sistema de dos arcos de latón, terminados por esferas del mismo metal y reunidos por una charnela. Cuando estos arcos poseen mangos aisladores de vidrio ([fig. 446](#)), se designa el aparato con el nombre de *excitador de mangos de vidrio*; y si le faltan los mangos ([figura 449](#)), se denomina *excitador simple*. Para hacer uso del excitador, se aplica una de sus esferas sobre uno de los platillos del condensador, y se aproxima la otra al segundo platillo, observándose entonces que surge inmediatamente una fuerte chispa, que proviene de la recomposición de las electricidades contrarias acumuladas en las dos caras del condensador. Con todo, no es completa la recomposición, porque pueden aún sacarse una segunda, una tercera y aun mayor número de chispas, si bien cada vez más y más débiles. Dedúcese de aquí que, cuando comunican entre sí los dos platillos, no pueden reunirse en totalidad las dos electricidades. Pronto veremos (624) que este fenómeno depende de que los dos fluidos acumulados, en virtud de una acción de influencia, se adhieren a las caras de la lámina de vidrio que los separa, atendida su acción recíproca. Cuando se descarga el condensador con el excitador, aunque sea el simple, cogido con la mano, no se experimenta conmoción alguna, porque el fluido eléctrico elige siempre de dos conductores el mejor, y por lo tanto, se opera la recomposición de las dos electricidades por el arco metálico y no por el cuerpo del experimentador. Pero si tocando con una mano una de las caras del condensador, se acerca la otra a la segunda cara, se opera la recomposición por los brazos y el cuerpo, experimentándose una conmoción tanto más viva, cuanto mayor es la superficie del condensador y más fuerte la carga eléctrica.

622. Cuadro fulminante. -El *cuadro fulminante* es un condensador más sencillo que el de Aepinus, y más propio para producir vivas chispas y fuertes conmociones. Consta de una lámina de vidrio rodeada por un marco de madera; en sus dos caras están pegadas dos hojas de estaño, enfrente una de otra, dejando entre sus bordes y el marco un intervalo de unos seis centímetros. No comunican entre sí las dos hojas de estaño, pero sí una de ellas con el marco por medio de una tira de estaño que se repliega en A ([fig. 447](#)), de modo que toque el pulgar de la persona que tiene en la mano el aparato. Para cargar el cuadro fulminante, se presenta a la máquina eléctrica la hoja de estaño aislada, es decir, la que no comunica con el marco de madera, y como la otra está en comunicación con el suelo por la mano, se comportan absolutamente las dos como los platillos del condensador de Aepinus, acumulándose en ambas grandes cantidades de electricidades contrarias.

Descárgase este aparato, como el condensador (621), con el excitador simple; pues teniendo aquél con la mano, se aplica una de las esferas de éste en la extremidad A de la tira de estaño que pertenece a la hoja inferior, y luego, encorvando el excitador, se acerca la otra esfera a la hoja superior. Salta entonces con detonación una viva chispa, que es el resultado de la recomposición de las dos electricidades, pero sin que el experimentador sienta la menor conmoción, porque se opera la recomposición por completo en el arco metálico. Si, al contrario, teniendo siempre el aparato del mismo modo, se toca primero la hoja aislada, se recibe una conmoción muy fuerte, pues se efectúa la recomposición por los brazos y por el cuerpo.

623. Botella de Leyden. -La *botella de Leyden*, así llamada en recuerdo del nombre de la ciudad en que fue inventada, debe su origen al holandés Musschenbroeck (aunque no falta quien pretende que fue el inventor su discípulo Cuneus), quien la descubrió por casualidad en 1746. Habiendo fijado una varilla metálica en el tapón de una botella llena de agua, la presentó a la máquina eléctrica con la idea de electrizar el líquido. La mano que sostenía la botella hacía veces de uno de los platillos del condensador, mientras que el agua interior representaba el otro; y de consiguiente se acumuló fluido positivo en la pared interior, y negativo en la porción de la exterior en contacto con la mano. En efecto, habiendo acercado una mano a la varilla metálica, mientras que con la otra continuaba teniendo cogida la botella,

sintió Musschenbroeck en los brazos y en el pecho una conmoción tan fuerte, que poco después escribía a Réaumur, que no repetiría el experimento aun cuando le regalaran todo el reino de Francia.

Entre tanto, conocido el experimento, se apresuraron a repetirlo en todas partes los físicos; y el abate Nollet, profesor de física en París, fue el primero que reemplazó el agua de la botella por pedazos de papel de estaño, de cobre, de plata o de oro. Ya un físico inglés había observado que, cubriendo el exterior de la botella con una lámina de estaño, eran mucho más vivas las conmociones. La botella de Leyden fue tomando poco a poco la forma que hoy se le da; pero aún se ignoraba su teoría, hasta que Franklin la expuso, haciendo ver que la botella, lo mismo que el aparato anterior, era un verdadero condensador.

Representada la botella en la [fig. 448](#), en el momento de cargarla, se compone de un frasco de vidrio delgado, cuyas dimensiones varían según la cantidad de fluido que se desea acumular. Su interior está lleno completamente de hojas de cobre o de panes de oro. En la pared exterior se halla pegada una lámina de estaño B que cubre también el fondo, pero que debe dejará descubierto el vidrio hasta una distancia bastante grande del, cuello. Adáptase a la boca un tapón de corcho, por el cual pasa, a frotamiento duro, una varilla de cobre encorvada en forma de gancho y terminada por un botón A; en el interior comunica esta varilla con las hojas de oro o de cobre que llenan la botella, y que se designan con el nombre de *armadura interior*, en contraposición con el de *armadura exterior* que recibe la lámina de estaño B.

Cárgase la botella de Leyden, como el condensador de Aepinus y el cuadro fulminante, haciendo comunicar una de las armaduras con el suelo y la otra con un manantial eléctrico; para lo cual se la coge con la mano por la armadura exterior, y se presenta la interior a la máquina eléctrica, pues se acumula entonces el fluido positivo en los panes de oro, y el negativo en el estaño. Lo contrario sucedería si, teniendo la botella por el ancho, se presentase la armadura exterior a la máquina. Por lo demás, la teoría de la botella de Leyden es exactamente la misma que la del condensador; y así, todo cuanto se ha dicho de éste (617), se aplica a la botella, sustituyendo sus dos armaduras los platillos A y C de la [fig. 444](#).

Se descarga lenta o instantáneamente de la misma manera que el condensador. Para descargarla instantáneamente, se la coge con la mano ([fig. 449](#)), y se ponen en comunicación las dos armaduras por medio del excitador simple, cuidando de tocar *primero* la armadura que se coge con la mano, pues de lo contrario se recibe la conmoción. Para descargarla lentamente, se la aísla sobre una torta resinosa, y se toca alternativamente con la mano o con una varilla metálica la armadura interior, luego la exterior, y así sucesivamente, sacando en cada contacto una chispita.

Para que sea más sensible la descarga lenta, se dispone el aparato ([fig. 450](#)) de modo que lleve la varilla un pequeño timbre, y cerca de la botella existe otra varilla metálica con un segundo timbre semejante al primero, y con un péndulo eléctrico formado por una esfera de cobre suspendida de un hilo de seda. Como no está fija la botella en la tablita *m*, se la coge con la mano por la armadura exterior, se carga en la máquina eléctrica, y se la coloca de nuevo sobre la tablita. En este caso como contiene la armadura interior un exceso de electricidad positiva no neutralizada, es atraído el péndulo y va a chocar contra el timbre de la botella: repelido al instante, va a dar contra el segundo timbre y le cede su electricidad; pero vuelto al estado neutro, es atraído de nuevo por el timbre primero, y así sucesivamente durante muchas horas, si el aire está seco y es algo grande la botella.

624. Botella de armaduras movibles. -La *botella de armaduras movibles* sirve para demostrar que en la botella de Leyden, y en todos los condensadores en general, no residen tan sólo en las armaduras las dos electricidades disimuladas, sino principalmente en la cara del vidrio que las separa. Esta botella cuyas diferentes piezas pueden separarse, se compone de una gran vasija cónica de vidrio B ([fig. 451](#)), de una armadura exterior C de hoja de lata, y de otra interior D de la misma materia. Estas piezas, introducidas unas en otras, tal como se ve en la figura A, constituyen una botella de Leyden completa. Después de haberla electrizado, como la botella ordinaria, y aislado sobre una torta resinosa ([fig. A](#)), se quita con la mano la armadura interior, luego el vaso de vidrio, y por fin la armadura exterior. Es evidente que recobran así el estado natural las dos armaduras; sin embargo, si volviendo a poner la armadura C sobre la resina, se coloca dentro el vaso de vidrio y en éste la armadura D, se reconstituye una botella de Leyden que da una chispa casi tan grande como si no se hubiesen descargado las dos armaduras. Para darnos cuenta de este fenómeno se admite ordinariamente que las dos electricidades, obedeciendo a su atracción recíproca, abandonan las armaduras para dirigirse sobre las dos caras del vidrio, desde las cuales vuelven a pasar en seguida sobre dichas armaduras, en el momento en el cual se ponen en comunicación; pero en

vista de lo que hemos expuesto al ocuparnos de la descarga de los condensadores (621), el fenómeno debe explicarse mejor por la electrización por la influencia que adquieren las paredes interior y exterior del vidrio en presencia de las armaduras, en virtud de cuya electrización dichas paredes actúan a su vez sobre las armaduras para electrizarlas de nuevo al instante que se reponen en su lugar.

625. Bocales y baterías eléctricas Un *bocal* es una gran botella de Leyden, de cuello bastante ancho para que pueda pegarse en su pared interna una hoja de estaño que sirve de armadura interior. La varilla que atraviesa al tapón es recta, y termina inferiormente por una cadena metálica que la pone en comunicación con la hoja de estaño que constituye la armadura interior.

Una *batería* es una reunión de muchos bocales colocados en una caja de madera (fig. 452), y que comunican entre sí por medio de varillas metálicas, y exteriormente por una hoja de estaño que tapiza el fondo de la caja y se encuentra en contacto con las armaduras exteriores de los bocales. Esta misma hoja de estaño se prolonga lateralmente hasta encontrar las dos asas metálicas de la caja. Cárgase la batería (fig. 452), haciendo comunicar las armaduras interiores con la máquina eléctrica y las exteriores con el suelo por la madera misma de la caja y de la mesa en que descansa la batería, o mejor, por una cadena metálica fija a una de las asas de la caja. Un electrómetro de cuadrante, unido a uno de los bocales, sirve para indicar la carga de la batería. A pesar de la gran cantidad de electricidad acumulada en el aparato, diverge con mucha lentitud y sólo un corto número de grados el electrómetro, lo cual no debe sorprender, porque depende la divergencia de la diferencia de tensión entre las dos armaduras. Por punto general, suele haber cuatro, seis u ocho bocales; pero cuantos más existen, mayor tiempo se tarda en cargarlos, si bien son más poderosos sus efectos.

Cuando se quiere descargar una batería, se hacen comunicar entre sí las dos armaduras por medio del excitador, cuidando de tocar primero la armadura externa. Debe recurrirse al excitador con mangos de vidrio, y tomar todas las debidas precauciones para evitar la conmoción porque una fuerte batería puede ocasionar graves accidentes y hasta la muerte.

Si se desea hacer pasar la chispa por un animal o por cualquiera objeto, se hace uso del *excitador universal* dibujado en primer término en la fig. 453. Consiste en una cajita de madera con dos columnas de vidrio, en las cuales se fijan, por medio de charnelas, unas varillas de cobre. Entre estas columnas se ve un sostén de madera que lleva un platillo para colocar el objeto o el animal que va a servir para el experimento. Dirigidas hacia este objeto las varillas de cobre, se hace comunicar una de ellas con la armadura exterior de la batería, y la otra con una de las esferas del excitador de mangos de vidrio. Aproximando entonces la otra esfera de éste a la armadura interior, salta una chispa entre las dos, y otra entre las ramas del excitador universal, siendo esta última la que hiera al objeto o animal colocado en el platillo.

626. Electrómetro condensador de Volta. -El *electrómetro condensador*, inventado por Volta, no es más que el electrómetro de panes de oro descrito ya (605), y hecho más sensible por la adición de dos discos condensadores. La varilla de latón que lleva los panes de oro no termina superiormente en una esfera de latón, sino en un disco del mismo metal, cubierto por una lámina de tafetán engomado A (fig. 454), algo mayor que el disco, y que sirve para aislarle de un segundo B semejante, pero con mango de vidrio, que se aplica encima, cubriéndose de barniz los dos para aislarlos.

Para hacer sensible por medio de este electrómetro cantidades muy remisas de electricidad, se hace comunicar el cuerpo electrizado con uno de los platillos, llamado por esto *platillo colector*, y el otro comunica con el suelo, tocándolo con el dedo ligeramente mojado (fig. 455). Difundiéndose entonces la electricidad del cuerpo por el platillo colector, obra, al través del tafetán, sobre el segundo platillo y la mano, para rechazar al suelo la electricidad del mismo nombre y atraer la contraria. Se acumulan, pues, los dos fluidos de ambos platillos, absolutamente como en el condensador de Aepinus (617), pero sin que haya divergencia en los panes de oro, pues se hallan disimuladas las dos electricidades. Cargado así el aparato, se retira primero el dedo, luego el manantial eléctrico, sin que se observe aún divergencia alguna; pero al quitar el platillo superior (fig. 454), cesa la neutralización, y distribuyéndose la electricidad del segundo platillo por igual en la varilla y en los panes de oro, divergen éstos considerablemente.

Auméntase la divergencia, adaptando al pie del aparato dos varillas de cobre terminadas por esferas del mismo metal, porque al electrizarse éstas por la influencia de los panes de oro, reaccionan sobre sí.

## Diversos efectos de la electricidad estática

627. Efectos fisiológicos. -Los efectos de la electricidad estática se dividen en fisiológicos, luminosos, caloríficos, mecánicos y químicos.

*Los efectos fisiológicos* son aquéllos que produce la electricidad en los seres vivos, o en los que acaban de perder la existencia. Consisten, en los primeros, en una violenta excitación que ejerce el fluido eléctrico sobre la sensibilidad y la contractilidad de los tejidos orgánicos que atraviesa; y en los últimos, en contracciones musculares bruscas que simulan el retorno a la vida. En la actualidad, solo hablaremos de las acciones fisiológicas que ejerce la electricidad estática cuando es grande su tensión, dejando para más tarde las de la electricidad dinámica.

Conocemos ya la conmoción que produce la chispa de la máquina eléctrica (614). Esta conmoción aumenta en mucho su intensidad y adquiere un carácter particular cuando se saca la chispa de la botella de Leyden, tocando con una mano su armadura exterior, y con la otra la interior. Con una botella pequeña llega la sensación hasta el codo, y con una de un litro hasta el hombro y se extiende al pecho con botellas mayores.

La botella puede causar simultáneamente la conmoción eléctrica a muchas personas, bastando para esto que *formen cadena*, esto es, que se den la mano de un modo continuo; y luego, tocando la primera la armadura exterior de una botella cargada de antemano, y la última en seguida el botón de la armadura interior, reciben todas a un tiempo la conmoción, que puede graduarse a voluntad, cargando más o menos la botella. El abate Nollet produjo así la conmoción en todo un regimiento, y mil quinientos hombres la sintieron simultáneamente con violencia en los brazos y en el pecho. En este experimento se ha notado que las personas que están hacia el centro de la cadena experimentan una conmoción menos viva que las que se encuentran próximas a la botella.

Con las grandes botellas y las baterías no se recibe impunemente la conmoción, pues Priestley mató ratas con baterías cuyas armaduras tenían cada una la superficie total de sesenta y tres decímetros cuadrados, y gatos con otras de tres y medio metros cuadrados.

628. Efectos luminosos. -La recomposición de las dos electricidades a gran tensión se efectúa siempre con un desprendimiento más o menos intenso de luz; hecho que acontece cuando se sacan chispas de la máquina eléctrica, de la botella de Leyden y de las baterías. El brillo de la luz eléctrica es tanto más vivo, cuanto mejores conductores son los cuerpos entre los cuales se verifica la explosión; y su color varía, no sólo con la naturaleza de estos cuerpos, sino también con la atmósfera ambiente y la presión.

La chispa que estalla entre dos pedazos de carbón es amarilla; verde entre dos esferas de cobre plateadas; y carmesí si son de madera o de marfil. En el aire, a la presión ordinaria, es blanca y brillante la luz eléctrica; rojiza en un aire enrarecido, y violácea en el vacío, lo cual proviene de que, cuanto más débil es la resistencia que se opone a la recomposición de las dos electricidades, tanto menor es la tensión que adquiere la electricidad. En el oxígeno es blanca la chispa, lo mismo que en el aire, rojiza en el hidrógeno, verde en el vapor de mercurio, verde en el ácido carbónico, y en el nitrógeno es azul o púrpura acompañándola además un ruido particular. Crece, en general, el brillo de la chispa con la tensión. Habiendo evidenciado M. Fusinieri que en la explosión de la chispa eléctrica existe siempre transporte de chispas materiales sumamente tenues, es de suponer que las modificaciones de la luz eléctrica dependan de la materia ponderable transportada.

Estúdiense los efectos de la presión del aire sobre el brillo de la luz eléctrica por medio del *huevo eléctrico*, o sea de un globo de vidrio sostenido por un pie de latón, en el cual existen dos varillas del mismo metal terminadas según unas esferas ([fig. 456](#)). La varilla inferior está fija, pero la superior corre frotando en una caja de cuero con objeto de acercarla o alejarla cuando así se desee. Hecho el vacío en el globo por medio de la máquina neumática, en la cual se puede atornillar, se pone en comunicación el vástago superior con una enérgica máquina eléctrica y el pie con el suelo. Cargando entonces la máquina,

se observa de una a otra esfera una luz violácea, poco intensa y continua, que resulta de la recomposición del fluido positivo de la esfera superior con el negativo de la inferior. Si se deja entrar poco a poco el aire por medio de una llave adaptada al pie del aparato, aumenta la tensión con la resistencia, y la luz, que se vuelve blanca y brillante, no aparece ya más que en la forma de la chispa ordinaria.

629. Tubo, cuadro y botella centelleantes. -El tubo *centelleante* consta de un tubo de vidrio, de un metro de longitud próximamente, que posee pegadas una serie de hojuelas de estaño, cortadas en forma de rombo y dispuestas en hélice según la longitud del tubo, de manera que sólo queden entre ellas soluciones de continuidad muy exiguas. En sus extremidades existen dos casquillos de latón con gancho, que comunican con los dos extremos de la hélice. Si, teniendo cogido el tubo por una extremidad, se presenta la otra a la máquina eléctrica ([fig. 457](#)), saltan simultáneamente chispas en cada solución de continuidad, produciendo una brillante línea luminosa, sobre todo en la oscuridad.

El *cuadro mágico*, fundado en el mismo principio que el tubo centelleante, se compone de una lámina de vidrio común sobre el cual se ha pegado una tira muy estrecha de estaño, que se repliega muchas veces paralelamente a sí misma, según indica la línea negra de la [figura 458](#). Se practican en esta tira de estaño, con un instrumento cortante, varias soluciones de continuidad muy pequeñas, dispuestas de modo que representen un objeto determinado, por ejemplo, un pórtico, una flor, etc., luego, fijando el cuadro entre dos columnas de vidrio, se pone la extremidad superior de la tira de estaño en comunicación con la máquina eléctrica, y la otra con el suelo. Haciendo girar entonces el platillo de la máquina, salta la chispa en cada solución de continuidad, y reproduce con trazos de fuego el objeto figurado en el vidrio.

La *botella centelleante* es una botella de Leyden cuya armadura exterior se compone de una capa de barniz sobre la cual se ha depositado un polvo metálico. Una tira de estaño, pegada en el borde inferior de la botella, se halla en comunicación con el suelo por medio de una cadena de metal ([fig. 459](#)), y otra tira colocada más arriba lleva un apéndice que se extiende hasta unos dos centímetros del gancho, que es muy curvo. Suspendida de la máquina eléctrica esta botella, según se ve en el dibujo, a medida que va cargándose, surge la chispa entre el gancho y la armadura, observándose en todo el contorno del aparato largas y brillantes chispas.

630. Efectos caloríficos. -No sólo es luminosa la chispa eléctrica, sino que además es un manantial muy intenso de calor. Inflama los líquidos combustibles, como el alcohol y el éter; cuando los atraviesa; actúa del mismo modo sobre la pólvora, la resina pulverizada, y hasta funde los metales; más para esto se requiere una batería muy enérgica. Una botella de Leyden ordinaria hasta para inflamar el alcohol o el éter, por medio del aparatito de la [figura 460](#). Es un pequeño frasco de vidrio, con el fondo atravesado por una varilla de cobre con botón, fija en un pie del mismo metal. Vertido el líquido en el frasco, de modo que el botón esté enteramente cubierto, se presenta a éste el gancho de una botella de Leyden cargada, cuidando de que comunique el pie de cobre con la armadura exterior por medio de un alambre. Desempeñando éste y el pie del vaso el oficio de excitador, surge la chispa al través del líquido y lo inflama. Con el éter sale perfectamente el experimento; mas, para que suceda otro tanto con el alcohol, es preciso, aunque débilmente, calentarlo antes.

Cuando se hace pasar la descarga de una batería al través de un alambre de hierro o de acero, se vuelve rojo blanco, y arde con una luz deslumbradora. Los alambres de platino, de oro y de plata, se funden y volatilizan. Van-Marum, con una fuerte máquina de dos platillos y con una poderosa batería, fundió un alambre de hierro de 16 metros de longitud.

Si se somete a la descarga de una batería un pan de oro, aislado entre dos láminas de vidrio o entre dos cintas de seda, se volatiliza el oro, dando por residuo un polvo violáceo, que no es más que oro sumamente dividido. Así se obtienen los *retratos eléctricos*.

631. Efectos mecánicos. -Los efectos mecánicos consisten en desgarramientos, roturas y expansiones violentas, que origina en los cuerpos poco conductores el paso de una descarga eléctrica. Perfóranse los vidrios, rómpense las maderas y las piedras, y se agitan con fuerza los gases y los líquidos. Demuéstranse los efectos mecánicos de la chispa eléctrica por medio de diferentes aparatos, que son: el *taladra-cristal*, el *taladra-cartas*, el *termómetro de Kinnersley* y el *excitador universal*.

El taladra-cristal ([fig. 461](#)) se compone de dos columnas de vidrio que sostienen por medio de un eje horizontal, un conductor B terminado en punta. La lámina de vidrio A que se va a agujerear se apoya

sobre un cilindro aislador de vidrio en el cual hay un segundo conductor terminado también en punta. Puesto éste en comunicación por un alambre, con la armadura exterior de una gran botella de Leyden, se acerca el gancho de ésta al botón en que remata el conductor B. Surge entonces la chispa entre los dos conductores, y queda perforado el vidrio. Con todo, no sale bien este experimento con una botella de Leyden de poca magnitud, como no sea bastante delgada la lámina de vidrio. El mismo aparato sirve perfectamente para horadar los naipes o cartas.

La conmoción y la expansión súbita que origina la chispa en los gases se demuestran por medio del termómetro de Kinnersley. Consta este aparato de un gran tubo de vidrio masticado, por sus dos extremos, en casquillos de cobre que le cierran herméticamente y sostienen dos conductores terminados en esfera, fijo el uno y móvil el otro cuando así se quiera en una caja de cuero (fig. 462). De la base del aparato parte un segundo tubo lateral, abierto por su parte superior. Destornillada la caja de cuero se vierte agua en el tubo grande hasta que se encuentre el nivel algo más debajo que la esfera inferior; y atornillando entonces la caja, de cuero, se hace pasar la descarga de una botella de Leyden entre las dos esferas, procediendo según lo indica el grabado. El agua repelida instantáneamente fuera del tubo grande, sube como cosa de unos dos centímetros en el pequeño; pero al instante se restablece el nivel, lo cual demuestra que no depende el fenómeno de una elevación de temperatura, y que, por lo mismo, es errónea la denominación de termómetro que se ha dado al aparato.

El excitador universal, descrito ya al hablar de las baterías (fig. 453), sirve también para obtener efectos mecánicos. Si se desea, por ejemplo, romper un pedazo de madera, se le coloca en el platillo en que está figurado un pajarillo, haciéndole tocar las dos esferas de los conductores. Al pasar la descarga salta hecho astillas.

632. Efectos químicos. -Los efectos químicos de la electricidad consisten en combinaciones y descomposiciones que determina la chispa eléctrica cuando cruza los cuerpos. Por ejemplo, cuando se mezclan dos gases en las proporciones que con corta diferencia se requieren para su combinación, basta una sola chispa para determinarla; pero si la mezcla es diferente, exige la combinación una larga serie de chispas. Priestley fue el primero en reconocer que, cuando se hace pasar durante largo tiempo chispas eléctricas al través de una cantidad determinada de aire atmosférico, disminuye el volumen de aire, y se enrojece la tintura de tornasol introducida en el frasco que lo contiene. Habiendo repetido con cuidado Cavendish este experimento, encontró que se formaba, en presencia del agua o de las bases, ácido nítrico resultante de la combinación del oxígeno y del nitrógeno del aire.

Muchos gases se descomponen por la acción sucesiva de la chispa eléctrica. El hidrógeno carbonado, el ácido sulfhídrico y el amoníaco se descomponen completamente, y sólo en parte el ácido carbónico, en oxígeno y en óxido de carbono. La chispa de las máquinas llega a descomponer los óxidos, el agua y las sales, si bien la electricidad estática dista mucho de ofrecer efectos químicos tan enérgicos y tan variados como la dinámica.

633. Pistoleta de Volta. -El *pistoleta de Volta* es un aparatito que sirve para demostrar los efectos químicos de la chispa eléctrica. Se compone de una vasija de hoja de lata (fig. 463), en la cual se introduce una mezcla detonante formada de dos volúmenes de hidrógeno y uno de oxígeno, cerrándola en seguida herméticamente con un tapón de corcho. En la pared lateral existe un tubo por el cual pasa una varilla metálica terminada por dos esferitas A y B, y masticada en un tubo de vidrio que la aísla del resto del instrumento.

Cogido éste con la mano (fig. 464), se le acerca a la máquina eléctrica. Electrízándose entonces negativamente por influencia el botón A, y positivamente el B, surge la chispa entre el botón A y la máquina, y en el mismo instante salta otra entre B y la pared del vaso que comunica con el suelo por medio de la mano. Esta última es la que determina la combinación de los dos gases, combinación que va acompañada de un vivo desprendimiento de calor (402), y por eso el vapor de agua que resulta adquiere una fuerza expansiva tal, que despidе el tapón con una detonación análoga a la de un pistoletazo.

631. Eudiómetro. -Los *eudiómetros* que se utilizan en la química para el análisis de los gases, son también aparatos fundados en los efectos químicos de la electricidad.

Se han introducido muchas modificaciones con este aparato; pero el más sencillo es el de la fig. 465. Se compone de una probeta de cristal de paredes muy gruesas. Atraviesa la extremidad cerrada una varilla de

hierro o de latón, terminada por dos esferas  $m$  y  $n$ , exterior una, e interior la otra. Cerca de la interior  $n$  existe otra  $a$ , en la cual se encuentra fijo un alambre de hierro o de latón, contorneado en hélice y prolongado hasta la extremidad abierta del eudiómetro.

Para hacer con este instrumento el análisis de un gas, del aire, por ejemplo, se llena primero de agua, se invierte luego en este estado en una cuba del mismo líquido, y se hacen pasar a él, por medio de un embudo, 100 partes de aire y 100 de hidrógeno, que se miden con un tubo graduado. Ciérrase en seguida el eudiómetro con el pulgar, según indica la figura, cuidando de ponerlo en comunicación con el alambre en hélice que existe en el interior del eudiómetro. Si otra persona acerca entonces el platillo de un electróforo (606) a la esfera  $m$ , surge una chispa entre ésta y el platillo A, y al mismo tiempo otra entre las dos esferas  $n$  y  $a$ . Esta última es la que determina con viva luz la combinación del oxígeno y del hidrógeno del eudiómetro para formar el agua. Midiendo entonces el gas que queda en el instrumento después de haberle hecho pasar a un tubo graduado, se encuentra sensiblemente que su volumen es 137; han desaparecido, pues, 63 partes de la mezcla; y como se sabe que el agua se compone de 2 volúmenes de hidrógeno y 1 de oxígeno, síguese que el tercio de 63, o sea 21, es el volumen de oxígeno contenido en 100 partes de aire.

△

## Libro décimo

Electricidad dinámica

▽△

### Capítulo primero

▽△

#### Pila voltaica; sus modificaciones

635. Experimento y teoría de Galvani. -A Galvani, profesor de anatomía en Bolonia, somos deudores del experimento fundamental que fue causa del descubrimiento de la electricidad dinámica (585), o del *galvanismo*, nuevo ramo de la física, en extremo notable por las numerosas aplicaciones que ha recibido desde medio siglo a esta parte.

Hacía ya muchos años que Galvani estudiaba la influencia de la electricidad sobre la irritabilidad nerviosa de los animales, y particularmente de la rana, cuando tuvo ocasión, en 1786, de observar que estando los nervios lumbares de una rana muerta en comunicación, por un circuito metálico, con los músculos crurales, se contraían éstos con gran energía.

Para repetir el experimento de Galvani, se desuella una rana viva cortándola por la parte inferior de los miembros anteriores ([fig. 466](#)), y puestos a descubierto los nervios lumbares situados en ambos lados de la columna vertebral, bajo la forma de filamentos blancos, se toma un conductor metálico formado de dos arcos, uno de zinc y otro de cobre, e introduciendo uno de ellos entre los nervios y la columna vertebral, se hace que toque el otro los músculos de uno de los muslos o de las piernas. A cada contacto se repliegan y se agitan los músculos, y al parecer recobra la vida para saltar, la parte de la rana con la cual se efectúa el experimento.

Galvani, que había observado ya, desde 1780, que la electricidad de las máquinas eléctricas producía en las ranas muertas conmociones análogas, atribuyó el fenómeno que acabamos de describir a la existencia de una electricidad inherente al animal, y considerando el músculo como una botella de Leyden, y al nervio como un simple conductor, admitió que, en el de la contracción, el fluido positivo circulaba desde el nervio al músculo al través del circuito metálico, y desde el músculo al nervio en el cuerpo de la rana.

Muchas personas de autoridad, y sobre todo los fisiólogos, adoptaron la teoría de Galvani con el nombre de *electricidad animal* o de *fluido galvánico*. No por eso dejó de encontrar oposición; y quien con más viveza se la hizo fue Volta, profesor de física en Pavía, conocido ya por la invención del electróforo, del electrómetro condensador y del eudiómetro.

636. Experimento de Volta. -Galvani había fijado exclusivamente su atención en los nervios y en los músculos de la rana; y Volta estudió con sumo cuidado los metales que establecen la comunicación. Fundándose en la observación que no se había ocultado a Galvani, de que la contracción muscular es mucho más enérgica cuando el arco se compone de dos metales que cuando de uno solo, atribuyó Volta a los metales el papel activo en el fenómeno de la contracción. Admitió que por el simple efecto de su contacto se desarrollaba la electricidad, y que las partes animales se limitaban al papel de simples conductores, siendo al mismo tiempo un electrómetro muy sensible.

En efecto, por medio del electrómetro condensador que acababa de inventar, demostró al parecer Volta, con numerosos experimentos, el desarrollo de electricidad por el contacto de los metales. Citaremos el siguiente, que fácilmente puede repetirse: se aplica el dedo mojado sobre el platillo superior del electrómetro condensador (626); luego se toca el inferior con una lámina de zinc bien limpia que se coge con la mano; interrumpiendo en seguida las comunicaciones, y, quitando el platillo superior ([fig. 454](#)), divergen los panes de oro, comprobándose que están electrizadas negativamente, lo cual conduce a admitir que, por su contacto con el zinc, se cargó de electricidad positiva este metal, y de negativa el cobre. Por lo demás, en este experimento no puede atribuirse la electricidad al roce ni a la presión, porque si volviendo las láminas *c*, *z*, se toca el platillo del condensador, que es de cobre, con la lámina de zinc, teniendo en la mano la lámina de cobre *c* que se encuentra soldada, no se obtiene indicio alguno de electricidad.

Empeñose entonces una memorable discusión entre Volta y Galvani. Este último, que sostenía con profunda convicción su teoría de la electricidad animal, evidenció que no era indispensable la presencia de dos metales para la producción del fenómeno, y que se obtienen contracciones colocando sobre un baño de mercurio muy puro una rana muerta y recién preparada. Finalmente demostró, que aproximando los nervios lumbares a los músculos crurales, se produce, en el momento del contacto, una viva contracción. En este último experimento ya no desempeñaba papel alguno ningún metal, y parecía triunfante la teoría de Galvani; pero Volta la combatió entonces dando más extensión a su teoría del contacto, y sentando como principio general que *dos sustancias heterogéneas cualesquiera, puestas en contacto, se constituyen siempre, la una en el estado de electricidad positiva, y la otra en el de negativa.*

Sin embargo, aún hizo Galvani un postrer experimento, en el cual era imposible admitir un efecto de contacto, supuesto que sólo se tocaban sustancias homogéneas. Colocó sobre un disco de vidrio un muslo de rana con su nervio lumbar, y al lado otro muslo dispuesto del mismo modo: aplicado el nervio del segundo sobre el del primero, en términos de que en el punto de contacto no existiese más que sustancia nerviosa, puso en contacto los dos muslos, y obtuvo una fuerte contracción. Galvani había conseguido, pues, demostrar la existencia de la electricidad animal, puesta en evidencia en nuestros días por M. Matteucci con la denominación de *corriente propia* de la rana.

637. Teoría de Volta. -Volta, físico antes que todo, y no considerando más que las condiciones físicas del problema, rechazó la teoría de la electricidad animal, y admitió exclusivamente la del contacto, que puede formularse por los dos principios siguientes:

1.º El contacto de dos cuerpos heterogéneos da origen constantemente a una fuerza que Volta designó con el nombre de *fuerza electromotriz*, y que reconoce por carácter, no sólo descomponer parte de su electricidad natural, sino también oponerse a la recomposición de las electricidades contrarias acumuladas en los dos cuerpos en contacto.

2.º Cuando dos sustancias heterogéneas están en contacto, la diferencia algebraica de su estado eléctrico es constante para los mismos cuerpos, sean cuales fueren las condiciones en que se encuentren, e igual a la fuerza electro-motriz. Es decir, que si se quita a los dos cuerpos, o bien si se les comunica una cantidad cualquiera de electricidad, no se modifica la diferencia de su estado eléctrico relativo: en el primer caso, la fuerza electro-motriz reproduce inmediatamente una cantidad de electricidad igual a la que se quitó, y en el segundo, el exceso de fluido adicionado se distribuye con igualdad en los dos cuerpos, resultando de aquí que no varía la diferencia de los dos estados eléctricos. Por ejemplo, si dos discos, de zinc y de cobre, puestos en contacto y aislados ambos, tienen +1 electricidad positiva el primero, y -1 negativa el segundo, y se comunica a este sistema una cantidad de fluido positivo 20, se tendrá en el zinc 20+1, o 21, y en el cobre, 20-1, o 19. De modo que la diferencia que era 2 entre los estados eléctricos +1 y -1, es también 2 entre los 21 y 19.

Como la fuerza electro-motriz que admitía Volta no desarrollaba igual cantidad de fluido en contacto con todas las sustancias, dividió dicho físico los cuerpos en *buenos electro-motores* y en *débiles electro-motores*. En la primera clase se encuentran los metales y el carbón bien calcinado, y en la segunda los líquidos, y en general, los cuerpos no metálicos. Los metales tampoco son por igual buenos electromotores; el zinc y el cobre, soldados entre sí, lo son en alto grado, y por último, la especie de electricidad desarrollada cambia con la naturaleza de las sustancias en contacto. El zinc, el hierro, el estaño, el plomo, el bismuto y el antimonio se electrizan positivamente en contacto con el cobre; y negativamente en el mismo caso el oro, la plata y el platino.

Fundándose Volta en la teoría del contacto, llegó a inventar el maravilloso aparato que ha inmortalizado su nombre. Sin embargo, a poco encontró también esta teoría, como la de Galvani, notable oposición; y hoy únicamente se atribuye a las acciones químicas, según expondremos más adelante, el desarrollo de electricidad cuyo origen, según Volta, era el contacto.

638. Pila de Volta. -Dase el nombre general de *pila* a todos los aparatos que sirven para desarrollar la electricidad dinámica. El primer aparato de esta clase, inventado por Volta en 1800, se compone de una serie de discos puestos unos sobre otros en el orden siguiente: un disco de cobre, otro de zinc, una rodaja de paño empapada de agua acidulada, luego un disco de cobre, otro de zinc, una nueva rodaja de paño, y así sucesivamente en el mismo orden, según indica la [figura 467](#). De esta disposición toma origen el nombre de *pila* que ha conservado, por más que haya recibido este aparato otras enteramente distintas. Suéldanse ordinariamente entre sí, de dos en dos, los discos de zinc y de cobre, de modo que forman *pares*, separados por las rodajas húmedas, y sostenidos verticalmente por tres cilindros macizos de vidrio. La forma de este aparato ha sido causa de que se designe con el nombre de *pila de columna*.

La distribución de la electricidad varía en esta pila, si se halla en comunicación con el suelo por una de sus extremidades, o bien si se encuentra aislada, lo cual se obtiene colocándola en un platillo de vidrio o de resina, y aunque sea de madera que no conduce de una manera sensible la electricidad de la pila.

En el primer caso, demuestra la experiencia que la extremidad que comunica con el suelo se halla en el estado natural, y que el resto de la pila no contiene más que una especie de electricidad, que es positiva si termina en un disco de cobre la extremidad de la pila que comunica con el suelo, y negativa si aquél es de zinc. En cuanto a la tensión, debería crecer, según la teoría de Volta (637, 2.º), proporcionalmente al número de los pares; pero la experiencia nos demuestra que aumenta con menos rapidez.

La electricidad en la pila aislada se distribuye de distinta manera. Compruébase entonces, por medio del electrómetro, que la parte media se halla en el estado natural, que cada mitad de la pila está enteramente cargada, de electricidad positiva la una, y negativa la otra, que la tensión crece por una y otra parte, a contar desde el centro hacia las extremidades. La mitad que termina por zinc está cargada de electricidad positiva, y la otra de negativa. En la teoría química veremos cuál es la causa de esta distribución de la electricidad en la pila.

639. Tensión de la pila. - La *tensión* de una pila es la tendencia de la electricidad acumulada en las extremidades a desprenderse y a vencer los obstáculos que se oponen a su marcha. No hay que confundir la tensión de una pila con la *cantidad* de electricidad que puede desprender; pues la tensión depende particularmente del número de pares, mientras que la cantidad de fluido, en igualdad de circunstancias, crece con la superficie de los pares; y así cuanto mayor es esta superficie, más considerable es, no variando la tensión, la cantidad de electricidad que circula en la pila; cantidad que crece también con la conductibilidad del líquido interpuesto entre los pares; la tensión, por el contrario, es independiente de la naturaleza de dicho líquido.

Como no haya un número considerable de pares, la tensión en las extremidades de la pila es siempre mucho más débil que en las máquinas eléctricas; y en efecto, no sólo cada extremidad considerada aisladamente no da chispas, sino que tampoco atrae los cuerpos ligeros; de modo que sólo con el electrómetro condensador de panes de oro se consigue que sea sensible la tensión. Para que así sea, se hace comunicar, uno de los platillos del electrómetro con una de las extremidades de la pila, y el otro con la otra extremidad o con el suelo. Cárgase entonces instantáneamente el aparato, o interrumpiendo las comunicaciones, se ve que divergen los panes de oro. Hasta puede

cargarse una botella de Leyden cuando comunica su armadura interior con una de las extremidades de la pila, y la exterior con la otra, pero esta carga es mucho más débil que la que procura la máquina eléctrica.

640. Polos, electrodos, corrientes. -En una pila, se llama *polo positivo* la extremidad en donde tiende a acumularse el fluido positivo, y *polo negativo*, aquélla en la cual propende a acumularse el negativo. El último zinc es el que tiende a ser el polo positivo, y el último cobre el polo negativo; pero como se ha visto anteriormente (638) que en la pila de columna se puede suprimir el último zinc sin cambiar en nada la distribución de la electricidad, de modo que entonces cada polo corresponde a un cobre, y como sucederá otro tanto en las diversas pilas que daremos a conocer, resulta que habría confusión si se denominasen los polos por los nombres de los metales a que corresponden. En una palabra, no es la naturaleza de los metales que terminan la pila la que debe determinar tal o cual polo, sino el orden en que estos metales están dispuestos. Es decir, que el polo positivo está siempre a la extremidad hacia la cual miran los zincs de cada par, y el polo negativo a la extremidad a que miran los cobres.

Denominanse *electrodos* o *reóforos* dos alambres fijos en los polos de la pila ([fig. 467](#)), destinados a hacerlos comunicar entre sí, de suerte que las extremidades de estos alambres vengan a convertirse a su vez en polos.

Finalmente, se designa con el nombre de *corriente* la recomposición de las electricidades contrarias que se opera desde uno a otro polo de una pila, cuando comunican entre sí por medio de los electrodos o de cualquier cuerpo conductor. Los efectos de las pilas demuestran que las corrientes son continuas, lo cual prueba que a medida que se reúnen las dos electricidades al través del alambre conjuntivo, la fuerza electro-motriz, o mejor la acción química, descompone una nueva cantidad de electricidad natural en la pila.

Admítese de ordinario en una corriente, una dirección determinada, suponiendo que va del polo positivo al negativo en los electrodos, y de éste a aquél en el interior de la pila; pero esto no es más que un convenio, porque la recomposición se verifica con igualdad del polo positivo al negativo y vice-versa. En cualquier caso, no principia la corriente hasta el momento en que se ponen en comunicación los dos polos por un cuerpo conductor, lo cual se expresa diciendo que la *corriente está cerrada*. Todas las propiedades de la electricidad en el estado de tensión cesan entonces, pero aparecen otras nuevas que caracterizan las corrientes, y que describiremos al hablar de los efectos de las pilas.

▽△

## Diversas modificaciones de la pila

641. Pila de artesa. -La pila de Volta ha experimentado diversas disposiciones. La que acabamos de describir (638) ofrece el inconveniente de que las rodajas de paño, comprimidas por el peso de los discos, exprimen el líquido que las empapa, y por eso no tardó en adoptarse la *pila de artesa*, que no es, por decirlo así, más que una pila de columna horizontal. Consta de una caja rectangular de madera, recubierta interiormente

con una capa de mástic aislador ([fig. 468](#)): las placas de zinc y de cobre, soldadas entre sí de dos en dos, forman pares de tamaño igual a la sección interior de la caja y fijos en el mástic; de modo que quedan entre los pares intervalos poco considerables, que constituyen celdillas o compartimientos. Viértese en estas una mezcla de agua y ácido sulfúrico, que produce el mismo efecto que las rodajas de la pila de columna, y los dos polos comunican entre sí por medio de alambres sujetos a dos placas de cobre que se introducen en las dos últimas celdillas. La teoría de esta pila es completamente igual a la de la pila de columna.

642. Pila de Wollaston. -La *pila de Wollaston* o *pila de bocales* es otra modificación de la de Volta. Las placas de zinc y de cobre no están soldadas más que por sus bordes, o bien por una parte de éstos, terminando las placas de cobre por una lengüeta que se suelda con el zinc. Estas placas se hallan encorvadas de manera que se introducen verticalmente en bocales de vidrio llenos en parte de agua acidulada; pero el zinc y el cobre que entran en un mismo frasco pertenecen a pares diferentes ([fig. 469](#)). A partir de la derecha del dibujo, una laminita de cobre C se suelda con una gruesa placa Z de zinc, y ambas constituyen el primer par. Una segunda lámina de cobre *a*, de la misma anchura que el zinc, lo envuelve sin tocarlo, y va a reunirse con una lengüeta de cobre *o*, soldada con un segundo zinc Z y formando con él el segundo par. El zinc de éste se halla envuelto a su vez por una placa de cobre *d*, que va a soldarse con un tercer zinc, y así sucesivamente se reúnen todos los pares que se quieran. La figura a la cual nos referimos, representa una pila de 16 pares, reunidos paralelamente en dos series de a 8. El primer cobre C, soldado con un zinc, representa el polo negativo, y el positivo corresponde al último cobre *m*, el cual, por no estar en contacto con ningún zinc, se limita a quitar al líquido el fluido positivo que le da el último par. Fijos todos los pares en un travesaño de madera que puede subir o bajar según se desee entre cuatro pies, se levanta aquél cuando no se quiere que funcione más la pila. Comúnmente se carga el agua de los bocales con  $\frac{1}{16}$  de ácido sulfúrico y  $\frac{1}{20}$  de ácido azótico: este último origina una corriente más constante cediendo oxígeno al hidrógeno que produce la descomposición del agua y oponiéndose de esta suerte a un depósito dañoso sobre el cobre de los pares.

643. Pila de Munch. -M. Münch, profesor de física en Estrasburgo ha dado a la pila de Wollaston una disposición más sencilla, introduciendo todos los pares en una misma capacidad de madera interiormente masticada. La [figura 470](#) representa una pila de veinte pares, y manifiesta de qué manera están reunidas verticalmente sus placas: las blancas con los zincs, y las otras con las de cobre. Esta pila produce: con un volumen reducido, efectos enérgicos, pero poco constantes.

En las diferentes pilas que acabamos de describir, se da a las placas de zinc más espesor que a las de cobre, porque el ácido sulfúrico sólo actúa sobre el primer metal.

644. Pilas secas. -Las *pilas secas* son verdaderas pilas de columna, en las cuales las rodajas aciduladas están sustituidas por una sustancia sólida higrométrica. Existen diferentes sistemas; pero en el de Zamboni, que es el más usado, los cuerpos electro-motores son el estaño o la plata y el bióxido de manganeso. Para construir esta pila, se toma un pliego de papel lateado o estañado por una de sus caras, y en la otra se fija por medio de un cuerpo graso, bióxido de manganeso bien lavado. Después de superponer siete u ocho pliegos de éstos, se cortan con un sacabocados, en discos de unos 25 milímetros de diámetro, los cuales se superponen en el mismo orden, de modo que la

plata o el estaño de cada disco esté en contacto con el manganeso del siguiente. Apilados así de 1200 a 1800 pares, termina la pila en cada extremo por un disco de cobre, y se aprieta con fuerza todo el sistema con hilos de seda, a fin de que se establezca mejor el contacto entre los elementos de la pila. Entonces corresponde el polo positivo al disco de cobre en contacto con el manganeso, y al del otro extremo, es decir, al polo plata o estaño, el polo negativo.

Las pilas secas son notables por la duración de su acción, la cual puede prolongarse muchos años; pero su energía depende en gran parte de la temperatura y del estado higrométrico del aire: es mayor en verano que en invierno, y la acción de un fuerte calor puede reanimarla cuando parece que ya está agotada. Una pila de Zamboni, de 2000 pares, no da conmoción ni chispa, pero puede cargar la botella de Leyden y los demás condensadores; empero para esto se requiere cierto tiempo, porque la electricidad se mueve con mucha lentitud en su interior. Atribúyese generalmente el desarrollo de la electricidad en estas pilas a una acción química que depende de la descomposición de las materias orgánicas de las cuales se ha impregnado al papel.

645. Electrómetro de Bohnenberger. -Bohnenberger ha construido un electrómetro de pila seca, sumamente sensible. Es un electrómetro condensador ([fig. 454](#)), cuya varilla no lleva más que una sola lámina de oro suspendida a igual distancia de los polos contrarios de dos pilas secas, situadas verticalmente en el interior de la campana, sobre el platillo que sirve de base al aparato. Cuando el pan de oro posee electricidad libre, es atraído por una de las pilas y repelido por la otra, y su electricidad es evidentemente contraria a la del polo hacia el cual se dirige.

646. Aparatos de rotación. -Constrúyense, con el nombre de *juegos de sortija*, unos aparatitos de rotación continua, cuyo movimiento persiste durante muchos años ([fig. 471](#)). Dos columnas de cobre, *a* y *b*, sustentadas por un zócalo de madera, comunican por su base, la una con el polo positivo, y la otra con el negativo de una enérgica pila seca, situada horizontalmente debajo del zócalo. Esta pila se compone comúnmente de otras seis pilas más pequeñas, que comunican entre sí y forman un total de 1800 pares.

Sobre un eje *c*, situado a igual distancia de las dos columnas *a* y *b*, hay una chapa de marfil *i*, con la cual se enlazan cuatro travesaños que sostienen unas figuritas pintadas sobre un cartón muy ligero, y que terminan por pequeñas banderolas de oropel fijadas por goma laca que las aísla: atraídas éstas primero por la electricidad de las esferas de las columnas, las tocan y se cargan de la misma electricidad que ellas; repelidas entonces, principian a girar, y las dos banderolas positivas, por ejemplo, rechazadas por la columna *a*, se encuentran atraídas por la *b*, a la cual van a tocar para ser de nuevo repelidas, y así sucesivamente, siguiéndose de aquí un movimiento continuo que se prolonga todo el tiempo que está funcionando la pila; es decir, durante muchos años.

▽△

## Teoría química de la pila

647. Electricidad que originan las acciones químicas. -La teoría del contacto propuesta por Volta para explicar la producción de la electricidad en la pila, no tardó en ser

combatida por muchos físicos. Habiendo observado Fabroni, compatriota de Volta, que en la pila los discos de zinc se oxidaban al contacto de las rodajas aciduladas, pensó que esta oxidación era la causa principal del desprendimiento de la electricidad. No tardó Wollaston en Inglaterra, en exponer la misma opinión, que Davy apoyó con ingeniosos experimentos.

Es evidente que en la experiencia anteriormente citada (636), Volta obtuvo signos sensibles de electricidad; pero si se coge el zinc con unas pinzas de madera, M. de la Rive ha demostrado que desaparecen todos los signos de electricidad, y que acontece lo propio si el zinc se sitúa en los gases, como son el hidrógeno y el azoe, que no ejercen sobre el mismo ninguna acción. En vista de estos hechos, ha deducido M. de la Rive, que el desprendimiento de electricidad, en la experiencia de Volta, reconoce por causa las acciones químicas que originan la traspiración cutánea de la mano y del oxígeno del aire.

Se demuestra el desarrollo de la electricidad en las acciones químicas, de la siguiente manera, acudiendo al auxilio del electrómetro condensador: se sitúa sobre el platillo superior un disco de papel mojado, y encima de éste una cápsula de zinc, en la cual se vierte agua y ácido sulfúrico, sumergiendo después en el líquido una lámina de platino que comunique con el suelo, al mismo tiempo que se hace que comunique con el mismo el plato inferior, por medio del dedo humedecido. Cuando se interrumpen las comunicaciones y se levanta el plato superior, se echa de ver que los panes de oro han adquirido una cantidad sensible de electricidad positiva, lo cual manifiesta que el plato superior se ha electrizado negativamente, por la acción química del ácido sulfúrico sobre las paredes de la cápsula.

Pero el medio principal por el cual se ha comprobado que todas las acciones químicas se encuentran acompañadas de un desprendimiento de electricidad más o menos abundante, ha sido el empleo del galvanómetro; y con el auxilio de este mismo aparato, ha descubierto M. Becquerel las leyes siguientes sobre el desprendimiento de la electricidad en las acciones químicas.

1.<sup>a</sup> *En la combinación del oxígeno con otro cuerpo, aquél adquiere la electricidad positiva, y el combustible la negativa.*

2.<sup>a</sup> *En la combinación de un ácido con una base, o en la de los cuerpos que actúan como tales, adquiere el primero la electricidad positiva, y la segunda la negativa.*

3.<sup>a</sup> *Cuando un ácido actúa químicamente sobre un metal, el ácido se electriza positivamente, lo cual es una consecuencia de la segunda ley.*

4.<sup>a</sup> *En las descomposiciones, los efectos eléctricos son inversos de los anteriores.*

5.<sup>a</sup> *En las dobles descomposiciones, el equilibrio de las fuerzas eléctricas no se perturba en lo más mínimo.*

Respecto a la cantidad de electricidad que se desprende en las acciones químicas, es enorme, puesto que M. Becquerel ha llegado al siguiente resultado, que verdaderamente es notabilísimo, y que se formula exponiendo que la oxidación de una cantidad de hidrógeno, pudiendo procurar un miligramo de agua, desprende suficiente electricidad

para cargar *veinte mil veces una superficie metálica de un metro de superficie*, a un grado tal, que las chispas que resultan de la descarga estallan a un centímetro de distancia. Estos mismos resultados los han obtenido los señores Faraday y Pelletier.

648. Teoría química de la pila. - Según esta teoría, que es la que generalmente se admite en la actualidad, toda la electricidad desprendida en las pilas ya descritas, reconoce por origen la acción del agua acidulada sobre el zinc, como es fácil comprenderlo según las leyes anteriormente expuestas (447). Sin embargo, importa observar que seguir la teoría del contacto (637), es la reunión de un zinc y de un cobre soldados juntos lo que constituye un par, siendo así que en la teoría química es el *sistema de un zinc y de un cobre separados por el agua acidulada*.

Sentado esto, consideremos en primer lugar el caso de un solo par zinc y cobre, sumergido en el agua acidulada con el ácido sulfúrico ([fig. 472](#)). Según la tercera ley de M. Becquerel, por la acción química que se origina entre el ácido, el agua y el zinc, este último se electriza negativamente y el agua acidulada positivamente. Respecto al cobre, como es *inactivo*, es decir, como no le ataca el ácido sulfúrico a la temperatura ordinaria, no hace otra cosa que robar al líquido su electricidad, de suerte que se encuentra electrizado positivamente. Por lo tanto si se reúnen los dos metales por un alambre, se tendrá una corriente que se dirige al líquido, del zinc al cobre, y por el contrario el cobre al zinc exteriormente. En vista de esto, es evidente *que el polo positivo corresponde al metal inactivo, y el polo negativo al metal activo*, es decir, *al metal atacado por el ácido*. Este principio es general y se aplica no solamente a todas las pilas ya vistas, sino también a las que aún hemos de describir.

En la teoría química de la pila, de la cual somos deudores a M. de la Rive, se nota que es importante que uno de los metales que componen el par voltaico, sea el único atacado por el agua acidulada, o cuando menos que el segundo sea mucho menos activo que el primero, pues de no ser así, se originan dos efectos de dirección contraria que tienden a anularse. Por esta razón se reemplaza ventajosamente en el par voltaico el cobre por el platino y aun también por el carbón calcinado.

649. Teoría de la pila de muchos pares. - En el caso de un solo par, tal como acabamos de considerarlo anteriormente ([fig. 472](#)), al momento que las dos electricidades se separan por la acción química, una sobre el zinc y la otra sobre el líquido, la mayor parte se recombina en el mismo par al través del líquido, de manera que sólo una débil porción de las electricidades desarrolladas por la acción química, es la que circula en el alambre conjuntivo; y la cantidad de electricidad que pasa de esta manera por dicho alambre es tanto más débil cuanto menor es la resistencia que encuentran para reunirse en el interior del par. Por el contrario si esta resistencia aumenta, la cantidad de electricidad que va de un polo al otro por el alambre conjuntivo, crece igualmente. Éste es el resultado que se obtiene multiplicando el número de pares.

En efecto, sea, por ejemplo, una pila de artesa AB ([fig. 473](#)), formada de pares de zinc y cobre, y cuyas artesas contengan ácido sulfúrico diluido en agua: el ácido de cada compartimiento ataca al zinc, pero no ejerce acción alguna sobre el cobre; en este caso surge en toda la pila un desprendimiento de electricidad positiva hacia el líquido, y de electricidad negativa sobre el zinc de cada par (447, 3.º).

Por consiguiente, en la artesa *b*, en la cual el líquido se encuentra al mismo tiempo en contacto con un zinc y con un cobre, la electricidad positiva del líquido se recompone constantemente con la electricidad contraria del par *cz*, y de igual manera, en la artesa *d* el fluido positivo del líquido se combina con el fluido negativo del par *c'z'*, y así sucesivamente en toda la pila; de suerte que sólo existen las electricidades de las artesas extremas *a* y *h*, que no pudiendo unirse a las de las artesas circunvecinas, permanecen libres. Fácilmente se ve que en este caso la artesa *a* es la que se electriza positivamente por la acción de su ácido sobre el zinc *z*, y la artesa *h* negativamente, por la electricidad que le comunica el par *c''z''*.

En este supuesto, habiendo encontrado M. de La Rive que la conductibilidad de una masa líquida interrumpida por diafragmas metálicos, se halla en razón inversa de su número, se deduce de este hecho que cuanto más considerable es el número de pares interpolares, mayor es la resistencia que encuentran las electricidades contrarias acumuladas en los poros, más enérgica la tensión, y más abundante la electricidad que recorre, el alambre conjuntivo. También se deduce de aquí, que en los pares interpolares decrece la tensión de los polos hacia el centro de la pila, puesto que disminuyendo el intervalo de los pares, es menor la resistencia a la recomposición. Por igual causa es nula la tensión en la parte central.

Puesto que aumenta la resistencia a la recomposición de las electricidades contrarias acumuladas en los polos cuando el líquido interpolar es menos conductor, debe acontecer lo mismo respecto a la tensión. En efecto, M. de La Rive ha notado que llenas de agua acidulada, o de agua común, las artesas de la pila, es una misma la tensión en ésta. En el primer caso, la producción de la electricidad es más abundante, pero los fluidos contrarios se recomponen con mayor facilidad.

Finalmente, según la teoría que antecede, la tensión aumenta con el número de pares, pero como las electricidades contrarias de los pares intermediarios forman constantemente el fluido neutro, de este hecho resulta, que cuando se reúnen los dos polos por un circuito metálico, éste en realidad no se halla cruzado más que por la electricidad desarrollada por un solo par; pero como es menor la pérdida de electricidad en el par, se recoge mayor cantidad de ella en el alambre conjuntivo.

650. Disminución de la corriente en las pilas, corrientes secundarias, polaridad. -Las diversas pilas, así de columnas como de artesas, de Wollaston y de Münch, que ya hemos descrito, y cuyo principal carácter es el de constar de dos metales y de un solo líquido, presentan el grave inconveniente de procurar corrientes cuya intensidad disminuye con rapidez.

Dos son las causas que originan esta disminución: la primera es la pérdida de intensidad de las acciones químicas, originada por la neutralización del ácido sulfúrico, a medida que se combina con el zinc; la segunda reconoce por origen, *las corrientes secundarias*. Así se denominan las corrientes que surgen en las pilas, en sentido contrario de la corriente principal, y que la destruyen total o parcialmente. M. Becquerel ha evidenciado que son originadas dichas corrientes, por los depósitos que se forman sobre las láminas de zinc y de cobre de los pares. En efecto, la corriente que se dirige del zinc al cobre, *en la pila*, descomponiendo el agua y el sulfato de zinc que en ella se ha formado, depone sobre el cobre, hacia el cual marcha la corriente, zinc, óxido del mismo, y hasta una capa de gas hidrógeno, mientras que hacia el zinc se dirigen el ácido

y el oxígeno, originados por la descomposición de la sal y del agua. Y puesto que las sustancias así depuestas reaccionan en seguida unas sobre otras, de aquí resulta una corriente en sentido contrario al de la pila, neutralizándola más o menos. La corriente secundaria así desarrollada es tanto más intensa, cuanto mayor sea el tiempo durante el cual se haya prolongado la acción de la corriente principal.

Sobre el metal inactivo, que es el que representa el polo negativo, *en el interior del par*, es en el que se forman principalmente los depósitos; y los que tienden a constituirse sobre el metal activo, se disuelven en virtud de la acción química que en ellos se origina. Si se interrumpe el circuito, se disuelven los depósitos y aumenta la intensidad de la corriente. Este mismo resultado se consigue haciendo pasar la corriente de otra pila en sentido contrario al de la primera, puesto que entonces los depósitos formados se disuelven por los depósitos opuestos.

M. de La Rive ha sido el primero en evidenciar que las láminas de platino que se han empleado en transmitir la corriente en un líquido descomponible, al sacarse de éste y al sumergirse en agua destilada, originan una corriente en sentido inverso al que en un principio transmitieron, fenómeno que el sabio físico de Génova ha formulado diciendo, que están las láminas *polarizadas*. Los señores Becquerel y Faraday han demostrado que esta polaridad de los metales es un efecto de los depósitos originados por las corrientes secundarias que nos han ocupado.

Las láminas de platino que han servido para la descomposición del agua pura, adquieren igualmente la polaridad eléctrica, sin que pueda atribuirse al efecto de un ácido o de una base; pero M. Matteucci ha evidenciado que proviene entonces de una capa de oxígeno y de hidrógeno, depuesta respectivamente sobre cada lámina.

▽△

## **Pilas tabicadas de dos líquidos**

651. Objeto de las pilas de dos líquidos. -A causa de la rapidez con que pierden su energía las pilas de un solo líquido, se usan muy poco en la actualidad, y se sustituyen generalmente por las de dos líquidos, que se denominan *pilas de corriente constante*, porque sus efectos conservan por largo tiempo una intensidad sensiblemente uniforme. Sus formas se han variado repetidas veces, pero las más usadas son la pila de Daniell, la de Grove y la de Bunsen.

En estas pilas se corrigen los inconvenientes de las de un solo líquido, por medio de dos, susceptibles de reaccionar uno sobre otro, y separados por un diafragma que deja pasar con facilidad la corriente, pero que no permite que los líquidos se mezclen, por lo menos con rapidez; y además se introducen los dos elementos de un mismo par, uno en un líquido, y el segundo en el otro. La construcción de esta pila debe satisfacer las siguientes condiciones: 1.º que no origine ningún depósito perjudicial sobre el metal inactivo; 2.º que conserve constantemente al ácido el mismo grado de concentración.

652. Pila de Daniell. -M. Becquerel fue el primero que construyó en 1829, una pila de corriente constante: algunos años después, en 1836, el químico inglés Daniell,

construyó la pila que conserva su nombre y que con la de *carbón*, son las que más se utilizan actualmente. La [fig. 474](#) representa un par o un *elemento* de esta pila, cuya forma ha variado muchísimo. Un vaso V de vidrio está lleno de una disolución saturada de sulfato de protóxido de cobre, en la cual se introduce un cilindro de cobre C con muchos orificios laterales y abierto por los dos extremos. En la parte superior de este cilindro existe un reborde anular G, con agujeritos en su contorno inferior que penetran en la disolución. Sirve este espacio o esta cavidad para contener cristales de sulfato de protóxido de cobre, que se disuelven a medida que funciona el aparato. Finalmente, en el interior del cilindro C hay una vasija porosa o un diafragma P, de bizcocho de porcelana, llena de agua acidulada con ácido sulfúrico, o de una disolución de sal marina, en la cual se introduce un cilindro de zinc Z, abierto por las dos extremidades y amalgamado. En los cilindros zinc y cobre están sujetas, por medio de tornillos de presión, dos láminas delgadas de cobre *p* y *n*, que forman los electrodos de la pila.

Mientras no comunican entre sí los dos electrodos, está la pila inactiva; pero apenas se establece la comunicación, principia la acción química: el agua se descompone y el ácido sulfúrico ataca al zinc que se electriza negativamente, mientras que el agua acidulada lo efectúa positivamente (647). De ésta pasa el fluido positivo, cruzando el diafragma, a la disolución de sulfato, y finalmente al cobre C, que viene a ser así el polo positivo. Respecto al hidrógeno que origina la descomposición del agua, es arrastrado en el sentido de la corriente interior, y pasa a la disolución de sulfato de cobre, cuyo óxido reduce y revivifica el cobre, que va a formar un depósito sin adherencia sobre el cilindro C. Por consiguiente, la superficie de éste permanece siempre idénticamente la misma, y por último el óxido de zinc que puede engendrar la descomposición del sulfato de zinc por la corriente secundaria, no pasa al través del vaso poroso y permanece en la misma disolución en la cual está sumergido el zinc.

Durante este trabajo químico, la disolución del sulfato de cobre tiende a empobrecerse con rapidez; pero los cristales situados en la galería G, disolviéndose progresivamente, son causa de que permanezca constante el grado de la concentración. En cuanto al ácido sulfúrico que ha quedado libre por la descomposición del sulfato de cobre, se dirige con el oxígeno del agua hacia el zinc, para trasformarlo en sulfato; y como es regular, la cantidad de ácido sulfúrico que queda libre en la disolución de cobre, la acción de este ácido sobre el zinc lo es también, de lo cual resulta una corriente constante.

Con esta pila se obtienen efectos constantes durante muchas horas, y aun en el trascurso de muchos días, si se procura conservar la disolución bien saturada y añadir de cuando en cuando cristales de sulfato de protóxido de cobre. Para reunir muchos elementos, se unen, por medio de tornillos de presión, el polo zinc de un par con el polo cobre del siguiente, y así en los demás pares, conforme lo indica la [fig. 478](#), aunque para otra especie de pila. En cuanto a la naturaleza de los polos, el electrodo fijo en el zinc es negativo, y el del cobre positivo, como en las pilas ya descritas.

En vez de un vaso poroso de tierra, sirve también de diafragma de separación de las dos disoluciones, la lona o los intestinos de buey. El efecto es en un principio más poderoso que con la porcelana; pero luego se debilita por mezclarse más rápidamente las dos disoluciones. En general, deben ser permeables a la corriente los diafragmas, para prevenir en cuanto sea posible la mezcla de ambos líquidos.

653. Pila de Grove. -La [fig. 475](#) representa un par de la pila de Grove, compuesto: 1.º de una vasija de vidrio A, llena en parte de agua acidulada con ácido sulfúrico; 2.º de un cilindro de zinc Z abierto por los dos extremos y hendido en toda su longitud; 3.º de un vaso poroso V, de bizcocho de porcelana, y lleno de ácido nítrico común, y 4.º de una lámina de platino P encorvada en S ([fig. 476](#)), y fija en una tapa *c* que se coloca sobre el vaso poroso. Una varilla metálica *b*, que comunica con la lámina de platino, lleva un alambre de cobre que sirve de electrodo positivo, mientras que otro alambre, fijo en el zinc, sirve de electrodo negativo.

Se usa poco esta pila a causa del precio del platino; pero este metal ofrece además el inconveniente de volverse quebradizo y de romperse al menor esfuerzo, cuando ha funcionado cierto tiempo la pila; sin embargo, M. Adam, profesor de física en Niza, ha observado que calentando al rojo las láminas de platino de la pila de Grove, vuelven a recobrar su electricidad.

654. Pila de Bunsen. -La *pila de Bunsen*, conocida igualmente con el nombre de *pila de carbón*, se inventó en el año de 1843; no es más que la de Grove, con la lámina de platino sustituida por un cilindro de carbón, preparado calcinando en un molde de palastro una mezcla íntima de coke y de hulla grasa, bien pulverizada y reunida por medio de una fuerte presión.

Cada elemento de la pila de carbón se compone de cuatro piezas de forma cilíndrica que pueden colocarse con facilidad unas dentro de otras. Estas piezas son: 1.º un frasco F ([fig. 477](#)) vidriado o de vidrio, lleno de una disolución de 10 a 12 partes de agua por una de ácido sulfúrico; 2.º un cilindro hueco Z, de zinc amalgamado, en el cual se encuentra fija una lámina delgada y estrecha de cobre que sirve de electrodo negativo; 3.º un vaso poroso V, de bizcocho de porcelana, en el cual se pone ácido azótico común; y 4.º un cilindro C de carbón, preparado como hemos dicho antes, y buen conductor. En la parte superior del carbón existe un anillo de cobre que tiene una lámina del mismo metal, o sea el electrodo positivo. El mejor sistema que puede emplearse para fijar dicha lámina es el de soldarla al tronco de un cono que se introduce en el carbón según indica la [fig. 478](#). Cuando se desea que funcione el aparato, se dispone cual se ve en la figura P ([fig. 477](#)), colocando el cilindro de zinc en la vasija de vidriado, y luego en este el vaso poroso y el carbón.

Mientras no se comunican el zinc y el carbón, está inactiva la pila; pero al instante que se establece la comunicación por un circuito conductor, principia la acción química. El agua en la cual se sumerge el zinc, descompuesta por este metal y por el ácido sulfúrico, formando sulfato de zinc, que se electriza negativamente y que se trasforma en el polo negativo del par. El agua acidulada por el contrario, electrizándose positivamente, el fluido positivo pasa, cruzando el vaso poroso, al ácido azótico y de éste al carbón que viene a ser así el polo positivo. Respecto al hidrógeno que origina la descomposición del agua, no se depone sobre el carbón, pero descompone el ácido azótico y lo trasforma en ácido hipo-azótico, absorbiendo una parte de su oxígeno para formar el agua. Finalmente, el óxido de zinc queda en el líquido en el cual se encuentra sumergido el cilindro de zinc, y no pasa al través del vaso poroso hasta el carbón, por lo que conserva éste siempre una superficie perfectamente limpia, circunstancia que contribuye esencialmente a la conservación constante de la energía de la pila.

Para formar un aparato compuesto, o sea una pila, se disponen los elementos como indica la figura 478: a cada zinc se suelda una lámina de cobre terminada por un cono del mismo metal, que se encaja sólidamente en el carbón del elemento siguiente; por último, el primer y el último elemento terminan por dos electrodos P y N. En sus últimas investigaciones, M. Despretz ha extendido hasta 800 el número de los elementos.

La pila de Bunsen es la más enérgica de las de corriente constante, y la que más se usa hoy día. Sin embargo, la corriente se debilita con bastante rapidez a medida que el ácido sulfúrico se combina con el zinc. Esta pila tiene además el inconveniente de esparcir vapores nitrosos, muy incómodos cuando son algo numerosos los pares.

Para variar las superficies según los efectos que hay que producir, construyó M. Deleuil pares de Bunsen de dos tamaños, que distinguiremos con las denominaciones de *grandes* y de *pequeños modelos*. En los primeros, el cilindro zinc tiene 22 centímetros de altura, y en los últimos, 14. M. Deleuil admite que, para los efectos que dependen de la superficie, un par del grande modelo equivale a unos dos pares del pequeño. En adelante, cuando hablemos de un número de pares sin indicación de modelo, nos referiremos al pequeño.

655. Manipulación de la pila de Bunsen. -Es esta larga, penosa, y requiere sumo cuidado si quiere obtenerse de la pila todo su efecto. Respecto a este particular, M. Duboscq, cuya competencia es por todos reconocida, formula las siguientes prevenciones.

Desde un principio debe efectuarse la mezcla del agua y del ácido sulfúrico en un solo vaso a fin de obtener el mismo grado de saturación para todos los pares. Después de haber vertido el agua en un cubo de madera, se añade un décimo en volumen de ácido sulfúrico común, de suerte que marque la disolución 10 a 11 grados en el pesa-ácidos de Beaumé. Si no se tiene a mano este instrumento, se conoce que el agua está bastante acidulada cuando se entibia, y cuando no puede la lengua sufrir el contacto de una gota.

En cuanto a los elementos, deben colocarse unos tras otros sobre una mesa o tablero bien seco, cuidando de que no se toquen entre sí por ninguna de sus piezas que no sean las láminas o los conos de cobre que unen el zinc cada elemento al carbón del elemento que sigue; en seguida se vierte con un embudo el ácido nítrico en los vasos porosos hasta que llegue su nivel a dos centímetros de los bordes, llenándose a continuación de igual manera los vasos exteriores con agua acidulada hasta un centímetro de sus bordes, con lo cual se establece aproximadamente la igualdad de nivel en los dos líquidos, condición esencial para la constancia de la pila. Desde que se ha arrojado el ácido nítrico en los vasos porosos, debe introducirse el agua acidulada, a fin de que no tenga tiempo suficiente el ácido nítrico para cruzar dichos vasos, atacando de esta suerte los zincs.

Puesto que el establecimiento adecuado del contacto es indispensable para que funcione perfectamente una pila, se tiene cuidado de limpiar muy bien, frotándolos con papel de vidrio, los troncos de cono que se ajustan en los carbonos, atendiendo a que penetran en éstos con fuerza.

El ácido nítrico, si es nuevo, debe marcar 40 grados en el pesa-ácidos, y puede servir hasta que marque 26, en cuyo caso se le añade  $\frac{1}{50}$  de su volumen de ácido sulfúrico, pero después de esta adición sólo puede emplearse una vez. El agua acidulada se emplea generalmente dos veces, a menos que no principie a cristalizarse el sulfato de zinc que se haya formado.

Lo que debe observarse principalmente para conservar la pila en buen estado es la amalgamación de los zincs (656). Se conoce que hay necesidad de amalgamar un zinc, cuando se advierte un silbido en el agua acidulada, sin que se encuentre la pila en actividad. Si es atacado enérgicamente, se nota que humea el agua y que llega hasta hervir; en este caso debe retirarse inmediatamente el zinc, porque de no efectuarlo son suficientes algunas horas para agujerearlo.

Para amalgamar los zincs, se mojan durante algunos segundos en el agua acidulada (que ha de ser igual a la que contiene la pila) para limpiarlos; después se sitúan uno a uno en un vaso de barro que contenga un poco de agua acidulada (doble dosis que la primera), y dos kilogramos aproximadamente de mercurio, que se extienden sobre el zinc con el auxilio de un rascador o de un cepillo de hierro. Cuando se han amalgamado los zincs, se sumergen en un cubo de agua limpia, en cuyo fondo se deposita el exceso de mercurio al terminarse la operación.

656. Propiedad del zinc amalgamado. -M. de La Rive ha observado que el zinc perfectamente puro no es atacable por el ácido sulfúrico diluido en agua, pero que lo es cuando se le pone en contacto con una lámina de platino o de cobre introducida en la disolución. El zinc común, que no es puro, es por el contrario, vivamente atacado por el ácido diluido, pero amalgamado adquiere la propiedad del puro, y no es atacado sino cuando se halla en contacto con un alambre de cobre o de platino introducido también en la disolución, es decir, mientras forma parte de un par en actividad.

Esta propiedad depende, al parecer, del estado eléctrico que acepta el zinc por su contacto con el mercurio, y se ha aplicado a las pilas eléctricas de M. Kemp, que ha sido el primero en imaginar la amalgama de los zincs de cada par. De esta operación resulta que mientras no esté cerrado el circuito, es decir, que mientras no existe corriente no es atacado el zinc. Se ha observado, además, que con el zinc amalgamado, la corriente es más regular, al propio tiempo que más intensa, respecto a una misma cantidad disuelta de metal.

657. Diversas combinaciones de los pares de una pila. -Cuando se reúnen muchos pares de Bunsen o de Daniell para formar una pila galvánica, como indica la [figura 478](#), se pueden combinar estos pares de diferentes modos. Por ejemplo, en el caso en que solo haya seis pares, pueden formarse las cuatro combinaciones siguientes: 1.<sup>a</sup> una sola serie longitudinal ([fig. 479](#)), en la que C representa el electrodo positivo, y Z el negativo; 2.<sup>a</sup> en dos series paralelas de tres pares cada una ([fig. 481](#)), cuyos electrodos del mismo nombre van a concurrir todos también en uno solo, y 4.<sup>a</sup>, por último, en seis series de un solo par cada una ([fig. 482](#)), cuyas corrientes todas se reúnen en C y en Z. Con doce pares podrían realizarse ocho combinaciones diferentes, y así sucesivamente a medida que aumenta el número de pares. Las combinaciones en series longitudinales ([fig. 479](#)) y las de dos o tres series paralelas ([fig. 480](#) y [481](#)) son las que con más frecuencia se usan.

En estas diversas combinaciones, disminuir la longitud de las series para aumentar su número en una razón inversa, equivale a disminuir el número de los pares y aumentar su superficie, lo cual conduce para un mismo número de pares, a efectos muy diferentes, conforme se verá al hablar de los efectos de la pila (658).

En las diversas combinaciones citadas, la resistencia que presenta la pila a la corriente decrece a medida que aumenta el número de las series paralelas. En efecto, si se representa por 1 la resistencia de un solo par, la de la primera combinación ([fig. 479](#)) es 6; en la segunda ([fig. 480](#)), es tres para cada serie, y por lo mismo  $3/2=1,5$  para las dos series reunidas, pues en igualdad de resistencia se dobla la corriente; de igual manera, en la tercera combinación ([fig. 481](#)), la resistencia para cada serie es 2, y para las tres reunidas  $2/3=0,666$ ; y por fin, en la cuarta ([fig. 482](#)) es  $1/6=0,166$ . Del mismo modo se calcularía la resistencia de un número cualquiera de pares dispuestos en series paralelas. Por ejemplo, 24 pares en 3 series paralelas de 8 dan la resistencia  $8/3=2,666$ . Como el cálculo demuestra que se obtiene el máximo de efecto de una pila cuando en ésta la resistencia es igual a la que ofrece el circuito que ha de recorrer la corriente de uno a otro electrodo, deberá elegirse, entre las combinaciones posibles, aquélla cuya resistencia se acerque más a la del circuito dado.

▽△

## Capítulo II

▽△

## **Efectos de la pila; galvanoplastia, dorado y plateado**

658. Diversos efectos de la pila. -Los efectos de la electricidad dinámica se dividen en fisiológicos, físicos y químicos. Difieren de los de la estática en que estos últimos provienen de una recomposición instantánea de las dos electricidades según una tensión energética, mientras que los últimos resultan de la recomposición lenta y según una tensión mucho más débil de los mismos fluidos, cuando los dos polos de la pila están reunidos por un circuito más o menos conductor. Por la continuidad de la fuerza que los produce, los efectos de las corrientes son mucho más notables que los de las máquinas eléctricas.

Los efectos físicos, que se dividen en caloríficos y luminosos, dependen, sobre todo, de la cantidad de electricidad puesta en movimiento en la pila, y de consiguiente, de la superficie de los pares. Los efectos químicos, al contrario, lo mismo que los fisiológicos, dependen de la tensión, y por lo tanto, del número de los pares. Todos estos efectos aumentan con la acción química del líquido de la pila.

659. Efectos fisiológicos. -Desígnanse con este nombre los efectos que produce la pila sobre los animales muertos o vivos. Se ha visto que éstos fueron los primeros que se observaron, supuesto que a ellos se debe el descubrimiento de la electricidad dinámica por Galvani (635). Consisten en conmociones y en contracciones musculares muy energéticas cuando son poderosas las pilas.

Cogiendo con las dos manos los electrodos de una fuerte pila, se siente una violenta conmoción semejante a la que origina la botella de Leyden, sobre todo si las manos están mojadas con agua acidulada o salada, que aumenta la conductibilidad. La conmoción es tanto más intensa, cuanto mayor es el número de pares. Con una pila de Bunsen de 50 a 60 pares es fuerte la conmoción, y con una de 150 a 200, insufrible, y aun peligrosa si se prolonga. Déjase sentir con menor intensidad hacia la parte anterior de los brazos que la de la botella de Leyden, y, transmitida por una cadena de muchas personas, generalmente sólo la sienten las más próximas a los polos.

La conmoción de la pila, lo mismo que la de la botella de Leyden, depende de la recomposición de las electricidades contrarias, pero con la diferencia de que la descarga de la segunda es instantánea, como la conmoción, mientras que, cargándose la primera luego de descargada, se suceden con rapidez las sacudidas. El efecto de la corriente voltaica sobre los animales varía con su dirección, pues, según los experimentos de M. Lehot y de M. Marianini, cuando la corriente se propaga siguiendo las ramificaciones de los nervios, produce una contracción muscular en el momento en que principia, y otra al concluir; pero si se propaga en sentido contrario a las mismas, origina una sensación mientras subsiste, y una contracción, al interrumpirse. Con todo, esta diferencia de efectos no se nota más que con las corrientes débiles, pues con las intensas tienen lugar las contracciones y los dolores al establecerse y al interceptarse la corriente, sea cual fuere su dirección.

Las contracciones cesan luego que se ha establecido invariablemente la corriente entre el nervio y el músculo, lo cual tiende a demostrar que se ha producido una modificación instantánea que subsiste lo que dura la corriente. En efecto, manifiéstanse de nuevo las conmociones, si cambia ésta de dirección, o si la sustituye otra más energética.

Por medio de la corriente recobraron la vida varios conejos asfixiados media hora antes; y una cabeza de ajusticiado experimentó tan horribles contracciones, que huyeron despavoridos todos los espectadores. El tronco, sometido a la misma acción, se levantaba en parte; se agitaban las manos chocando los objetos cercanos, y los músculos pectorales imitaban el movimiento respiratorio. En fin, todos los actos de la vida se reproducían de un modo imperfecto, pero cesaban instantáneamente al terminar la corriente.

660. Efectos caloríficos. -Una corriente voltaica que atraviesa un alambre metálico produce los mismos efectos que la descarga de una batería (630): caliéntase el alambre, se vuelve incandescente, se funde o se volatiliza, según sea más o menos largo y de mayor o menor diámetro. Con una pila poderosa, todos los metales se funden, hasta el iridio y el platino, que resisten al fuego de forja más intenso. El carbón es el único cuerpo que por ahora no ha podido fundirse por la pila; si bien M. Despretz, con una compuesta de 600 elementos de Bunsen, reunidos en series paralelas (657), dio a barritas de carbón muy puro una temperatura tal, que se encorvaron, reblandecieron, y hasta pudieron soldarse entre sí, todo lo cual indica un principio de fusión.

En los mismos experimentos transformó dicho físico el diamante en grafito, y obtuvo, por medio de una acción algo prolongada, globulitos de carbón fundido. Consiguió fundir en algunos minutos 250 gramos de platino; y trabajando tan sólo sobre unos pocos gramos, los volatilizó parcialmente.

Basta una pila de 30 a 40 elementos de Bunsen para fundir y volatilizar con rapidez alambres finos de plomo, de estaño, de zinc, de cobre, de oro, de plata, de hierro y hasta de platino, con vivas chispas diversamente coloreadas. El hierro y el platino arden con una luz de un blanco brillante; el plomo la da purpurina; blanca azulada el estaño y el oro; entre blanca y roja el zinc, y por fin, verde el cobre y la plata.

Haciendo pasar la corriente por alambres metálicos del mismo diámetro y de igual longitud, pero de diferente sustancia, comprobó Children que los de menor conductibilidad eléctrica son los que más se calientan; de lo cual dedujo que los efectos caloríficos de la pila dependen de la resistencia que encuentra la corriente para atravesar al conductor que reúne los polos.

Se ha observado ya (658) que los efectos caloríficos dependen más de la cantidad del fluido eléctrico que circula en la corriente, que de la tensión, o en otros términos, más de la superficie de los pares, que de su número. Consíguese, efectivamente, fundir un alambre fino en hierro con un solo par de Wollaston, cuyo zinc tenga 20 centímetros sobre 15.

Colocando en la corriente un alambre metálico aislado en un tubo de vidrio lleno de agua, que haga el oficio de calorímetro, encontró M. Ed. Becquerel que el desarrollo de calor por el paso de la electricidad al través de los cuerpos sólidos, ofrece las leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *La cantidad de calor desarrollada está en razón directa del cuadrado de la cantidad de electricidad que pasa en un tiempo dado;*

2.<sup>a</sup> Esta cantidad de calor se halla en razón directa de la resistencia del alambre al paso de la electricidad;

3.<sup>a</sup> Sea cual fuere la longitud del alambre, con tal que sea constante su diámetro y que pase la misma cantidad de electricidad, la elevación de temperatura es igual en toda la extensión del alambre;

4.<sup>a</sup> Para una misma cantidad de electricidad, la elevación de temperatura en diferentes puntos del alambre está en razón inversa de la cuarta potencia del diámetro.

Los efectos caloríficos de las corrientes son más difíciles de observar en los líquidos, por poseer estos cuerpos mayor calor específico que los sólidos, y por absorber los gases que se producen una gran cantidad de calor latente. Por ejemplo, en la descomposición del agua se reconoce que la elevación de temperatura es menor en el polo negativo, en donde el volumen de hidrógeno que se desprende es duplo del de oxígeno que se recoge en el positivo, según veremos en breve (666).

661. Efectos luminosos. -La pila eléctrica es, después del sol, el manantial de luz más intenso que se conoce. Sus efectos luminosos se manifiestan por medio de chispas o por la incandescencia de las sustancias que reúnen los dos polos.

Para obtener chispas, cuando es bastante poderosa la pila, se acercan los dos electrodos, dejando entre ellos un pequeño intervalo, y entonces se ve que surgen vivas chispas que pueden sucederse con bastante rapidez para producir una luz continua. Con ocho o diez pares de Bansen se obtienen brillantes penachos luminosos, haciendo comunicar uno de los electrodos con una escofina, y paseando el otro sobre los dientes de la misma.

Por la incandescencia de los conductores que atraviesan, ofrecen también las corrientes singulares efectos luminosos. Un alambre de hierro o de platino, que reúne los dos polos de una fuerte pila, y que es bastante grueso para no fundirse, se vuelve incandescente y desprende un vivísimo brillo mientras se halla en actividad la pila, y que a su vez está arrollado en espiral el alambre, aumenta el efecto luminoso.

Pero, sobre todo, haciendo comunicar los electrodos con dos conos de carbón de coke, bien calcinados ([fig. 483](#)), se obtiene un hermosísimo efecto de luz eléctrica. El carbón *b* está fijo, mientras el *a* puede subir o bajar más o menos, por medio de una barra dentada y de un piñón que la mano hace girar mediante un botón *c*. Puestos primero en contacto los dos carbones, se hace pasar la corriente y al instante el punto de contacto adquiere un brillo deslumbrador, que se extiende poco a poco a cierta distancia de las puntas de carbón. Entonces se puede levantar el superior sin que se interrumpa la corriente, pues recomponiéndose las dos electricidades en el intervalo que separa los carbones, se halla ocupado este espacio por un arco luminoso sumamente brillante, denominado *arco voltaico*.

La longitud de este arco varía con la fuerza de la corriente, pudiendo llegar a unos 7 centímetros, con una pila de 600 pares dispuestos en seis series paralelas, de 100 cada una, cuando el carbón positivo está arriba; pues si se encuentra abajo, entonces es unos dos centímetros más corto. En el vacío la distancia entre los dos carbones puede ser mucho mayor que en el aire; en efecto no encontrando la electricidad resistencia, se proyecta de los dos carbones antes de que se hayan puesto en contacto. También puede

producirse en los líquidos el arco voltaico; pero en tal caso es menos largo y de menor brillo.

El arco voltaico goza de la propiedad, cuando se le presenta un poderoso imán, de ser dirigido por éste, lo cual es una consecuencia de la acción de los imanes sobre las corrientes (680).

Algunos físicos han considerado al arco voltaico como formado por una sucesión muy rápida de brillantes chispas; más, por lo general, se admite que depende de la corriente eléctrica, la cual va del polo positivo al negativo por medio de moléculas incandescentes, que son volatilizadas y trasportadas en el sentido de la corriente, es decir, del polo positivo al negativo. En efecto, cuanto más fácilmente desagrega la corriente los electrodos, tanto más se los puede separar sin interrumpirla. El carbón, que es una sustancia muy deleznable, es también el cuerpo que da un arco luminoso más largo.

Davy fue el primero que en Londres efectuó, en 1801, el experimento de la luz eléctrica por medio de dos conos de carbón y de una pila de artesa de 2000 pares, cuyas placas tenían cerca de 11 centímetros de lado. Servíase aquel físico de carbón de madera ligera, apagado de antemano en el estado incandescente en un baño de mercurio, el cual, penetrando en los poros del carbón, aumentaba su conductibilidad. Como el carbón de madera arde con mucha vivacidad en el aire, le era preciso operar en el vacío, y así se estuvo practicando durante largo tiempo, para lo cual se situaban los dos conos de carbón en un huevo eléctrico de llave ([fig. 456](#)). Hoy, que sólo se usa en esta clase de experimentos el carbón de coke, que proviene de los residuos de las retortas de la fabricación del gas del alumbrado, se evita la operación del vacío, porque dicho carbón es duro, compacto, y puede cortarse en barritas que arden muy lentamente en el aire. Cuando el experimento se efectúa en el vacío, no media combustión, pero continúan gastándose los carbones, lo cual demuestra que hay volatilización y transporte del carbón del polo positivo al negativo.

662. Experimento de M. Foucault. -Débese a M. Foucault un bonito experimento, que consiste en proyectar la imagen de los conos de carbón ([fig. 483](#)) sobre una placa, en la cámara oscura, por medio de lentes, en el momento en que se produce la luz eléctrica ([fig. 484](#)). Este experimento, que se hace por medio del microscopio foto-eléctrico, descrito ya ([fig. 358](#)), permite distinguir muy bien los dos carbones incandescentes, viéndose que el carbón positivo se ahueca y disminuye, mientras que el otro aumenta. Los glóbulos representados sobre los dos carbones provienen de la fusión de una corta cantidad de sílice contenida en el coke de que se forman los carbones. Cuando principia a pasar la corriente, el carbón negativo es el primero que se vuelve luminoso, pero el positivo es el de brillo más intenso; por eso se gasta más pronto, y ha de ser también un poco más grueso.

663. Regulador de la luz eléctrica. -Cuando se quiere aplicar la luz eléctrica al alumbrado, conviene que conserve la continuidad de brillo que ofrecen los demás sistemas de alumbrado. No basta que la corriente de la pila sea constante, sino que además es preciso que el intervalo de los carbones permanezca sensiblemente invariable, lo cual exige que puedan acercarse a medida que se gastan. Muchos aparatos se han propuesto para conseguirlo, siendo deudores del que vamos a describir a M. Duboscq.

En este regulador los dos carbones son movibles, pero con velocidades desiguales, sensiblemente proporcionales a su gasto, transmitiéndoles el movimiento un barrilete situado en el eje  $xy$  ([fig. 485](#)), el cual hace girar en el sentido de las flechas, dos ruedas  $a$  y  $b$ , cuyos diámetros guardan entre sí la relación de 1 es a 2, y que transmiten su movimiento a dos cremalleras  $C$  y  $C'$ . La primera origina el descenso del carbón positivo  $p$ , por medio de un vástago que resbala en la manga o cubo  $H$ , mientras que el segundo hace subir con una velocidad dos veces menor, el carbón negativo  $n$ . El botón  $y$  sirve para dar cuerda al barrilete, y al mismo tiempo para hacer que marche a mano el carbón positivo; el botón  $x$  pone a la par en movimiento el carbón negativo, también a la mano, e independientemente del primero. A este efecto, el eje de los dos botones  $x$  e  $y$  consta de dos partes, unidas únicamente una a otra por un rozamiento algo intenso: merced a esta disposición, al apretar entre los dedos el botón  $x$ , puede hacerse girar aisladamente el botón  $y$ , y por el contrario, al retener éste, conseguir que gire el otro. Cuando actúa el barrilete, el rozamiento es bastante intenso para arrastrar las dos ruedas  $a$  y  $b$  y las dos cremalleras.

Sentados estos particulares, cuando se ha establecido el contacto entre los dos carbones, se hace que llegue por el alambre  $E$  la corriente de una pila enérgica, de, 40 a 50 elementos por ejemplo. La corriente sube a  $H$ , desciende por el carbón positivo, después por el negativo, y se extiende por todo el aparato, sin pasar por la cremallera  $C$ , ni por el sostén de la derecha junto al borde del plato  $N$ , porque estas piezas se encuentran aisladas por discos de marfil situados en sus extremos inferiores. La corriente, por último, pasa al carrete  $B$ , que constituye el pie del regulador y vuelve a la pila por el alambre  $E'$ . El carrete se halla provisto interiormente de una manga o cubo de hierro dulce, que se imanta durante todo el trascurso del tiempo, durante el cual pasa la corriente por dicho carrete y que deja de imantarse al momento que termina su paso, siendo en último término este imán alternado o variable, el que constituye el regulador. Para que sea así, actúa por atracción sobre una armadura de hierro dulce  $A$ , abierta en su centro para permitir el paso de la cremallera  $C'$ , la cual se encuentra fija en el extremo de una palanca que bascula sobre dos puntos de apoyo  $mm$ , y transmite una ligera oscilación a una pieza  $d$ , que por medio de un tope  $i$ , hace engranar la rueda  $z$ , como puede verse en la [figura 486](#), dibujada según una escala mayor. Por el empleo de un husillo sin fin y de una serie de ruedas dentadas, se transmite la detención al barrilete, y como se mantienen fijas las cremalleras, acontece lo propio con los carbones. Esto es lo que sucede mientras que la imantación es bastante enérgica en el carrete, para mantener baja la armadura  $A$ ; pero a medida que van gastándose los carbones, aumenta el intervalo que los separa, la corriente va debilitándose sin dejar de pasar en forma de arco voltaico (661) y llega un momento en el cual la atracción del imán no puede equilibrar un resorte  $r$ , que tiende constantemente a elevar la armadura. En tal caso, asciende ésta, la pieza  $d$  hace desengranar el tope  $i$ , funciona el barrilete y los carbones se aproximan, pero sin llegar a estar en contacto, porque la corriente aumentando de intensidad, es atraída la armadura  $A$  y vuelven a encontrarse fijos los carbones. Como la separación de éstos solo varía entre límites muy restringidos, se obtiene con este aparato una luz regular y continua, hasta que los carbones se gastan por completo.

Con este regulador es con el que ha alumbrado M. Duboscq su aparato *fotogénico*, representado por la [figura 358](#), y repite con el mejor éxito todos los experimentos de óptica que se efectuaban antes con la luz solar.

664. Propiedades e intensidad de la luz eléctrica. -Esta luz posee las mismas propiedades químicas que la solar: determina la combinación de una mezcla de cloro y de hidrógeno, actúa químicamente sobre el cloruro de plata, y aplicada a la fotografía, ofrece magníficas pruebas notables por el matiz de los tonos; sin embargo, no puede aplicarse a la ejecución de los retratos, porque fatiga mucho la vista.

Proyectada al través de un prisma la luz eléctrica, ofrece un espectro semejante al solar (470), lo cual prueba que no es simple. Wollaston, y sobre todo Fraunhofer, han encontrado que el espectro de la luz eléctrica difiere del de las otras luces y del de la luz solar por la presencia de muchas rayas muy claras, de las que una, particularmente, que se encuentra en el verde, es de una claridad casi brillante, en comparación del resto del espectro. M. Wheatstone observó que, sirviéndose para electrodos de diferentes metales, se modifica el espectro y las rayas; y M. Despretz ha demostrado que las rayas brillantes son fijas e independientes de la intensidad de la corriente.

M. Masson, que ha estudiado de nuevo la luz eléctrica detalladamente, efectuando experiencias sobre la luz de la máquina eléctrica, sobre las del arco voltaico y el carrete de Buhmkorff (719), ha encontrado, en el espectro eléctrico, los mismos colores que en el solar, pero atravesados por bandas luminosas muy brillantes, del mismo matiz que el color en que están situadas; en cuanto a la posición de estas rayas y a su número, no dependen de la intensidad de la luz, sino de las sustancias entre las que se produce.

Con el carbón, las rayas son notables por su número y por su brillo; con el zinc, está caracterizado el espectro por un matiz verde-manzana muy desarrollada; con la plata se tiene un verde muy intenso; con el plomo, el color violeta es el que domina, y así sucesivamente con los diferentes metales.

Deseando averiguar M. Bunsen la intensidad de la luz eléctrica, trabajó con 48 pares, alejó los carbones 7 milímetros, y encontró que equivalía a la de 572 bujías. Pero se hizo este experimento con pares en los cuales era exterior el carbón, e interior el zinc, y los efectos que producían eran mucho menores que los de aquéllos en los cuales el carbón era interior (654). De consiguiente, la luz de 48 de estos últimos pares equivale a. mucho más de 572 bujías.

Los señores Fizeau y Foucault, que trataron de comparar la luz eléctrica con la solar, no compararon las cantidades de luz emitidas por estos dos focos, sino sus efectos químicos sobre el ioduro de plata de las placas daguerrianas; de modo que los resultados no dan a conocer la intensidad óptica de la luz eléctrica, sino su intensidad química.

Representando por 1000 la intensidad de la luz solar al medio día, encontraron los señores Fizeau y Foucault que la de 46 pares de Bunson (carbón interior) estaba representada por 235, y la de 80 pares sólo por 238. Resulta de estos números que la intensidad de la luz no crece de un modo notable con el número de los pares; pero la experiencia revela que aumenta en mucho con su superficie. En efecto, con tres series de 48 pares cada una, reunidas paralelamente de modo que sus polos positivos concurren en uno solo, lo mismo que sus negativos, lo cual equivale a triplicar las superficies (657), subió la intensidad a 385, a la hora de funcionar la pila; de modo que es más del tercio de la luz del sol.

M. Despretz, en sus numerosos experimentos sobre la pila, observa que debe ponerse particular esmero en preservarse de sus efectos luminosos, si son algo intensos. La luz de 100 pares puede, según este físico, causar enfermedades muy agudas en la vista; y con 600, un solo instante basta para que la luz produzca dolores muy violentos en la cabeza y en los ojos, quedando tostada la cara como por los rayos del sol. Por eso es indispensable, durante estos experimentos, usar anteojos con cristales de un azul oscuro.

665. Efectos mecánicos de la pila. -Con este nombre se designan los trasportes de materias sólidas o líquidas que originan las corrientes: por ejemplo, en la formación del arco voltaico (661), hemos visto que hay transporte de moléculas de carbón, del polo positivo al negativo, lo cual constituye un efecto mecánico.

Porret fue quien por primera vez observó el transporte de los líquidos por las corrientes, en el experimento que sigue: habiendo dividido un vaso de vidrio en dos separaciones, por medio de una pared permeable que consistía en la membrana de una vejiga, vertió en ellas agua hasta establecer un nivel común, e introdujo dos electrodos de platino, que comunicaban con los polos de una pila de 80 elementos. Hecho esto, resultó que al mismo tiempo que se había descompuesto el agua, una parte del líquido fue transportada, en el sentido de la corriente, al través de la membrana, desde la cavidad positiva a la negativa, en la cual se elevó el nivel sobre el de la otra cavidad. Esta experiencia no obtiene un éxito favorable si se emplea agua que tenga en disolución una sal o un ácido, porque entonces no presenta el líquido bastante resistencia a la corriente.

También pueden referirse a los efectos mecánicos de las corrientes los sonidos que emite una varilla de hierro dulce, cuando se le somete a la acción magnética de una corriente discontinua, fenómeno que describiremos más adelante (701).

666. Efectos químicos de la pila, descomposición del agua, electrólitos. -Se ha visto ya que los efectos químicos de la pila dependen más del número de los pares que de su tamaño, porque en las descomposiciones químicas, ejerciéndose la acción de la corriente sobre sustancias poco conductoras, es necesario aumentar la tensión, y de consiguiente, el número de los pares.

La primera descomposición operada por la pila fue la del agua, obtenida en 1800 por los dos ingleses Carlisle y Nicolson, con una pila de columna: 4 o 5 pares de Bunsen bastan para descomponer el agua con rapidez; pero ésta debe contener en disolución una sal o un ácido que aumente su conductibilidad, pues si es pura, se produce con muchísima lentitud la descomposición. La figura 487 representa el aparato que sirve para descomponer el agua por la pila, y para recoger el oxígeno y el hidrógeno que se desprenden. Se compone de una vasija cónica de vidrio masticada en un pie de madera, y en su fondo se elevan dos alambres de platino *h*, y *n*, que comunican con dos tornillos de presión, de cobre, fijos en los lados del aparato y destinados a recibir los electrodos de la pila. Se llena la vasija de agua ligeramente acidulada; se aplican sobre los alambres de platino dos campanitas llenas de agua, y en seguida se establece la corriente. Al instante se descompone el agua en oxígeno y en hidrógeno, que se desprenden bajo la forma de burbujas en las campanas. Se observa entonces que, la campana positiva se llena de oxígeno, y la negativa de hidrógeno; y además, el volumen de este último gas es duplo del primero. Este experimento da, pues, a la vez los análisis cualitativo y cuantitativo del agua.

Las sustancias que, como el agua, se descomponen por la corriente, y cuyos elementos se separan completamente, han recibido de Faraday el nombre de *electrólitos*, y se ha denominado *electrolización* o *electrólisis* al hecho mismo de la descomposición por la corriente voltaica.

667. Voltámetro, ley de Faraday. -M. Faraday ha aplicado el aparato que acabamos de describir a la descomposición del agua ([fig. 487](#)), habiéndole dado el nombre de *voltámetro*, porque lo ha utilizado para medir la intensidad de las corrientes poderosas, así como sirve el galvanómetro para medir la de las pequeñas. El uso del voltámetro se halla fundado en el siguiente principio, descubierto por M. Faraday, en las descomposiciones electro-químicas: *la cantidad, en peso, de los elementos separados, es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa en la corriente*. Por lo tanto, en el experimento anterior, el volumen de los gases recogidos puede servir para medir la intensidad química de la corriente.

Con todo, obsérvese que la cantidad de gas que se produce por la descomposición del agua, depende, no sólo de la intensidad de la corriente, sino también a el grado de acidez del agua, de la naturaleza, del tamaño y de la distancia de los alambres o de las láminas que se introducen en el líquido para transmitirle la corriente. Debe procurarse, pues, usar siempre el mismo aparato, o aparatos enteramente semejantes, pues de lo contrario no son comparables los resultados.

El voltámetro que acabamos de describir es un *voltámetro químico*, pero también se han ideado *voltámetros caloríficos* que miden la intensidad de las corrientes por la cantidad de calor que desprenden en los circuitos sólidos o líquidos que recorren. Pero todos estos voltámetros, así químicos como caloríficos, distan mucho de ser instrumentos de precisión. El mejor de todos los aparatos adecuados para comparar la intensidad de las corrientes es el *galvanómetro*, que describiremos en breve.

668. Descomposición de los óxidos metálicos y de los ácidos. -Las corrientes ejercen sobre los óxidos metálicos la misma acción que sobre el agua, reduciéndolos todos, y marchándose el oxígeno al polo positivo, y el metal al negativo. Por medio de corrientes muy poderosas descompuso Davy por vez primera, en 1807, la potasa y la sosa, colocándolas en la clase de los óxidos metálicos. Hasta entonces se habían resistido estos óxidos a todos los agentes químicos, y aún hoy día tan sólo la pila llega a descomponer algunos, como son la barita, la estronciana y la cal.

Los oxácidos son descompuestos de la misma manera que los óxidos, marchándose siempre el oxígeno al polo positivo, y el radical al negativo. Lo propio les sucede a los hidrácidos; pero el radical va al positivo y el hidrógeno al negativo.

En general, los compuestos binarios se comportan de un modo análogo bajo la influencia de la pila, pues uno de los elementos se dirige al polo positivo y el otro al negativo. En las descomposiciones efectuadas así por la pila, los cuerpos simples que se dirigen hacia el polo positivo han recibido el nombre de cuerpos *electro-negativos*, porque se les considera como cargados naturalmente de electricidad negativa; y los que van al polo negativo se han denominado *electro-positivos*. El oxígeno, en todas sus combinaciones, es constantemente electro-negativo, y el potasio electro-positivo; pero los demás cuerpos simples son, ya electro-positivos, ya electro-negativos, según los

cuerpos con los cuales se combinan. El azufre, por ejemplo, es electro-positivo con el oxígeno, y electro-negativo con el hidrógeno.

669. Descomposición de las sales. -Las sales ternarias, en el estado de disolución, se descomponen todas por la pila, y presentan entonces efectos que varían con las afinidades químicas y con la energía de las corrientes. Si el ácido y la base de la sal son estables, se separan simplemente, y entonces el ácido va siempre al polo positivo, y el óxido al negativo, conforme sucede con los sulfatos, los carbonatos y los fosfatos de los metales de las dos primeras secciones. Si el ácido es poco estable, se descompone y su oxígeno es el único que va al polo positivo. Con un óxido débil, el metal reducido se dirige sólo al polo negativo, mientras que el ácido y el oxígeno se acumulan en el positivo, según se observa en las sales de plomo, de cobre, de plata, y en general, en las de las tres últimas secciones. Por fin, si quedan completamente reducidos el ácido y el óxido, su oxígeno va por completo al polo positivo, y los dos radicales al otro polo.

Demuéstrase la descomposición de las sales por la pila, con un tubo de vidrio encorvado ([fig. 488](#)), en el cual se vierte una disolución de sulfato de potasa o de sosa, coloreada de azul con jarabe de violeta. Introducidas en las ramas del tubo dos láminas de platino, se ponen éstas en comunicación con los electrodos de la pila. A los pocos minutos, si se hace uso de tres o cuatro pares de Bunsen, se nota que la rama positiva A se colora de rojo, y la negativa B de verde, lo cual demuestra que el ácido de la sal se dirige al polo positivo, y la base al negativo; porque se sabe que el jarabe o tintura de violeta tiene la propiedad de enrojarse por la acción de los ácidos, y de enverdecerse por las bases.

En este experimento, si la corriente es algo intensa, además de la descomposición de la sal, se observa un desprendimiento de oxígeno en el polo positivo, y de hidrógeno en el polo negativo, lo cual indica que hay también descomposición de agua por la corriente; y todavía se puede explicar, admitiendo que el óxido de potasio o de sodio, siendo descompuesto, su oxígeno marcha al polo positivo, mientras que el metal, reaccionando sobre el agua, se apodera de su oxígeno y deja al hidrógeno en libertad.

La descomposición de las sales por la pila ha recibido importantes aplicaciones en la galvanoplastia, en el dorado y en el plateado, operaciones que no tardaremos en describir (672).

670. Anillos de Nobili. -Descomponiendo las sales por la pila, obtuvo Nobili, sobre placas metálicas, anillos con tintas sumamente brillantes. La coloración de estos anillos que resultan de capas metálicas muy delgadas que se depositan sobre las placas se explicaron la teoría de los anillos coloreados de Newton (536). Para obtenerlos, se coloca en el fondo de una disolución de acetato de plomo o de sulfato de cobre una placa metálica que comunica con el polo negativo de una débil pila; luego se cierra la corriente con un alambre de platino, que se une con el polo positivo, y se introduce en la disolución perpendicularmente a la placa, de modo que se acerque muchísimo a ella. Deposítanse entonces delante, de la punta anillos dotados de una coloración muy viva, que varía con la sal en disolución y con la naturaleza de las placas.

671. Árbol de Saturno. -Cuando se sumerge en una disolución salina un metal más oxidable que el de la sal, el metal de esta última es precipitado por el que se ha sumergido, y se deposita sobre él lentamente, siendo sustituido por el mismo, equivalente por equivalente. Atribúyese esta precipitación de un metal por otro, en parte

a las afinidades, y en parte a la acción electro-química de una corriente que tiene su origen en el contacto de los metales precipitante y precipitado; o más bien en la acción del ácido contenido en la disolución, pues se ha observado que es preciso que sea esta última ligeramente ácida. El exceso de ácido libre actúa entonces sobre el metal precipitante, y determina la corriente que descompone la sal.

El *árbol de Saturno* es un efecto notable de la precipitación de un metal por otro. Así se denomina una serie de ramificaciones brillantes que se obtienen con el zinc en las disoluciones de acetato de plomo. Para conseguirlo, llénase un frasco de vidrio de una disolución bien clara de esta sal, luego se le cierra con un tapón de corcho, al cual está fijo un pedazo de zinc, en contacto con alambres de latón que se introducen, divergiendo, en la disolución. Abandónase a sí mismo el frasco herméticamente cerrado. A los pocos días le depositan brillantes pajitas de plomo cristalizado sobre los alambres de latón, simulando una vegetación que se ha designado con el nombre de *árbol de Saturno*, por ser éste el que daban al plomo los antiguos alquimistas. Se designa también con el nombre de *árbol de Diana* el depósito metálico que produce el mercurio en el nitrato de plata.

▽△

## Galvanoplastia; dorado y plateado

672. Galvanoplastia. -La descomposición de las sales por la pila ha recibido una importante aplicación en la *galvanoplastia*, o sea el arte de modelar los metales precipitándolos de sus disoluciones salinas por la acción lenta de una corriente eléctrica. Inventaron casi simultáneamente este arte M. Spencer, en Inglaterra, y M. Jacobi, en Rusia, en el año 1838; pero al parecer es su verdadero inventor M. Jacobi. (Véase el *Cosmos* del 9 de mayo de 1860, página 261).

Cuando se quiere reproducir una medalla o cualquier otro objeto por medio de la galvanoplastia, es preciso antes que todo procurarse del mismo un molde en hueco, sobre el cual pueda depositarse la capa metálica que debe reproducir en relieve la medalla. Si ésta es de metal, el procedimiento más sencillo para formar el molde, consiste en valerse de la aleación fusible de d'Arcet, compuesta de 5 partes de plomo, 8 de bismuto y 3 de estaño. Se vierte esta aleación fundida en una copita, y cuando va a solidificarse se deja caer de plano la medalla de una pequeña altura, procurando en seguida que esté completamente inmóvil. Luego que está fría la aleación, basta un ligero choque para que se desprenda de ella la medalla. Rodéase entonces el molde con un alambre de cobre que le ponga en comunicación con el polo negativo de la pila, y se cubre después su contorno y su cara posterior, con una débil capa de cera fundida, a fin de que el depósito metálico no se precipite más que sobre la misma impresión.

Para reproducir en cobre una medalla, se toma una cuba llena de una disolución saturada de sulfato de cobre, y puestas encima dos barras de latón B y D ([fig. 489](#)), que comunican, una con el polo negativo y la otra con el positivo de un par de Bunsen se suspende de la primera el molde *m*, y de la otra una lámina de cobre C. Cerrada así la corriente, se descompone el sulfato de cobre: su ácido y el oxígeno del óxido van al polo positivo, mientras que sólo el cobre va al negativo, depositándose lentamente sobre

el molde *m*. De esta manera, pueden suspenderse muchos moldes a la vez. A las cuarenta y ocho horas está cubierto el molde por una capa de cobre sólida y resistente, pero no adherente. Sin embargo, para impedir por completo la adherencia, es preciso antes de la operación impregnar el molde con un cepillo fino, aplicado muy ligeramente encima de un cuerpo graso, o pasarle rápidamente por una llama resinosa que deje en él un depósito de materia extraña.

Si la medalla que se va a reproducir es de yeso, no puede hacerse su molde en aleación de d'Arcet. Entonces se la introduce en un baño de estearina fundida a 70 grados, y retirando en seguida la medalla se seca casi instantáneamente, lo cual proviene de que la estearina penetra en los poros del yeso. Enfriado este último, se cubre con plombagina, frotándole con un cepillo suave impregnado de esta sustancia; luego se rodea con una tira de cartón, y se vierte encima estearina tibia, la cual al solidificarse reproduce fielmente en hueco la medalla primitiva. Formado así el molde, no es adherente al yeso, a causa de la capa de plombagina depositada encima, se quita se le da también una capa de plombagina para transformarle en conductor. Y este molde, así metalizado, se suspende por un alambre de cobre del polo negativo de la pila, según hemos dicho antes.

Se hacen también muy buenos moldes con la guta-percha. Para lograr este resultado, se principia cubriendo con plombagina el objeto, a fin de que no se adhiera a la guta-percha; y luego, elevando la temperatura por medio del agua caliente, de cierta cantidad de esta sustancia hasta que se reblandezca, se aplica sobre la pieza que ha de reproducirse, sometiéndola a una presión algo intensa. Después de haberse enfriado, se despega la guta-percha que es poco adherente, y entonces se tiene sobre esta sustancia una impresión en hueco muy fiel del objeto. Sólo falta dar al molde una capa de plombagina para que se vuelva conductor, conforme se hace con la estearina. Suspendiéndolo del polo negativo de la pila en una disolución concentrada de sulfato de cobre, se obtiene a las cuarenta y ocho horas una reproducción en cobre del objeto en cuestión.

La placa de cobre C, puesta en el polo positivo, reconoce por objeto, no sólo cerrar la corriente, sino también mantener la disolución en un estado constante de concentración; y en efecto, el ácido y el oxígeno que van al polo positivo se combinan con el cobre de la placa, y reproducen constantemente una cantidad de sulfato de cobre igual a la que descompone la corriente.

Para la galvanoplastia se prefiere, en general, la pila de Daniell (652), a causa de la uniformidad de su efecto; pero se trabaja también perfectamente con un solo par de Bunsen, sobre todo con el modelo antiguo, que es más débil, si bien hay que acidular muy poco el agua en la cual se introduce el zinc.

673. Dorado galvánico. -Antes de conocer la descomposición de las sales por la pila, se doraba por medio del mercurio. Amalgamábase este metal con el oro, y luego se aplicaba la amalgama sobre la pieza que había que dorar; elevando entonces en un horno la temperatura, se volatilizaba el azogue, no quedando más que el oro en forma de una capa muy delgada sobre los objetos dorados. Igual procedimiento se seguía para el plateado; pero, como es costoso e insalubre, se ha sustituido generalmente hoy día por el dorado y plateado galvánicos. El dorado por medio de la pila sólo difiere de la galvanoplastia, en que la capa metálica que logra depositarse sobre los objetos que hay

que dorar, es mucho más delgada y más adherente. Brugnatelli, discípulo de Volta, fue, al parecer, el primero que en 1803 observó que se podía dorar con una pila y una disolución alcalina; pero en realidad es M. de la Rive quien aplicó la pila al dorado. Los señores Elkington, Ruolz y otros físicos han ido perfeccionando luego los procedimientos del dorado y del plateado.

Las piezas que van a dorarse deben experimentar tres preparaciones, que son el *recocido*, el *raspado* y la *limpiadura*.

Consiste el recocido en calentar las piezas para quitarles las materias grasas de las cuales han podido impregnarse en los trabajos a que anteriormente se han sometido.

Como las piezas que se han de dorar suelen ser ordinariamente de cobre, su superficie, durante el recocido, se cubre de una capa de protóxido y de bióxido de cobre que se debe separar por medio del raspado. Introdúcense al efecto las piezas, aún calientes, en un baño de ácido nítrico muy diluido en agua, en el cual se mantienen bastante tiempo, para que el óxido se desprenda. Después se frotan con un cepillo fuerte, se lavan en agua destilada y se secan con aserrín algo caliente.

Después de estas operaciones las piezas presentan un aspecto irisado, y para quitarles todas las manchas, resta aún someterlas a la *limpiadura*; operación que consiste en sumergirlas rápidamente en un baño de ácido nítrico común, después en una mezcla de este mismo ácido, de sal marina y de hollín, lavándose finalmente en agua pura.

Preparadas ya las piezas, se las suspende del electrodo negativo de una pila formada de tres o cuatro pares de Daniell o de Bunsen, y se las sumerge en un baño de oro, disponiéndolas como para la galvanoplastia ([fig. 489](#)). Permanecen así en el baño más o menos tiempo, según el espesor que quiera darse al depósito.

Se ha variado mucho la composición de los baños; pero el que más se usa, consta de 1 gramo de cloruro de oro y de 10 de cianuro de potasio, disueltos en 200 gramos de agua. Para mantener el baño a un grado constante de concentración, se suspende del electrodo positivo una lámina de oro, que se disuelve a medida que la disolución deposita su oro sobre las piezas que comunican con el polo negativo.

El procedimiento que acabamos de describir se aplica perfectamente para dorar, no sólo el cobre, sino también la plata, el bronce y el latón; y en cuanto a los otros metales, como el hierro, el acero, el zinc, el estaño y el plomo, se doran mal. Para obtener un buen dorado, hay que darles primero una capa de cobre por medio de la pila y de un baño de sulfato cúprico, y en seguida se dora esta capa de cobre.

674. Plateado. -Todo cuanto acaba de leerse acerca del dorado galvánico se aplica exactamente al plateado, no existiendo más diferencia que en la composición del baño, que consta de 2 gramos de cianuro de plata y 10 de cianuro de potasio, disueltos en 250 de agua. Del electrodo positivo está suspendida una placa de plata que impide que se empobrezca el baño, y en el negativo se encuentran, muy limpias, las piezas que hay que platear.

## Capítulo III

### Electro-magnetismo; galvanometría

675. Experimento de Oersted. -Oersted, profesor de física de Copenhague, dio a conocer, en 1819, un descubrimiento que aunó íntimamente desde entonces el magnetismo y la electricidad, y que en breve fue en manos de Ampere y de M. Faraday, el origen de una nueva parte de la física. El hecho que Oersted descubrió es la acción directriz que una corriente fija ejerce a distancia sobre una aguja móvil imantada. Poco después se observó que, recíprocamente, un imán fijo ejerce una acción directriz sobre una corriente móvil, y se dio el nombre de *electro-magnetismo* a la parte de la física que trata de las acciones mutuas que surgen entre los imanes y las corrientes.

Para hacer el experimento de Oersted, se sitúa horizontalmente, en la dirección del meridiano magnético, un alambre de cobre encima de una aguja imantada móvil ([fig. 490](#)). Mientras no atraviesa el alambre una corriente, permanece paralela a él la aguja; mas apenas las extremidades del alambre comunican con los electrodos de una pila, *la aguja se desvía y tiende tanto más a tomar una dirección perpendicular a la corriente, cuanto más intensa es ésta.*

En cuanto al sentido que aceptan los polos, se presentan muchos casos, que a su tiempo reduciremos a un principio único. Recordemos primero el convenio ya establecido (640) de admitir que la corriente va siempre en el alambre conjuntivo del polo positivo al negativo. El experimento anterior ofrece los cuatro casos siguientes:

1.º Si la corriente pasa por encima de la aguja y va del sur al norte, el polo austral se desvía hacia el oeste, y esta disposición es la que la que señala la [figura 490](#); 2.º si la corriente pasa por debajo de la aguja, siempre del sur al norte, el polo austral se desvía al este; 3.º cuando la corriente pasa por encima de la aguja, en la dirección de norte a sur, el polo austral se desvía hacia el este, y 4.º, por último, la desviación se verifica hacia el oeste, caso de que la corriente vaya también de norte a sur, pero por debajo de la aguja.

Si se concibe, según lo hizo Ampere, un observador situado en el alambre conjuntivo, de modo que la corriente que entre por los pies salga por la cabeza, y que la cara esté dirigida constantemente hacia la aguja, se reconoce con facilidad que, en las cuatro posiciones que acabamos de considerar, el polo austral se desvía hacia la izquierda del observador. Personificada así la corriente, pueden reasumirse los diferentes casos antes considerados, en el enunciado de este principio general: *En la acción directriz de las corrientes sobre los imanes, se desvía constantemente el polo austral hacia la izquierda de la corriente.*

676. Galvanómetro o multiplicador. -Denomínase *galvanómetro*, *multiplicador* o *rheómetro*, un aparato sumamente sensible, que sirve para comprobar la existencia, el sentido y la intensidad de las corrientes. Este aparato fue ideado por Schweigger, en Alemania, poco después del descubrimiento de Oersted.

Para comprender su principio, consideremos una aguja imantada suspendida de un hilo de seda sin torsión ([fig. 491](#)), y rodeada, en el plano del meridiano magnético, de un alambre de cobre que forma un circuito completo alrededor de la aguja, en el sentido de su longitud. Cuando se halla atravesado este alambre por una corriente, resulta del convenio establecido en el párrafo anterior, que, en todas las artes del circuito, un observador, tendido en la dirección del alambre, en el sentido de las flechas, y mirando la aguja *ab*, tendría la izquierda vuelta hacia el mismo punto del horizonte, y de consiguiente, que por todas partes la acción de la corriente tiende a hacer girar la aguja en el mismo sentido. Es decir, que las acciones de las cuatro ramas del circuito concurren para dar al polo austral la misma dirección. Arrollando el alambre de cobre en el sentido de la aguja, como indica la figura, se ha *multiplicado*, pues, la acción de la corriente. Si en vez de una sola vuelta existen muchas, se multiplica más la acción y aumenta la desviación de la aguja. Sin embargo, no se multiplicaría indefinidamente la acción de la corriente continuando las circunvoluciones del alambre, pues pronto veremos que la intensidad de una corriente se debilita cuando aumenta la longitud del circuito que recorre.

Como la acción directriz de la tierra tiende sin cesar a mantener la aguja en el meridiano magnético, oponiéndose así a la acción de la corriente, se hace mucho más sensible el efecto de esta, sirviéndose de un sistema de dos agujas astáticas ([fig. 492](#)). Entonces es muy débil la acción de la tierra sobre las agujas (575), y además se aúnan las acciones de la corriente sobre las dos agujas. En efecto, la acción del circuito completo tiende, según el sentido que marcan las flechas, a desviar hacia el oeste el polo austral de la aguja inferior *ab*; y la superior *a'b'* está sometida a la acción de dos corrientes contrarias *mn* y *pq*; pero como la primera es la más próxima, su acción es superior. Pasando esta corriente por debajo de la aguja del polo austral al boreal, tiende evidentemente a hacer girar el polo *a'* hacia el este, y de consiguiente, el *b'* hacia el oeste, esto es, en el mismo sentido que el *a* de la otra aguja.

Sentados estos principios, es fácil darse cuenta de la teoría del *multiplicador*. Este aparato ([fig. 493](#)) consta de un bastidor D de cobre, alrededor del cual se arrolla un alambre del mismo metal, cubierto de seda en toda su longitud, a fin de aislar los circuitos entre sí. Encima de este bastidor existe un cuadrante horizontal graduado, cuyo cero corresponde al diámetro paralelo a la dirección del alambre de cobre debajo del bastidor: este cuadrante cuenta con dos graduaciones, una hacia la derecha y otra hacia la izquierda del cero, pero sólo hasta 90 grados. Por medio de un sostén y de un hilo elemental de seda sumamente fino se suspende un sistema astático (575) formado de dos agujas de coser *ab* y *A*, la primera encima del cuadrante, y la segunda en el mismo circuito. Estas agujas, que se hallan reunidas entre sí por un alambre de cobre, como las de la [figura 411](#), no pudiéndose desviar la una sin que también se desvíe la otra, no deben tener idénticamente la misma intensidad magnética, pues de lo contrario cualquiera corriente, fuerte o débil, las pondría siempre en cruz con él.

Los vástagos encorvados K y H, que comunican por la parte inferior del aparato con los dos extremos del circuito, reciben los conductores que transmiten la corriente que se

desea observar. Los tornillos C sirven para situar exactamente vertical el aparato, de modo que el hilo de suspensión corresponda precisamente al centro del cuadrante. Por fin, un botón E transmite el movimiento al marco D y al cuadrante que son móviles alrededor de su eje vertical, de modo que los alambres del circuito acepten la dirección del meridiano magnético, sin necesidad de tocar al aparato.

Cuando el galvanómetro sirve para observar corrientes que dependen de las acciones químicas, el alambre que se arrolla alrededor de las agujas ha de contar muy poco diámetro, y dar muchas revoluciones, de 600 a 800 por lo menos. El número de vueltas asciende frecuentemente a dos o tres mil, y para experimentos muy delicados ha llegado hasta 30,000. Para las corrientes termo-eléctricas, que más adelante describiremos, el alambre debe ser más grueso y efectuar un número menor de vueltas, es decir, unas 200 o 300 tan sólo. Por último, cuando se trata de corrientes intensas, sirven galvanómetros de una sola aguja, y el alambre da muy pocas vueltas, a veces sólo una. El galvanómetro más sencillo es entonces una brújula, por encima de la cual pasa un alambre de cobre dirigido en el sentido del meridiano magnético para recibir la corriente cuya intensidad se busca.

El galvanómetro que acabamos de describir no acusa ninguna corriente, cuando se hace pasar por el alambre la electricidad de una máquina eléctrica, poniendo en comunicación uno de los extremos con los conductores, y el otro con el suelo. Sólo se hace sensible la corriente que pasa entonces por el aparato, empleando un alambre, muy fino arrollado hasta dos o tres mil veces sobre sí mismo, y aislando completamente entre sí los circuitos por medio de seda y de barniz hecho con goma laca. Con estas condiciones, la electricidad de la máquina eléctrica desvía las agujas, lo cual demuestra la identidad de la electricidad estática con la dinámica.

677. Graduación del galvanómetro. -El galvanómetro, tal cual acabamos de describirle, es un aparato sumamente sensible para comprobar la presencia de las corrientes, pero no da a conocer su intensidad. Para conseguirlo hay que construir tablas, por medio de las cuales pueda deducirse, de la desviación de la aguja, la intensidad de la corriente.

El método más sencillo para formar estas tablas es el del *multiplicador de dos alambres*. Arróllanse simultáneamente, en el bastidor del aparato, dos alambres de cobre cubiertos igualmente de seda, e idénticos en longitud y en diámetro; y eligiendo luego un foco de electricidad dinámica constante, pero muy débil, se hace pasar la corriente por uno de los alambres, lo cual da cierta desviación, 5 grados por ejemplo. En seguida, por medio de un foco eléctrico idéntico al primero, se hace pasar al mismo tiempo por cada alambre una corriente de igual intensidad, obteniéndose otra desviación, 10 grados, por ejemplo, que procede de la acción simultánea de las dos corrientes, o lo que es lo mismo, de una corriente dos veces más intensa que la primera. Si se hace pasar después por uno de los alambres una corriente capaz de producir por sí sola la desviación 10, y en el otro una de las que produjeron la desviación 5, lo cual equivale evidentemente, a una corriente triple de la primera, se obtiene la desviación 15. En fin, haciendo pasar por cada uno de los alambres a la vez una corriente capaz de dar la desviación 10, se observa una de 20 grados. Es decir, que *hasta 20 grados, las desviaciones crecen proporcionalmente a la intensidad de la corriente*. Pasado este término crecen con menos rapidez; pero, empleando el mismo procedimiento, siguen determinándose, de distancia en distancia, las desviaciones correspondientes a intensidades conocidas, y luego se termina la tabla por el método de las interpolaciones. Cada galvanómetro exige

una tabla particular, porque la relación entre la intensidad de la corriente y la desviación de la aguja varía con el grado de imantación de ésta, con su longitud, con su distancia de la corriente, y por último, con la longitud del circuito.

Supuesto que hasta 20 grados las desviaciones son sensiblemente proporcionales a las intensidades, se puede, en el caso de un galvanómetro de un solo alambre apoyarse en esta propiedad para medir hasta dicho límite las intensidades por medio de las desviaciones. Para pasar adelante sería preciso construir una tabla fundándose en las desviaciones producidas por corrientes cuya intensidad fuese conocida, y calculando en seguida, por interpolación, las intensidades correspondientes a las desviaciones intermedias.

El multiplicador de dos alambres puede servir también para medir la diferencia de intensidad de dos corrientes, lo cual se obtiene haciendo pasar simultáneamente, en sentido contrario, una por cada alambre. El aparato se denomina en este caso *galvanómetro diferencial*

678. Usos del galvanómetro. -Por su extrema sensibilidad, es el galvanómetro uno de los instrumentos más preciosos de la física. No sólo sirve para comprobar la presencia de las corrientes, sino también para conocer su dirección y su intensidad. Con este aparato pudo cerciorarse M. Becquerel de que hay desprendimiento de electricidad en todas las combinaciones químicas, y determinan las leyes que presiden a estas combinaciones.

Por ejemplo, si se fijan en las extremidades del circuito del galvanómetro dos alambres de platino, y si se introducen éstos en una cápsula llena de ácido nítrico, no se nota desviación alguna en la aguja, lo cual podía preverse fácilmente, supuesto que aquel ácido no ataca al platino. Pero si se vierte una gota de ácido clorhídrico cerca de uno de los alambres sumergidos, al instante se desvía la aguja del galvanómetro, dando a entender que, una corriente atraviesa al circuito. En efecto, sabido es que por su reacción mutua dan origen los ácidos nítrico y clorhídrico al ácido cloro-nítrico o *aguja regia*, que ataca al platino. Se reconoce, además, por el sentido de la desviación, que el platino está electrizado negativamente, y el ácido positivamente.

679. Leyes de las acciones de las corrientes sobre los imanes. -Las acciones que las corrientes ejercen sobre los imanes son de dos especies, directriz una, y atractiva o repulsiva la otra. Sabemos ya (675) que la acción directriz de una corriente sobre un imán consiste en que *la corriente tiende siempre a poner al imán en cruz con ella, y con su polo austral a la izquierda de un observador que estuviese echado en la dirección de la corriente, de manera que, mirando al imán, entrase la corriente por los pies y saliese por la cabeza.*

La intensidad de la acción directriz de las corrientes sobre la aguja imantada varía con la distancia. En virtud del número de oscilaciones de la aguja, a distancias desiguales, bajo la influencia de una corriente rectilínea, han encontrado los señores Biot y Savart que *la intensidad de la resultante de las acciones directrices de todas las partes de la corriente sobre la aguja, está en razón inversa de la simple distancia.*

Compruébase la acción atractiva o repulsiva de las corrientes sobre los imanes, suspendiendo verticalmente por una de sus extremidades una aguja de coser imantada,

de un hilo de seda muy fino. Se hace pasar luego muy cerca de esta aguja una corriente horizontal, observándose entonces, según la dirección de ésta, atracciones o repulsiones que se explican por la acción de las corrientes sobre los solenoides, cuando se comparan con éstos los imanes, conforme lo efectuó Ampere en una teoría que en breve expondremos (598).

▽△

## Acciones de los imanes y de la tierra sobre las corrientes

680. Acción directriz de los imanes sobre las corrientes. -La acción directriz entre las corrientes y los imanes es recíproca. En el experimento de Oersted ([fig. 490](#)) es móvil la aguja imantada y fija la corriente, y por lo mismo, aquélla es la que se dirige y pone en cruz con ésta. Si, por el contrario, está fijo el imán y es móvil la corriente, ésta se dirige y va a ponerse en cruz con el imán, ocupando siempre la izquierda el polo austral. Para demostrar este principio, se dispone, el experimento según indica la [figura 494](#). El circuito que recorre la corriente es móvil, y por debajo de su rama inferior se acerca una poderosa barra imantada: al instante principia aquél a girar; pero a las pocas oscilaciones se para en un plano perpendicular al imán, de modo que el polo austral de éste se encuentra a la izquierda de la corriente en la parte inferior del circuito.

681. Acción directriz de la tierra sobre las corrientes verticales. -La tierra, que ejerce una acción directriz sobre los imanes (566), obra también sobre las corrientes, imprimiéndolas, ya una dirección determinada, ya un movimiento, continuo de rotación, según posean las corrientes una dirección vertical u horizontal.

La primera de estas dos acciones, la que ofrece por resultado dirigir las corrientes, puede formularse así: *Toda corriente vertical móvil alrededor de un eje que le es paralelo, va a colocarse, bajo la influencia de la acción directriz de la tierra, en un plano perpendicular al meridiano magnético, y se detiene a las pocas oscilaciones, al este de su eje de rotación, cuando es descendente, y al oeste cuando es ascendente.*

Experimentalmente se comprueba este hecho por medio de un aparato formado de dos vasijas de cobre *a* y *K* ([fig. 495](#)), de tamaño desigual. La mayor *a*, que tiene unos 30 centímetros de diámetro, cuenta en su centro con una abertura por la cual pasa una columna de latón *b*, aislada de la vasija *a*, pero en comunicación con la *K*. Esta columna termina según una capsulita, en la cual descansa por un eje una ligera varilla de madera, en una de cuyas extremidades se arrolla un alambre fino de platino *ce*, que tiene introducidas sus dos puntas en el agua acidulada de ambas vasijas.

Llegando la corriente por el alambre *m* en la dirección de las flechas, pasa por una lámina de cobre que, por debajo de la tabla que sostiene todo el aparato, va a soldarse con el pie de la columna *b*. Sube entonces la corriente por esta columna, llega a la vasija *K* y a su agua acidulada, pasa por el alambre *c*, baja por el *e*, y dirigiéndose por las paredes de la vasija *a* al través de su agua acidulada, termina en el alambre *n*, que la vuelve a la pila.

Cerrada así la corriente, se nota que el alambre  $e$  se mueve alrededor de la columna  $b$ , parándose al este de ella cuando es descendente, como en nuestro dibujo; pero si es ascendente, lo cual se obtiene haciendo llegar la corriente de la pila por el alambre  $n$ , el  $e$  se para al oeste de  $b$ , en una posición diametralmente opuesta a la del caso anterior.

Si a la varillita de madera de un solo alambre de la [figura 495](#), se sustituye la de dos alambres de la [figura 496](#), ya no se dirige, como era fácil preverlo, supuesto que, tendiendo cada alambre a colocarse al este de la columna  $b$ , se producen dos efectos iguales y de dirección contraria, que se equilibran.

682. Acción de la tierra sobre las corrientes horizontales móviles alrededor de un eje vertical. -La acción de la tierra sobre las corrientes horizontales no consiste ya en dirigir las, sino *en comunicarlas un movimiento de rotación continuo del este al oeste, pasando por el norte, cuando la corriente horizontal se aparta del eje de rotación, y del oeste al este, cuando se dirige hacia este eje.*

Esta acción sobre las corrientes horizontales se demuestra por medio del aparato de la [figura 497](#), que sólo difiere del de la [495](#) en que no hay más que una vasija. La corriente sube por la columna  $a$ , pasa por los dos alambres  $cc$ , y baja por los  $bb$  para volver a la pila. Entonces, el circuito  $bccb$  se pone a girar con movimiento continuo del este al oeste o del oeste al este, según en los alambres  $cc$  se aleje la corriente del centro, como en nuestro grabado, o se acerque, lo cual se consigue haciendo llegar por el alambre  $m$ , y no por el  $n$ , la corriente de la pila.

Sabemos (681) que queda destruida la acción de la tierra sobre los alambres verticales  $bb$ ; luego la rotación de las ramas horizontales  $cc$  depende de su acción.

683. Acción directriz de la tierra sobre las corrientes cerradas, móviles alrededor de un eje vertical. -Si la corriente sobre la cual obra la tierra está cerrada, sea rectangular, sea circular, ya no se produce un movimiento continuo de rotación, sino una acción directriz, como en el caso de las corrientes verticales (681), en virtud de la cual *la corriente va a situarse en un plano perpendicular al meridiano magnético, de modo que sea descendente al este de su eje de rotación, para un observador que mire al norte, y ascendente al oeste.*

Esta propiedad, que se comprueba por medio del aparato de la [figura 498](#), es una consecuencia de lo que hemos manifestado respecto a las corrientes horizontales y verticales. En efecto, dedúcese de esto que en el circuito cerrado  $ADB$ , la corriente en las partes superior e inferior tiende a girar en sentido contrario, según la ley de las corrientes horizontales (682), y por lo tanto hay equilibrio; mientras que en las partes laterales tiende a situarse la corriente por un lado al este y por otro al oeste, en virtud de la ley de las corrientes verticales (681).

A causa de la acción directriz de la tierra sobre las corrientes, es necesario, en la mayor parte de los experimentos que a ellas se contraen, sustraerlas de dicha acción. Dase, al efecto, al circuito móvil una forma simétrica a ambos lados de un eje de rotación, de modo que las acciones directrices de la tierra en las dos partes del circuito tiendan a hacerlas girar en sentido contrario, y por lo mismo, que se destruyan. Queda satisfecha esta condición en los circuitos de 499, 500 y 501; y por eso se da a las corrientes que los recorren el nombre de *corrientes astáticas*.

Muy pronto explicaremos de un modo sumamente sencillo (698) todas las acciones que ejerce la tierra sobre las corrientes (681, 682 y 683), fundándonos en las acciones mutuas de las corrientes eléctricas (688 a 697), y adoptando la hipótesis de Ampere, quien suponía que recorren la tierra de este a oeste corrientes eléctricas perpendiculares al meridiano magnético.

▽△

## Capítulo IV

▽△

### Electro-dinámica, atracciones y repulsiones de las corrientes por las corrientes

684. Acciones mutuas de las corrientes eléctricas. -Cuando una corriente eléctrica atraviesa simultáneamente dos alambres cercanos, se produce entre éstos, según la dirección relativa de las dos corrientes, atracciones o repulsiones análogas a las que se ejercen entre los polos de dos imanes. Estos fenómenos, cuyo descubrimiento debemos a Ampere, poco después de los de Oersted (675), constituyen una parte de la electricidad dinámica, que se designa con el nombre de *electro-dinámica*. Las leyes que les rigen ofrecen diversos casos según sean las corrientes paralelas o angulares, rectilíneas o sinuosas.

685. Leyes de las corrientes paralelas. -1.<sup>a</sup> *Dos corrientes paralelas y en el mismo sentido se atraen;*

2.<sup>a</sup> *Dos corrientes paralelas y de sentido contrario se repelen.*

Para demostrar estas leyes, se divide el circuito que recorre la corriente en dos partes, fija la una y móvil la otra ([fig. 499](#)). La primera se compone de dos columnas de cobre situadas verticalmente sobre una tabla. Comunicando el electrodo positivo de una pila de cuatro o cinco pares de Bunsen con el pie de la columna de la izquierda del dibujo, sube por ella la corriente, pasa al alambre A, y de aquí a una cápsula B que contiene mercurio. A partir de ésta, principia la parte móvil del circuito, que se compone de un alambre de cobre, una de cuyas extremidades se apoya por medio de un eje en la cápsula B, y la otra se introduce en una segunda cápsula C, desde la cual pasa la corriente a la columna de la derecha, que comunica por su vértice con el electrodo negativo de la pila.

Atendiendo a la dirección de las flechas, la corriente marcha en sentido contrario en las columnas y en el circuito móvil. Éste, que se estableció antes de que pasara la corriente en el plano de los ejes de las columnas, se aleja del mismo girando sobre su eje B, luego que circula la corriente, quedando así demostrada la segunda ley.

Para la demostración de la primera, se quita el circuito móvil de la [figura 499](#), y se sustituye por el de la [500](#). Teniendo entonces el mismo sentido la corriente en las columnas y en la parte móvil, se comprueba que hay atracción, porque el circuito

movible vuelve siempre al plano de los ejes de las dos columnas, luego que se lo aleja de él.

686. Leyes de las corrientes angulares. -1.<sup>a</sup> *Dos corrientes rectilíneas, cuyas direcciones forman entre sí un ángulo, se atraen cuando las dos se acercan o se alejan del vértice.*

2.<sup>a</sup> *Se repelen, si la una va hacia el vértice del ángulo y la otra se aleja del mismo.*

Para demostrar estas dos leyes, se hace uso generalmente de un aparato que hemos dado a conocer en nuestras ediciones anteriores, y del cual somos deudores a M. Pouillet; pero como funciona con dificultad, debe preferirse el que está representado en la [figura 502](#). Este último, que no es más que una modificación de un aparatito adoptado ya por Ampere para demostrar las leyes de las corrientes angulares, y que se describe en el *Tratado de electricidad* de M. de La Rive, es sumamente sensible.

Se observa que no es otra cosa que el aparato ya representado en las figuras [494](#) y [498](#), sólo que sobre la tabla se coloca un pequeño bastidor de madera *mn*, sobre el cual se arrolla muchas veces un grueso alambre por el cual pasa la corriente, de manera que multiplique su acción sobre el circuito móvil PQ, que es astático. Entendido esto, si la corriente entra por el pie de la columna A, gana el circuito PQ que recorre según la dirección que marcan las flechas; luego vuelve a la columna B, pasa al multiplicador, y sale por C. Pero, habiendo dispuesto el circuito móvil de manera que su plano forme ángulo con el multiplicador, y la corriente, separándose del vértice del ángulo en los dos alambres, según indica la figura, se observa, al momento de pasar la corriente, que disminuye el ángulo *POm*, lo cual manifiesta que, en conformidad con la primera ley, hay atracción entre las dos corrientes. Por el contrario, si al circuito PQ se sustituye el circuito MN ([fig. 501](#)), las dos corrientes tienen entonces sentidos contrarios con relación al vértice del ángulo *POm*, y se ve que éste aumenta, lo cual manifiesta que existe repulsión y comprueba a la par la segunda ley.

Ampere dedujo de esta segunda ley, que una corriente angular tiende a transformarse en rectilínea, y que, en *una corriente rectilínea, cada elemento de la corriente repele al que le sigue, siendo repelido por éste mismo*. Se procura, de ordinario, demostrar este principio evidenciando que, cuando pasa la corriente desde un baño de mercurio a un alambrito de cobre que se apoya en la superficie líquida, es rechazado dicho alambre; pero la resistencia que resulta del cambio de conductor, puede bastar para producir el fenómeno.

687. Leyes de las corrientes sinuosas. -*La acción de una corriente sinuosa es la misma que la de una corriente rectilínea de longitud igual en proyección*. Este principio se demuestra disponiendo una corriente *mno*, mitad sinuosa, mitad rectilínea, junto a otra móvil ABCD ([fig. 503](#)). No se observa entonces atracción ni repulsión lo cual patentiza que la acción de la parte sinuosa *mn* equilibra a la rectilínea *no*.

Este principio de las corrientes sinuosas encontrará en breve su aplicación en los solenoides constituidos por la combinación de una corriente rectilínea con otra sinuosa (693).

## Duración de las corrientes entre sí

688. Acción de una corriente indefinida sobre otra perpendicular a su dirección. - Atendida la acción entre dos corrientes angulares (686), se puede determinar fácilmente la de una rectilínea  $QP$  ([fig. 504](#)), fija e indefinida, sobre otra móvil  $KH$ , perpendicular a su dirección. Sea  $OK$  la perpendicular común a  $KH$  y  $PQ$ , la cual es nula, si se encuentran las dos líneas  $PQ$  y  $KH$ . Dirigida la corriente  $PQ$  de  $Q$  hacia  $P$ , en el sentido de las flechas consideremos primero el caso en que la  $KH$  se acerque a la  $PQ$ . Según la primera ley de las corrientes angulares (686), la porción  $QO$  de la  $PQ$  atrae la  $KH$ , pues estas corrientes se dirigen ambas hacia el vértice del ángulo formado por sus direcciones. La porción  $PO$  de la  $PQ$  repele al contrario la  $KH$  porque ambas corrientes están en sentido contrario con relación al vértice del ángulo formado por sus direcciones. Representando, pues, por  $mp$  y  $mq$  las dos fuerzas, atractiva una y repulsiva la otra, que solicitan la corriente  $KH$ , fuerzas que tienen necesariamente la misma intensidad, porque todo es simétrico a ambos lados del punto  $O$ , sabemos ya (29) que dichas dos fuerzas se componen en una única  $mn$ , que tiende a arrastrar la corriente  $KH$  paralelamente a la  $PQ$ , en un sentido opuesto al de esta última.

Si se considera el caso en que la corriente  $KH$  se aleja de la  $PQ$  ([fig. 505](#)), se reconoce con facilidad que es arrastrada también paralelamente a ésta, pero en un mismo sentido.

Podemos pues consignar este principio general: *Una corriente finita móvil, que se acerca a otra fija indefinida, es solicitada para que se mueva en una dirección paralela y opuesta a la de la fija; y si la móvil se separa de ésta, es solicitada también para moverse paralelamente a la misma, pero en el propio sentido.*

Síguese de aquí que, siendo móvil una corriente vertical alrededor de un eje  $XY$  paralelo a su dirección ([fig. 506](#) y [507](#)), cualquiera otra horizontal  $PQ$  produce por efecto hacer girar a aquélla, *hasta que el plano del eje y de la corriente sea paralelo a  $PQ$* , deteniéndose la corriente vertical, con relación a su eje, *hacia el lado de donde viene la corriente  $PQ$  ([fig. 506](#)), o hacia el lado al cual se dirige ([fig. 507](#)), según sea la corriente vertical descendente o ascendente; es decir, según se acerque o se desvíe de la horizontal.*

Dedúcese también del principio anterior, que un sistema de dos corrientes verticales, que gira en conjunto alrededor de un eje vertical ([fig. 508](#) y [509](#)), se encuentra dirigido por una corriente horizontal  $PQ$  en un plano paralelo a la misma, cuando una de las dos corrientes verticales es ascendente, y descendente la otra ([fig. 508](#)); pero si ambas son descendentes ([fig. 509](#)), o ambas ascendentes, no reciben dirección alguna.

689. Acción de una corriente rectilínea indefinida sobre otra corriente rectangular o circular. - Fácilmente se reconoce que una corriente horizontal indefinida ejerce sobre otra rectangular móvil alrededor de un eje vertical ([fig. 510](#)) la misma acción directriz antes citada. En efecto, en vista de la dirección de las corrientes que marcan las flechas, la porción  $QY$  obra por atracción, no sólo sobre la parte horizontal  $YD$  (ley de las corrientes angulares), sino también sobre la vertical  $AD$  (ley de las corrientes

perpendiculares, 688). La misma acción se verifica evidentemente entre las partes PY y las CY y BC. De consiguiente, *la corriente fija PQ tiende a dirigir la rectangular móvil ABCD en una posición paralela a PQ, y tal que, en los alambres CD y PQ, sea el mismo el sentido de las dos corrientes.*

Fácil es de demostrar este principio de un modo experimental colocando el circuito ABCDE sobre el aparato de dos columnas de la [figura 498](#), y haciendo pasar por debajo una corriente algo intensa, que forme primero con él un ángulo más o menos agudo. Con todo, sería preferible hacer uso del circuito mismo de la [fig. 494](#), que es estático (683), mientras que no lo es el de la [fig. 510](#).

Todo cuanto acaba de decirse de la corriente rectangular de la [figura 510](#), se aplica exactamente a la circular de la [511](#), comprobándose de igual manera por medio de la experiencia.

▽△

### Rotación de las corrientes entre sí

690. Rotación de una corriente horizontal finita por otra rectilínea horizontal indefinida. -Las atracciones y repulsiones que ejercen entre sí las corrientes angulares pueden transformarse fácilmente en movimiento circular continuo. Sea una corriente OA ([figura 512](#)), móvil alrededor del punto O, en un plano horizontal, y PQ otra indefinida, también horizontal. Dirigidas estas dos corrientes en el sentido de las flechas, es claro que, en la posición OA, la corriente móvil es atraída por la PQ, supuesto que ambas tienen la misma dirección. Llegada en la posición OA', la corriente móvil es atraída por la porción NQ de la corriente fija, y repelida por la PN. Del mismo modo, en la posición OA'' es atraída por MQ y repelida por PN, y así sucesivamente; resultando de aquí un movimiento continuo de rotación en el sentido AA'A''A'''... Si la corriente móvil, en vez de dirigirse de O a A, lo efectúa de A a O, sería fácil advertir que la rotación se efectuaría en sentido contrario. De consiguiente, *por efecto de la corriente fija indefinida PQ, la corriente móvil OA tiende a girar con un movimiento continuo, en una dirección retrógrada a la de la fija.*

Si permaneciendo horizontales las dos corrientes, la fija es circular en vez de rectilínea, fácilmente se reconoce que su efecto será el de producir un movimiento circular continuo. Sean, en efecto, dos corrientes situadas en un plano horizontal, una ABC ([fig. 513](#)) fija y circular, y la otra *mn* rectilínea y móvil alrededor del centro *n*. Dirigidas estas corrientes en el sentido de las flechas, se atraen en el ángulo *nAC*, porque van las dos hacia el vértice (686 1.º); y en el *nAB*, por el contrario, se repelen, por ir la una hacia el vértice y la otra en sentido contrario. Los dos efectos concurren, pues, para hacer girar al alambre *mn* de un modo continuo en el sentido ACB.

691. Rotación de una corriente vertical por otra circular horizontal. -Una corriente circular horizontal que actúa sobre otra rectilínea vertical, le imprime también un movimiento continuo de rotación. Sirve para demostrarlo el aparato de la [fig. 514](#). Se compone de una vasija de cobre, alrededor de la cual se arrolla una lámina del mismo metal, cubierta de seda o de lana, y recorrida por una corriente fija. En el centro de la

vasija existe una columna de latón  $a$ , terminada por una cápsula que contiene mercurio, y en la cual se introduce un eje que sostiene un alambre de cobre  $bb$ , encorvado en sus dos extremidades en dos ramas verticales, que van a soldarse con un anillo muy ligero de cobre que se sumerge en el agua acidulada de la vasija. Sentado esto, la corriente de una pila que llega por el alambre  $m$ , va a la lámina A, desde la cual, después de muchas circunvoluciones alrededor de la vasija, pasa a la lámina B, y de aquí, por debajo de la vasija, a la parte inferior de la columna  $a$ . Subiendo entonces por ésta, pasa por los alambres  $bb$ , por el anillo de cobre, por el agua acidulada y por las paredes de la vasija, hasta regresar a la pila por el alambre D. Cerrada así la corriente, principian a girar el circuito  $bb$  y el anillo en sentido contrario a la corriente fija, movimiento que depende evidentemente de la acción de la corriente circular sobre la corriente de las ramas verticales  $bb$ , como fácilmente se reconoce, pues atendiendo a las dos leyes de las corrientes angulares, la rama  $b$  de la derecha, es atraída por la porción A del circuito fijo, y la rama  $b$ , de la izquierda, lo es en sentido contrario por la porción opuesta. En cuanto a la acción de la corriente circular sobre la parte horizontal del circuito  $bb$ , concurre evidentemente para hacer girar en el mismo sentido, pero su acción puede despreciarse en razón a su distancia.

692. Rotación de los imanes por las corrientes. -Iguales movimientos de rotación que las corrientes hacen tomar a los imanes, imprimen éstas a los imanes, hecho demostrado por primera vez por Faraday, mediante el aparato representado en la [fig. 515](#). Consta este aparato de una ancha probeta de cristal casi completamente llena de mercurio. Hacia el centro del líquido se introduce un imán de unos 20 centímetros de longitud, y lastrado por su parte inferior con un cilindro de platino, según lo demuestra la figura en  $ab$  hacia la derecha de la misma. En la parte superior del imán se encuentra adaptada una capsulita de cobre que contiene mercurio, y a la cual se hace llegar la corriente por la varilla C. Entendido esto, al momento que la corriente, subiendo por la columna A, pasa al imán, de aquí al mercurio, y sale por la columna D, se ve girar al imán sobre sí mismo, alrededor de su eje, con una velocidad que depende de su potencia magnética y de la intensidad de la corriente.

Se explica este movimiento de rotación apoyándose en la teoría de Ampere, que daremos a conocer en breve, y según la cual son recorridos los imanes en sus contornos por una infinidad de corrientes circulares del mismo sentido, en planos perpendiculares al eje del imán (698). Supuesto esto, en el momento en que, en el experimento anterior, la corriente pasa del imán al mercurio, se divide, en la superficie de éste, en una infinidad de corrientes rectilíneas dirigidas desde el eje del imán al perímetro de la probeta; y como cada corriente de éstas obra sobre las corrientes del imán del mismo modo que en la [figura 513](#), la corriente rectilínea  $mn$  actúa sobre la corriente circular CAB; es decir, que representando el círculo CAB una de las corrientes del imán, hay atracción en el ángulo  $nAC$ , y repulsión en el  $nAB$ , y por consiguiente, rotación continua del imán alrededor de su eje. Esta acción de la corriente se verifica tan sólo hacia la extremidad superior del imán; y si el polo austral está hacia arriba, como en el dibujo adjunto, la rotación se verifica de oeste a este, pasando por el norte. Si el polo austral está hacia abajo, cambia el sentido de la rotación, lo mismo que si se hubiese cambiado la dirección de la corriente.

En vez de hacer girar al imán sobre su eje, se le puede hacer girar alrededor de una recta paralela a este eje, disponiendo el experimento como lo manifiesta la [figura 516](#).

Finalmente, de una manera recíproca se hacen girar también las corrientes por la influencia de un imán enérgico.

▽△

## Solenoides

693. Composición de un solenoide. -Se denomina *solenoides* un sistema de corrientes circulares iguales y paralelas, formadas por un mismo alambre de cobre cubierto de seda y replegado sobre sí mismo en espiral ([fig. 517](#)). Con todo, no es completo un solenoide si una parte BC del alambre no pasa por el eje en el interior de la hélice. Con esta disposición, cuando una corriente recorre el circuito, resulta de lo dicho acerca de las corrientes sinuosas (687), que la acción del solenoide, en el sentido de su longitud AB, queda destruida por la de la corriente rectilínea BC. Esta acción es, pues, nula en el sentido de la longitud, y de consiguiente, el efecto del solenoide equivale rigurosamente, en una dirección perpendicular al eje, al de una serie de corrientes circulares iguales y paralelas.

694. Acción de las corrientes sobre los solenoides. -Cuanto se ha dicho acerca de la acción de las corrientes rectilíneas fijas sobre las finitas, rectangulares o circulares (689), se aplica evidentemente a cada uno de los circuitos de un solenoide, y por lo mismo, toda corriente rectilínea debe tender a dirigir estos circuitos paralelamente a sí misma. Para comprobar experimentalmente este hecho, se construye el solenoide según indica la [figura 518](#), de modo que se le pueda suspender por dos ejes sobre las capsulitas A y B del aparato representado en la [figura 498](#). El solenoide es entonces muy móvil alrededor de un eje vertical, y si se dirige por la parte inferior, paralelamente a su eje una corriente rectilínea que pase al mismo tiempo por los alambres del solenoide, se nota que éste gira y se pone en cruz con la corriente; es decir, en una posición tal, que sus circunvoluciones son paralelas a la corriente fija, y además, en la parte inferior de cada uno de ellos tiene la corriente el mismo sentido que en el alambre rectilíneo.

Si en vez de hacer pasar horizontalmente una corriente rectilínea la parte inferior del solenoide, se efectúa verticalmente por el lado, se observa una atracción o una repulsión, según tengan en el alambre vertical y en la parte más próxima al solenoide, el mismo sentido o sentidos contrarios las dos corrientes.

695. Acción directriz de la tierra sobre los solenoides. -Suspendiendo de las capsulitas A y B del aparato de dos columnas ([fig. 498](#)) el solenoide de suspensión ([fig. 518](#)), y dirigiéndolo primero fuera del meridiano magnético, se observa que, luego que una corriente bastante enérgica pasa por el solenoide, se pone éste en movimiento, y se detiene en una dirección tal, que su eje es paralelo a la de la aguja de declinación (570). Además, en la parte inferior de las corrientes circulares que componen el solenoide, se dirige la corriente del este al oeste. La acción directriz de la tierra sobre los solenoides es, pues, la consecuencia de la que ejerce sobre las corrientes circulares (683).

En este experimento, por dirigirse el solenoide como una aguja imantada, se denomina *polo austral*, lo mismo que en los imanes, la extremidad que se dirige hacia el norte, y *polo boreal* la que lo efectúa hacia el sur.

696. Acciones mutuas de los imanes y de los solenoides. -Entre éstos y los imanes se manifiestan idénticamente los mismos fenómenos de atracción y de repulsión recíprocas que entre los imanes. En efecto, si se presenta a un solenoide móvil, y recorrido por una corriente, uno de los polos de una fuerte barra imantada, hay repulsión o atracción, según que los polos del imán y del solenoide que están en presencia tengan el mismo nombre o el contrario. Recíprocamente, el mismo fenómeno se verifica si se presenta a una aguja imantada móvil un solenoide cogido con la mano mientras se halla atravesado por una corriente. La ley de las atracciones y repulsiones de los imanes (559) se aplica, pues, exactamente a las acciones mutuas de los solenoides y de los imanes.

697. Acciones mutuas de los solenoides. -Cuando se hacen obrar entre sí dos solenoides atravesados por una corriente bastante poderosa, uno cogido en la mano y el otro móvil alrededor de un eje vertical que pase por su centro de figura ([fig. 519](#)), se observan, entre las extremidades de estos dos solenoides, fenómenos de atracción y de repulsión idénticos a los que ofrecen entre sí los polos de los imanes. Estos fenómenos se explican por la dirección relativa de las corrientes en las extremidades que están en presencia (685).

698. Teoría de Ampere sobre el magnetismo. -Fundándose Ampere en la analogía que media entre los solenoides y los imanes, dio una ingeniosa teoría, por medio de la cual entran los fenómenos magnéticos en el dominio de la electro-dinámica.

En vez de atribuir los fenómenos magnéticos a la existencia de dos fluidos (560), buscó su causa Ampere en corrientes voltaicas circulares que deben existir alrededor de las moléculas de las sustancias magnéticas. Cuando estas sustancias no están imantadas, se efectúan en todos sentidos las corrientes moleculares, y es nula la resultante de sus acciones electro-dinámicas.

En los imanes, por el contrario, siendo paralelas todas las corrientes moleculares y guardando la misma dirección, sus acciones concordantes tienen una resultante que equivale a una corriente única dirigida circularmente en la superficie del imán ([fig. 520](#)), de suerte que los imanes no son más que solenoides, y las atracciones y repulsiones magnéticas, una consecuencia de las acciones de las corrientes sobre las corrientes.

Finalmente, en esta teoría, para explicar los efectos terrestres magnéticos, se admite la existencia de corrientes eléctricas que circulan sin cesar alrededor de nuestro globo, del este al oeste, perpendicularmente al meridiano magnético. Por su naturaleza vendrían a ser corrientes termo-eléctricas (734) originadas por las variaciones de temperatura que resultan de la presencia sucesiva del sol en los diferentes puntos de la superficie del globo, del oriente hacia el occidente.

Estas corrientes son las que dirigen las agujas de las brújulas y dan a los minerales de hierro una imantación natural, siendo origen también, por último, de la acción de la tierra sobre las corrientes horizontales y verticales (681 y 682), acción que ahora se explica sin dificultad por lo que se ha dicho de la acción de una corriente horizontal indefinida sobre las horizontales y verticales (689 y 690).

## Capítulo V

### Imantación por las corrientes; electro-imanés; telégrafos eléctricos

699. Imantación por las corrientes. -En vista de la influencia que ejercen las corrientes sobre los imanes, desviando el polo austral hacia la izquierda y el boreal hacia la derecha, es de suponer que, obrando sobre las sustancias magnéticas en el estado natural, deben tender las corrientes a separar los dos fluidos magnéticos. Obsérvase en efecto, que introduciendo un alambre, recorrido por una corriente, en limaduras de hierro, se adhieran éstas abundantemente, volviendo a caer apenas cesa la corriente, mientras que es nula la acción en la limadura de cualquier otro metal no magnético.

La acción de las corrientes sobre las sustancias magnéticas es particularmente sensible cuando se arrolla, según lo hizo Ampere, un alambre de cobre cubierto de seda alrededor de un tubo de vidrio, y se coloca en éste una barra no imantada de acero. Se nota que basta que cruce una corriente al alambre, aun por muy poco tiempo, para que quede fuertemente imantada la barra.

Si, en vez de hacer cruzar el alambre por la corriente de la pila, se hace pasar por él la descarga de una botella de Leyden, poniendo en comunicación uno de los extremos con la armadura exterior, y el otro con la interior, se nota también que se imanta la barra. Puede imantarse igualmente, pues, por la electricidad voltaica y por la de las máquinas.

En el experimento anterior, puede arrollarse el alambre de izquierda a derecha por encima, y entonces se tiene una *hélice dextrórsu*m (fig. 521), o bien de izquierda a derecha por debajo, y se tiene una *hélice sinistrórsu*m (fig. 522). En la primera, el polo boreal de la barra está siempre en la extremidad por donde entra la corriente, aconteciendo lo contrario en la segunda.

La naturaleza del tubo en el cual se arrolla la hélice, no deja de tener su influencia; pues si bien no ejercen efecto alguno la madera y el vidrio; sin embargo el cobre puede destruir por completo el efecto de la corriente. Lo propio sucede con el hierro, la plata y el estaño.

Por lo demás, si se desea imantar una barra de acero la electricidad, no es preciso colocarla en un tubo (fig. 521 y 522), pues basta rodearla en toda su longitud por un alambre de cobre cubierto de seda, a fin de aislar entre sí las circunvoluciones del alambre. De esta suerte se multiplica la acción de la corriente cuando se la hace pasar por el alambre, bastando una poco intensa para obtener un fuerte grado de imantación.

En virtud de numerosos experimentos efectuados por de Haldat, un cilindro de hierro dulce, hueco, por delgada que sea su cubierta, adquiere, en el interior de una hélice recorrida por una corriente, sensiblemente la misma intensidad magnética que un

cilindro macizo de iguales dimensiones. Dedujo de aquí de Haldat que en los imanes el magnetismo reside por completo en la superficie, no ejerciendo apenas influencia alguna su masa.

700. Electro-imanés. -Denominanse *electro-imanés* unas barras de hierro dulce que se imantan por la influencia de una corriente voltaica, pero sólo temporalmente, porque siendo inapreciable la fuerza coercitiva del hierro dulce (563), se neutralizan los dos fluidos magnéticos cuando no pasa la corriente. Con todo, si el hierro no es perfectamente puro, conserva vestigios más o menos sensibles de imantación. Se disponen los electro-imanés en forma de herradura ([fig. 523](#)), y se arrolla muchísimas veces en las dos ramas un mismo alambre de cobre cubierto de seda, de modo que forme dos carretes huecos A y B. El alambre debe arrollarse en éstos en sentido contrario, a fin de que las dos extremidades de la barra sean dos polos de nombre contrario.

Numerosas investigaciones se han efectuado con objeto de determinar las condiciones necesarias para obtener electro-imanés de la mayor potencia posible, y apreciar la influencia ejercida por las dimensiones del hierro en forma de herradura, por el diámetro y número de vueltas del alambre conductor, y finalmente, por la intensidad y origen de la corriente que recorre este alambre. Aunque entre los resultados obtenidos hasta ahora no haya habido siempre la concordancia que es de desear, se admite, en general, que las mejores condiciones que han de observarse son las siguientes:

1.<sup>a</sup> El hierro de la barra debe ser lo más dulce posible, cualidad que, no solamente depende de su grado de pureza, sino también del sistema aceptado para su preparación, porque debe recocerse muchas veces, teniendo cuidado de enfriarle muy lentamente.

2.<sup>a</sup> Como la forma y las dimensiones de la barra modifican su potencia magnética, resulta de los trabajos de MM. Lentz, Jacoby, Muller, Dub Y Niklès, que siendo iguales las demás condiciones, la longitud de las ramas de un electro-imán no ejerce influencia sobre el peso que puede sostener, cuando la barra está encorvada en forma de herradura, y en ambos carretes se han arrollado los alambres en sentidos contrarios; pero si la barra es rectilínea no formando más que un sólo carrete, o si, teniendo la forma de herradura, los dos carretes están arrollados en el mismo sentido, el poder atractivo aumenta con la longitud de la barra. En cuanto al grosor del cilindro de hierro dulce, el doctor J. Dub ha encontrado recientemente que la potencia de un electro-imán para hacer desviar la aguja imantada es proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de este cilindro, y que, si se trata de sostener pesos, es proporcional al mismo diámetro. Finalmente, para corrientes intensas, la potencia de un electro-imán aumenta con la separación de los carretes. «En general, dicen los señores Becquerel en su *Tratado de electricidad*, hay que atenerse a las dimensiones siguientes: la longitud de cada rama envuelta de alambre varía entre 2 veces y media y 4 veces el diámetro de la barra de hierro; la separación de las ramas en el interior tiene de 1 y media a 2 veces el diámetro del hierro; en cuanto a la longitud del alambre arrollado, depende de los efectos que se traten de producir, y se envuelven comúnmente las dos ramas hasta que los carretes de cada lado se toquen por las últimas vueltas del alambre.

3.<sup>a</sup> Para corrientes poco enérgicas, se admite que en igualdad de circunstancias, la intensidad magnética del electro-imán es proporcional al número de vueltas del alambre; pero esa ley no se puede admitir más que hasta cierto límite, puesto que la

potencia magnética de todo imán tiene un máximo que corresponde al punto de saturación. Por lo demás, la longitud del alambre, y por consiguiente el número de vueltas, varía con los efectos que quieren obtenerse. Si se trata de construir un electroimán destinado a sostener pesos considerables, debe hacerse uso de una pila de gran superficie, y escoger un alambre de 1 a 3 o 4 milímetros de diámetro, lo cual se opone a que efectúe un número de vueltas muy considerable. Por el contrario, si se tiene una corriente débil, como en la telegrafía eléctrica, se emplea un alambre muy largo y de pequeño diámetro, a fin de obtener un número notable de vueltas, aumentando de esta suerte la potencia del electro-imán.

En breve veremos las numerosas aplicaciones que se han efectuado de los electroimanes en telégrafos eléctricos, en los motores electromagnéticos, en los relojes eléctricos y en el estudio de los fenómenos diamagnéticos.

701. Movimiento vibratorio y sonidos producidos por las corrientes. -Cuando una barra de hierro dulce se imanta por la influencia de una fuerte corriente eléctrica, origina un sonido muy pronunciado, que varía según la longitud de la barra, pero que no es producido más que en el acto de cerrarse o de interrumpirse la corriente. Este fenómeno, que observaron primeramente M. Page en América y M. Delezenne en Francia, ha sido estudiado particularmente por M. de la Rive, quien lo atribuye a un movimiento vibratorio de las moléculas de hierro por efecto de una rápida sucesión de imantaciones y de desimantaciones.

Interrumpiendo y restableciendo la corriente a intervalos muy cortos, observó este último físico que, sea cual fuere la forma o el tamaño de las barritas de hierro dulce, se distinguen siempre dos sonidos, a saber: uno, que es musical, corresponde al que daría la barra vibrando transversalmente, y el otro, que consiste en una serie de golpes secos, correspondientes a las alternativas de la corriente lo compara M. de La Rive al ruido de la lluvia que cae sobre un techo metálico. El sonido más fuerte, añade, es el que se obtiene tendiendo sobre una mesa armónica alambres de hierro dulce de 1 a 2 milímetros de diámetro, bien recocidos, y de 1 a 2 metros de longitud. Dispuestos estos alambres en el eje de uno o de muchos carretes atravesados por corrientes poderosas, producen un conjunto de sonidos cuyo efecto es sorprendente y muy parecido al de varias campanas, cuando vibrando juntas, se oyen a lo lejos.

M. de La Rive ha obtenido también los mismos sonidos haciendo pasar la corriente discontinua, no ya por carretes cubiertos de los alambres de hierro, sino en estos mismos. El sonido musical es entonces en general, más fuerte y más sonoro, que en el primer experimento citado.

La hipótesis de un movimiento molecular en los alambres de hierro, en el momento de su imantación y de su desimantación, ha sido confirmada por las investigaciones de M. Wertheim, al descubrir que los alambres pierden en tal caso su elasticidad, y por las de M. Joule, que ha consignado que disminuye el diámetro de los alambres aumentando su longitud.

## Telégrafos eléctricos

702. Diferentes sistemas de telégrafos eléctricos. -Los *telégrafos eléctricos* constituyen los aparatos que sirven para transmitir señales a grandes distancias, por medio de corrientes voltaicas que se propagan por alambres metálicos de grande longitud. Desde el siglo pasado habían propuesto muchos físicos, el poner en comunicación puntos distantes por medio de los efectos que produce la electricidad de las máquinas eléctricas, cuando se propaga por alambres conductores aislados.

En 1811 ideó Soemmering un telégrafo fundado en el empleo, como medio indicador, de la descomposición del agua por la pila. En 1820, en una época en que no se conocía el electro-imán, Ampere, apoyándose en el experimento de Oersted (675), propuso la correspondencia por medio de agujas imantadas, por encima de las cuales se dirigía una corriente, haciendo uso de tantas agujas y de tantos alambres cuantas son las letras del alfabeto. En 1837, M. Steinheil, en Munich, y M. Wheatstone en Londres, construían telégrafos de muchos alambres, cada uno de los cuales actuaba sobre una aguja imantada, siendo el foco de la corriente un aparato electro-magnético de Clarke, o una pila de corriente constante. Pero el telégrafo no podía adquirir toda la apetecible sencillez sin el uso de electro-imanés, que es el sistema que en 1840 adoptó M. Wheatstone.

Sin dejar de conservar el mismo principio, varió mucho la forma de los telégrafos eléctricos; pero todos pueden referirse a los cuatro que siguen, que vamos a describir sucesivamente: el telégrafo de cuadrante, el de señales, el que escribe o marca y el electro-químico.

703. Telégrafo de cuadrante. -Se conocen muchas especies de telégrafos de cuadrante; pero el de las [figuras 524 y 525](#) es el que construye M. Froment. Este aparato, aunque destinado a la demostración, reposa sobre el mismo principio que el de los que establecen en los caminos de hierro. Consta, como éstos, de dos aparatos, que son, el *manipulador*, que trasmite las señales ([fig. 524](#)), y el *receptor*, que las recibe ([fig. 525](#)). El primero comunica con una pila de carbón Q, los dos se enlazan por medio de dos alambres, de hierro o de cobre, que van, el uno, AOD ([fig. 524](#)), de la estación de partida a la de término, y el otro, HKLJ ([fig. 525](#)), de ésta a aquélla. Por último, cada aparato posee un cuadrante con todas las letras del alfabeto, sobre el cual se mueve la aguja. La mano del experimentador es quien hace girar la aguja de la estación de partida, y la electricidad la de la estación final.

Sabido esto veamos cuál es la marcha de la corriente en los dos aparatos y los efectos que produce. De la pila se dirige la corriente, por un alambre de cobre A ([fig. 524](#)), a una lámina de latón N en contacto con una rueda metálica R; pasa a una segunda lámina M, y luego al alambre O que conduce a la otra estación. Allí se dirige la corriente por el carrete de un electro-imán *b*, oculto en la [figura 525](#), pero visible de perfil en la [526](#), que dibuja la parte posterior del aparato. Este electro-imán se fija horizontalmente por una extremidad, y por la otra atrae una armadura de hierro dulce *a*, que forma parte de una palanca angular móvil alrededor de su punto de apoyo *o*, mientras que un muelle espiral *r* actúa sobre la misma palanca en sentido contrario.

Cuando pasa la corriente, el electro-imán atrae la palanca *aC*, la cual, por medio de un vástago *i*, actúa sobre otra palanca *d*, sujeta a un eje horizontal y enlazada a su vez con

una horquilla F. Cuando se interrumpe la corriente, el resorte  $r$  hace retroceder la palanca  $aC$ , y con ella todas las piezas que dependen de la misma; de aquí resulta un movimiento de vaivén que se comunica a la horquilla F, la cual lo trasmite a la rueda de linguete G, cuyo eje conduce la aguja indicadora. En virtud de la inclinación de sus dientes es arrastrada siempre la rueda G en el mismo sentido por la horquilla, circunstancia indispensable.

Para darse cuenta de las intermitencias del electro-imán, es preciso referirse a la [figura 524](#). La rueda R cuenta 26 dientes, 25 de los cuales, corresponden a las letras del alfabeto, y el último al intervalo que media entre las letras A y Z. Cuando, cogiendo con la mano el botón P, se hace girar la rueda R, la extremidad de la lámina N, por efecto de su curvatura, está siempre en contacto con los dientes; y la M, por el contrario, se halla dispuesta de modo que hay sucesivamente contacto y solución de continuidad. De consiguiente, establecidas las comunicaciones con la pila, si se hace avanzar cuatro letras por ejemplo la aguja P, la corriente pasa cuatro veces de N a M, y cuatro veces permanece interrumpida. Por lo tanto, el electro-imán de la estación de término se habrá vuelto cuatro veces atractivo, y otras tantas habrá dejado de serlo. Por último, la rueda G habrá corrido cuatro dientes, y como cada uno de éstos corresponde a una letra, las agujas de ambas estaciones recorrerán igual número de letras. La pieza S de las dos estaciones es una lámina de cobre, móvil sobre una charnela, que sirve para interrumpir o para cerrar la corriente cuando se quiera producir uno u otro de estos efectos.

En vista de lo expuesto, fácilmente puede comprenderse cómo se establece la comunicación entre las estaciones. Supongamos, por ejemplo, que el primer aparato ([fig. 524](#)) está en París y el segundo en el Havre, y que establecida ya la comunicación entre ambos por dos alambres, se desee transmitir a la última ciudad la palabra *señal*: correspondiendo las agujas en cada aparato al intervalo que hay entre las letras A y Z, la persona que trasmite el parte hace avanzar la aguja P hasta la letra S, en donde se detiene muy poco; la aguja del aparato del Havre, que reproduce fielmente los movimientos de la de París, se para en la misma letra, la cual anota la persona que recibe el parte. La de París continúa girando en el mismo sentido, detiene la aguja en la letra E, e instantáneamente la segunda aguja se fija delante de la misma letra; y siguiendo así del mismo modo respecto a las letras N, A, L, queda al momento transmitida al Havre la misma palabra.

Para llamar la atención de la persona a quien se escribe, se fija en la estación de término un movimiento de relojería provisto de un timbre que debe introducirse en la corriente siempre que se suspende la correspondencia. Un fiador, movido por el electro-imán, pone en acción dicho movimiento apenas pasa la corriente, indicando así que va a comunicarse un parte. Además, cada estación debe poseer dos aparatos como los de las [figuras 524 y 525](#), pues de lo contrario serían imposibles las contestaciones.

Hemos supuesto que la corriente que iba de París al Havre por un alambre, regresaba de igual manera del Havre a París por un segundo alambre. Este último es inútil, pues la experiencia ha demostrado que comunicando el polo positivo de la pila, en París, con el aparato, y el negativo con el suelo, basta que el alambre que va al Havre, se ponga, en dicha ciudad, en íntima comunicación con el suelo. Se admite, generalmente, que queda cerrado entonces el circuito por la tierra, por la cual regresa la corriente del Havre a París. El abate Moigno critica justamente esta hipótesis en su *Tratado de telegrafía eléctrica*. Difícil es, en efecto, concebir que, llegada al Havre la corriente, que tiende

por su naturaleza a dispersarse en todas direcciones, elija precisamente la que la vuelve a conducir a la pila de donde partió. Moigno admite que la tierra, funcionando aquí como depósito, absorbe, en las dos extremidades libres de los alambres, las electricidades que les envía la pila, resultando así en el alambre la misma corriente continua que si se tocasen sus dos extremidades.

704. Telégrafo eléctrico de señales. -En vez de los telégrafos eléctricos de alfabeto (703), la administración de las líneas telegráficas de Francia ha adoptado un telégrafo eléctrico, cuyos signos son idénticos a los que hace más de 60 años se usan en el telégrafo óptico de Chappe. Este telégrafo, cuyo principio es el mismo que el de alfabeto, y que ha sido construido por M. Bréguet, se compone también de un *manipulador* y de un *receptor* para estación; pero en cada aparato es doble el mecanismo, es decir, que consta realmente de dos manipuladores y de dos receptores.

En el primer plano del aparato ([fig. 528](#)) hay dos columnas de cobre, cada una de las cuales posee un disco metálico con ocho muescas y con un manubrio en su centro. Cada columna, con todas sus piezas, constituye un manipulador. En el segundo plano existe una caja de caoba que contiene al receptor, y cuyos pormenores, que vamos a describir, pueden verse en la [figura 527](#). En la cara anterior de la caja se ve una placa blanca, que tiene trazada una faja negra *m*, fija, en cuyas extremidades hay dos radios negros, móviles *x* e *y*, destinados a servir de *índices* según el ángulo que formen con la señal fija *m*. No es continuo el movimiento de estos índices, sino que se efectúa por intermitencias de 45 en 45 grados, de suerte que cada uno de ellos puede ocupar ocho posiciones alrededor de su centro. Las ocho posiciones de un índice, combinadas con las ocho del otro, dan, pues, origen a sesenta y cuatro combinaciones que constituyen otras tantas señales. Con todo, como para cada índice tienden a confundirse los dos signos horizontales, no se utiliza más que una de dichas posiciones, de modo que sólo quedan para cada uno siete señales, que, combinadas, no procuran más que cuarenta y nueve signos distintos. Se mueve cada índice por medio de un movimiento de relojería, situado en el interior de la caja, y por un electro-ímán cuyos carretes están atravesados por una corriente que llega del punto desde el cual se recibe el parte. Supondremos también las mismas poblaciones de París y del Havre, del ejemplo anterior.

La corriente que sale de París, entra por A ([fig. 527](#)), va por una lámina de cobre *a* a un electro-ímán que sirve de motor a uno de los índices móviles, el *x*, por ejemplo, situado exteriormente sobre la placa blanca de la caja ([fig. 528](#)). Siempre que pasa la corriente por el electro-ímán, atrae éste una armadura de hierro dulce *m*, ([fig. 527](#)), que trasmite su movimiento a una palanca *b*, en la cual está sujeta; pero apenas se interrumpe la corriente, cesando la atracción del electro-ímán, es repelida la armadura *m* a su primera posición por un resorte que existe en la parte superior de la palanca *b*. A cada paso y a cada interrupción de la corriente, produce, por lo tanto, la palanca *b* una oscilación, la cual se trasmite a una paletita doble *c*, fija en un eje horizontal, que cuenta en su otra extremidad con una paleta semejante *k*, cuyas dos ramas están un poco separadas entre sí en el sentido del eje, formando además entre sí cierto ángulo, cuya disposición constituye un ánclora. Finalmente, debajo de la paleta *k* hay una rueda de ánclora *o*, de cuatro dientes, movida por un movimiento de relojería representado en la parte inferior de dicha rueda.

Conocidas estas transmisiones de movimiento, fácil es darse cuenta del modo cómo el doble mecanismo de la [fig. 527](#) imprime traslaciones sucesivas de 45 grados a los

índices  $x$  e  $y$  ([fig. 528](#)), fijos, uno de ellos, en la rueda de áncora de uno de los mecanismos, y el otro en la del segundo. En efecto, no pasando la corriente, un diente de la rueda o choca contra la rama de la derecha de la paleta A, y la rueda no puede girar; mas luego que circula la corriente, oscila la paleta y principia a girar la rueda de áncora, pero *tan sólo de un semi-diente*, o sean 45 grados, porque el diente que sigue da en seguida contra la segunda rama de la paleta. A un segundo movimiento de la palanca  $b$ , que se produce al momento que se interrumpe la corriente, la primera rama de la paleta recobra su posición inicial y pasa por segunda vez el diente que acababa de detener la otra rama, y así sucesivamente para cada diente, de lo cual resultan las detenciones sucesivas de las ruedas de áncora y de los índices  $x$  e  $y$ , de 45 en 45 grados.

Todo lo que acabamos de relatar acontece en la estación en la cual se recibe el parte, que suponemos es el Havre. Réstanos dar a conocer cómo se producen en el punto de partida las intermitencias de la corriente por medio del manipulador. Refiriéndonos al [grabado 528](#), sólo consideraremos el manipulador de la izquierda. Al llegar la corriente de una pila por el alambre P, pasa a una pieza metálica  $b$ , que está aislada del resto del aparato por una placa de marfil, pero que momentáneamente puede ponerse en contacto, como se ve en el dibujo, con un pequeño martillo metálico que hay en la parte inferior de la palanca  $p$ . Subiendo entonces la corriente por esta palanca, baja por la columna, desde la cual pasa al alambre N, que la conduce hasta el electro-imán del receptor del Havre, marchando dicho alambre, sin solución de continuidad, de la estación de partida a la de llegada. Se obtienen las interrupciones de la corriente haciendo oscilar la palanca  $p$ , por medio de un manubrio R y de diferentes piezas situadas en la parte superior de la columna. La primera de estas piezas es un platillo circular D, fijo, y en cuyo contorno existen ocho muescas, en las cuales se introduce sucesivamente un diente de acero colocado en la parte posterior del manubrio, a medida que se le va dando vuelta. Estas muescas, que dividen la circunferencia del platillo en ocho arcos iguales de 45 grados, sirven para regular el curso del manubrio de 45 en 45 grados. Ahora bien; cuando se hace girar aquél, se trasmite su movimiento a un segundo platillo C, sobre el cual se aplica un excéntrico S. Sobre este excéntrico se apoya una piececita  $v$  que sirve de guía a una palanca móvil  $r$ . Oscilando ésta alternativamente hacia la derecha o hacia la izquierda, por efecto de la presión que ejerce el excéntrico sobre  $v$ , trasmite su movimiento al eje A, a la palanca  $p$  y al martillo oscilante; y de aquí resulta, por efecto de la forma del excéntrico, que durante una revolución completa del manubrio hiere el martillito cuatro veces la pieza  $b$ , y otras tantas la  $a$ , y por lo tanto, pasa la corriente cuatro veces y queda interrumpida igual número en el electro-imán del receptor que hay en el Havre. Por lo mismo, la palanca  $b$  ([fig. 527](#)) da ocho oscilaciones, y el índice  $x$ , que le corresponde, efectúa ocho movimientos de 45 grados cada uno.

El receptor de París actúa de la misma manera, por medio de la corriente que viene del Havre, pero en este caso, el martillito oscilante debe tocar la pieza  $a$ . Llegando entonces la corriente del Havre por el alambre N, sube por la columna, baja por la palanca  $p$ , pasa por la pieza  $a$ , y de allí es conducido por un alambre de cobre  $k$ , al electro-imán de la caja.

Dos llaves  $oo$  sirven para montar los movimientos de relojería, y dos cuadrantes  $z$ , de los cuales uno tan sólo es visible en la figura, y para hacer girar una polea  $x$  ([fig. 527](#)), a fin de regular, por medio de un alambre, el resorte que actúa sobre la palanca  $b$ .

705. Telégrafo de teclado. -Para facilitar el manejo del telégrafo de cuadrante (703), se le han adaptado varias teclas semejantes a las de los pianos, y cada una de las cuales representa una letra del alfabeto. Estas teclas sirven para interrumpir o para dejar pasar la corriente. Por medio de este mecanismo, puede una persona poco práctica, transmitir las palabras con suma rapidez.

La [figura 529](#) representa un aparato de esta clase, inventado y construido por M. Froment, el cual funciona con suma precisión, sirviendo al mismo tiempo de manipulador y de receptor, en uno de los extremos de la línea telegráfica; en el otro desempeña iguales funciones un segundo aparato, enteramente análogo. Supongamos, por ejemplo, que el primero se encuentre, en París, el segundo en Rouen, y que los dos alambres pongan en comunicación ambas estaciones.

Puesto en París el aparato de la [figura 529](#), la corriente de la pila entra en  $b$ , atraviesa el aparato, en el cual se interrumpe cuando se desea, por medio de las teclas y de un mecanismo especial; sale luego por  $b'$  y va al receptor de Rouen. Este receptor consiste, lo mismo que el de París, en un cuadrante vertical A con 26 letras, una cruz y una flecha, y las 28 teclas. En la caja que contiene este cuadrante, existe un electro-imán que, por un mecanismo análogo al descrito en la [figura 526](#), trasmite el movimiento a una aguja móvil sobre el cuadrante. En fin, detrás de la caja se halla el timbre de un reloj C, en el cual choca un martillito movido por un electro-imán especial, que recibe la corriente antes de que pase por el de la aguja. Esta transmisión de la corriente en un imán o en otro, se opera por medio del manipulador que vamos a describir.

Consta éste, en primer lugar, de 28 teclas de marfil movibles, con una cruz encima de la primera, una flecha en la última, y las letras del alfabeto en las restantes; además, las teclas de las diez primeras letras llevan escritas también las diez cifras de la numeración decimal.

Más allá de las teclas, en un platillo de madera horizontal, se ven un cuadrante B y dos piececitas  $m$  y  $n$  móviles, y que, por medio de una varilla, pueden ponerse en comunicación con las piezas  $s$  y  $r$ ,  $q$  y  $p$ . El cuadrante B no es más que un comprobador: su aguja debe indicar siempre la misma letra que la última tecla acaba de mover; si no sucede así, es que ha funcionado mal el aparato, y que se ha cometido un error en la transmisión del parte. La pieza  $m$  en contacto con  $s$  sirve para la transmisión de París a Rouen, y en contacto con  $r$  para recibir el despacho del último al primer punto, poniendo en marcha la aguja del cuadrante A. De igual manera, la pieza  $n$  en contacto con  $q$  indica las señales, hace actuar el timbre de Rouen, y en contacto con  $p$  recibe las señales de llamada, es decir, hace funcionar al electro-imán del timbre C por la corriente que llega de Rouen, manifestando así que se va a transmitir una parte. Todas las piezas visibles en la [figura 529](#) ya se han descrito, y por lo tanto, sólo debemos detallar el mecanismo interior que hace mover las teclas.

Este mecanismo ([fig. 530](#)), representado en mayor escala, consta de una placa de cobre V que sustenta las teclas, y un movimiento de relojería P. Para no confundir el dibujo, no representamos más que cuatro teclas, las de las letras C, D, Q, R. El movimiento de relojería, por una serie de ruedas dentadas, tiende a hacer girar la rueda  $r$  y el árbol horizontal  $a$ ; pero éste va sujeto a una rueda de linguete G, retenida por el linguete  $m$ , de modo que no puede girar sino cuando éste se levanta: a este efecto, la pieza  $m$  se halla enlazada con una lámina horizontal  $n$ , la cual, siempre que desciende, hace girar el

linguete  $m$  alrededor de un punto de apoyo, dejando libre la rueda  $G$ . La lámina  $n$ , que recibe su movimiento de las teclas, forma un paralelogramo con una segunda varilla  $F$ , por medio de las articulaciones  $SS$ , de modo que no puede bajar sino paralelamente a sí misma. Cuando no actúan ya las teclas sobre la lámina  $n$ , un resorte  $E$ , que obra sobre la varilla  $F$ , hace subir de nuevo la lámina.

Llegando la corriente de la pila por el alambre  $A$ , toca a una lámina metálica  $i$ , aislada sobre un pie de marfil y en contacto con una rueda  $o$  de 28 dientes: cuando toca uno de éstos, pasa la corriente por la rueda  $o$ , que es metálica, y de aquí por todo el aparato, enteramente de metal, para salir por el alambre  $H$  y recorrer la línea telegráfica hasta Rouen; pero cuando la lámina  $i$  no toca los dientes, no pasa la corriente, de suerte que, durante una revolución completa de la rueda  $o$ , pasa aquélla 28 veces y queda otras tantas interrumpida; resultando así, que en Rouen el electro-imán del receptor ha hecho correr la aguja 28 divisiones sobre su cuadrante.

Sólo nos resta ya explicar cómo, por medio de las teclas, se obtiene el número necesario de interrupciones para hacer avanzar la aguja del receptor de Rouen un número determinado de letras, por ejemplo de  $E$  a  $D$ . Existe, al efecto, debajo de las teclas una varilla horizontal  $aa$ , de acero, en la cual van implantados 28 dientes o levas de acero también, que la rodean en hélice, cual si fuera un tornillo, y dividen la circunferencia de la varilla en 28 arcos iguales, como lo efectúan los dientes de la rueda  $O$ . Finalmente, debajo de las 28 teclas hay en una fila rectilínea, paralela a la varilla  $a$ , 28 puntas de acero que corresponden a cada uno de los dientes, anteriores. Estas puntas chocan con los dientes de la varilla cuando bajan las teclas; pero al subir éstas pasan libremente los dientes, de suerte que la varilla puede pararse en 28 puntos de su completa rotación por medio de la presión de las 28 teclas.

Fácil es darse cuenta ahora del mecanismo del aparato. Si se quiere, por ejemplo, transmitir un parte de París a Rouen, se principia por hacer girar la pieza  $n$  ([fig. 529](#)) sobre el contacto  $q$ , y luego, bajando una tecla cualquiera, pasa la corriente y pone en acción la campanilla de Rouen, pronta siempre a recibir la señal de atención. Poniendo nuevamente la pieza  $n$  sobre el contacto  $p$ , que conduce la corriente al electro-imán del timbre  $C$ , se aguarda a que lo haga sonar Rouen, dando a entender así que está todo dispuesto. Entonces, el encargado en esta última ciudad pone la pieza sobre el contacto  $r$ , y el de París la misma pieza sobre el contacto  $s$  que sirve para la trasmisión. Supongamos que se trata de escribir la palabra FRANCIA: se apoya el dedo sobre la tecla  $F$ , y levantándose el linguete  $m$  ([530](#)), el movimiento de relojería hace girar la rueda  $G$  y la varilla  $a$  hasta que el diente de ésta, que corresponde a dicha tecla, vaya a chocar contra el topecito que hay debajo. Como la letra  $F$  es la sexta, la rueda  $O$  ha de correr seis dientes, resultando de aquí que seis veces ha pasado la corriente, y otras tantas se ha interrumpido, y que, por lo tanto, el electro-imán de Rouen ha hecho avanzar seis letras a la aguja. Ésta, que se hallaba primero sobre la cruz, está ahora sobre la letra  $F$ . Bajando actualmente en París la letra  $R$ , la rueda  $O$  gira doce dientes, y la aguja de Rouen avanza doce letras, es decir, se para en  $R$ , y así sucesivamente para toda la palabra. Al fin de cada una de éstas, se baja la tecla marcada con la cruz.

Para transmitir números en cifras, se baja primero la tecla de la flecha, y luego sucesivamente las de las cifras que han de trasmitirse, bajando luego la marcada con la cruz para indicar que terminó el número.

706. Telégrafo eléctrico marcador o escribiente de Morse. -Los telégrafos eléctricos de cuadrante y de señales, que acabamos de describir uno dejan el menor vestigio de los partes transmitidos, y si se han cometido algunas erratas al copiar los signos, no es fácil rectificarlas. No ofrecen estos inconvenientes los *telégrafos escribientes o marcadores*, que trazan por sí mismos los signos en una tira de papel, a medida que se transmiten.

Se conocen muchos telégrafos de este género; pero el de M. Morse, adoptado en un principio en la América del Norte, lo ha sido sucesivamente en Europa. En este aparato deben estudiarse tres mecanismos distintos, que son el *receptor*, el *manipulador* y el *reemplazo*. Las [figuras 531](#), [532](#) y [533](#) representan estos tres órganos, según los dibujos que se han sacado en los talleres de los señores Mouilleron y Gaussin, distinguidos constructores de aparatos telegráficos.

*Receptor.* -Consideremos este órgano completamente aislado ([figura 531](#)), prescindiendo por un momento de las piezas accesorias G y T, situadas a la derecha del dibujo. La corriente que llega al receptor, entrando por el alambre C, pasa al electro-imán E: éste, siempre que pasa la corriente, atrae una armadura A, fija en el extremo de una palanca horizontal, móvil alrededor del punto x. En el extremo opuesto de esta palanca existe un punzón o estilete o que sirve para escribir los signos, para lo cual una larga tira de papel grueso se introduce entre dos rodillos de cobre de superficie rugosa y que giran en sentido contrario haciendo las veces de un laminador. Tirada de esta suerte la tira de papel en el sentido que indican las flechas, va a envolverse sobre un segundo tambor Q, que se hace girar a mano, aplicando la acción de ésta a un manubrio. Un movimiento de reloj, situado en la caja BD, es el que hace andar los rodillos entre los cuales pasa la tira de papel.

Cuando adquiere ésta un movimiento continuo, lo cual acontece siempre que funciona el electro-imán, el punzón o oprime el papel, y sin agujerearlo, origina en él una impresión cuya forma varía según el tiempo que ha permanecido el estilete en contacto con el papel. Si el contacto sólo es instantáneo, origina un solo punto (.); pero si es aquél de alguna duración, marca una línea más o menos prolongada (-). De esta suerte se puede, haciendo pasar la corriente en la estación de partida, durante un intervalo más o menos prolongado, originar, según se desee, en la estación de término, una línea o un punto, y por lo tanto, combinaciones distintas con estos dos elementos. Conseguido esto, sólo falta dar a dichas combinaciones una significación determinada, lo cual se ha obtenido representando las letras del alfabeto por las siguientes combinaciones:

Un punto y una línea (-.) representan la letra	A
Una línea y tres puntos (-...)	B
Tres puntos (...)	C
Una línea y dos puntos (-..)	D,

y así sucesivamente, hasta combinar palabras y frases, procurando dejar un espacio blanco entre cada letra.

*Manipulador.* -Consta este órgano de una pequeña plancha de caoba, que sirve de soporte a una palanca metálica *ab* ([fig. 532](#)), movable en su centro sobre un eje horizontal, y cuyo extremo a tiende siempre a elevarse por efecto de un resorte situado en su parte inferior, de manera que sólo al apoyar el dedo sobre la tecla B, es cuando

desciende la palanca, tocando al botón  $x$ . Finalmente, alrededor de la plancha existen tres roldanas que se encuentran en comunicación, una con el alambre P, que viene del polo positivo de la pila de la estación; la segunda, con el alambre L, que es el de la línea, y la tercera con el A, que se dirige al receptor.

Expuestos estos detalles, es preciso considerar dos casos: 1.º cuando el manipulador se encuentra dispuesto para recibir un parte de una estación distante, en cuyo caso el extremo  $b$  se encuentra en descenso, como lo indica la [figura 532](#), de manera que la corriente que llega por el alambre de la línea L, y que asciende a la pieza metálica  $m$ , vuelve a descender al alambre A, que la conduce al receptor de la estación, en la cual se encuentra el aparato. 2.º Cuando se trata de transmitir un parte; en este caso se apoya la mano sobre la tecla B, de suerte que la palanca se ponga en contacto con el botón  $x$ . La corriente de la pila de la estación que llega por el alambre P, sube entonces a la palanca, desciende por la pieza  $m$  y llega al alambre de la línea que la conduce a la estación a la cual se dirige el parte. Según el tiempo que se aprieta la tecla B, así se produce en el receptor al cual concurre la corriente, o un punto o una línea: el primero si se efectúa tan sólo un pequeño choque sobre el botón  $x$ , y la línea, si el contacto se prolonga durante un intervalo de tiempo, siquiera sea sumamente limitado.

*Reemplazo.* -Al describir el receptor hemos supuesto que la corriente de la línea, llegando por el alambre C ([fig. 531](#)), entraba directamente en el electro-imán, y que era la que hacía operar la armadura A, e imprimía el parte. Esta suposición no es exacta, porque cuando la corriente ha recorrido, aunque sólo sean diez kilómetros, ha perdido hasta tal punto su intensidad, que le es imposible comunicar al electro-imán una potencia suficiente para imprimir el parte, por cuya razón debe recurrirse a un *reemplazo* o sea a un *electro-imán* auxiliar, también recorrido por la corriente de la línea, pero que sirve para introducir en el receptor la corriente de una *pila local* de 4 o 5 elementos, situada en la estación, y sin otro empleo más que el de imprimir los signos transmitidos por el alambre de la línea. A este efecto, la corriente de la línea entra en el relevo por la roldana L ([fig. 533](#)), sigue al electro-imán E, desde el cual pasa a perderse en seguida en el suelo por la roldana T. Así, pues, cada vez que la corriente de la línea pasa al reemplazo, atrae el electro-imán una armadura A, fija en la parte inferior de una palanca vertical  $p$ , que oscila alrededor de un eje horizontal.

A cada oscilación, la palanca  $p$  va a chocar por su parte superior con un botón  $n$ , y en dicho instante la corriente de la pila local, que llega por la roldana  $c$ , sube a la columna  $m$ , pasa por la palanca  $p$ , y desciende por el vástago  $o$  que la conduce a la roldana Z; desde ésta pasa al electro-imán del receptor, del cual sale por el alambre Z ([fig. 531](#)) para regresar a la misma pila local, de la cual salió. Después, cuando se interrumpe la corriente del alambre de la línea, no siendo ya atractivo el electro-imán del reemplazo, la palanca  $p$ , empujada por un resorte espiral  $r$ , se separa del botón  $n$  como indica el dibujo, y la corriente de la pila local deja de pasar.

Esta descripción nos manifiesta que el reemplazo trasmite exactamente al receptor las mismas fases de paso o intermitencia que las que origina el manipulador en la estación que expide el parte.

Con una pila de línea de 25 elementos, de Daniell, conserva aún la corriente bastante intensidad a 160 kilómetros de su punto de partida para poner en acción un reemplazo.

Respecto a una distancia mayor, es indispensable recurrir a una nueva corriente, como lo veremos en el párrafo cuyo epígrafe es el de *cambio de corriente*.

*Marcha final de la corriente en los tres aparatos.* -Descritos los tres órganos principales del telégrafo de Morse, veamos cuál es la marcha real de la corriente en el conjunto de los mismos.

Llegando la corriente de la línea por el alambre L (531), pasa en un principio a la pieza T, que sirve de pararrayos, en el caso en que por la influencia de la electricidad atmosférica al surgir una tempestad, se cargasen los alambres conductores de una cantidad de electricidad suficiente para originar chispas peligrosas. La pieza que hace las veces de pararrayo, consta de dos discos de cobre *d* y *f*, provistos de dientes en las caras que se miran sin tocarse. El disco *d* se encuentra en comunicación con la tierra por medio de una lámina metálica, fija detrás de la tabla que sostiene el pararrayos, al paso que el disco *f* se encuentra en la corriente. Para que sea así, llegando ésta por el alambre de la línea L, entra en el pararrayo por la roldana fija en la parte inferior de la plancha, hacia la izquierda; sube en seguida a un conmutador *n* que la conduce al botón *c*, del cual pasa al disco *f* por una lámina metálica dispuesta detrás de la plancha. Actuando la electricidad por influencia sobre el disco *d*, se desprende por las puntas sin peligro alguno respecto a los que se encuentran junto al aparato. Además del disco *f*, pasa la corriente a un pequeño alambre de hierro muy delgado, aislado y contenido en el tubo *e*, cuyo alambre fundido por la corriente, cuando es demasiado intensa, impide que la electricidad se dirija al aparato, precaviendo cualquier peligro.

Finalmente, desde el pie del soporte *s* pasa la corriente a un pequeño galvanómetro G que sirve para indicar, por la desviación de la aguja, si se trasmite la corriente al aparato. Del mencionado galvanómetro se encamina la corriente al manipulador (fig. 532), en el cual entra por L y sale por A para pasar al reemplazo (fig. 533). Entrando en éste por L, hace funcionar el electro-imán, y establece la comunicación indispensable para el paso de la corriente de la pila local, como hemos manifestado al ocuparnos del reemplazo.

*Cambio de corriente.* -Para completar la descripción del aparato de Morse, importa observar que la corriente de la línea que llega a L (fig. 531) y que en general, después de un recorrido de diez kilómetros, no posee bastante energía para anotar el parte, no tiene en seguida suficiente intensidad para seguir propagándose hacia una nueva estación distante, por lo cual conviene que en cada parada telegráfica adquiera una nueva corriente, o sea la de la *pila de la parada* o *estación*, que consta de 20 a 30 elementos de Daniell, y que no viene a ser otra cosa, que la que ya hemos designado con la calificación de *pila local*.

Esta nueva corriente de la pila de la estación entra por P (fig. 531), llega a un tope que la conduce a la columna H, y sólo sigue a mayor distancia cuando desciende la armadura A. En efecto, una pequeña pieza, situada en la parte inferior de la palanca, tocando entonces al botón *v*, hace que vaya la corriente de la columna R a toda la masa metálica BD, desde cuyo punto, por un tope y por un alambre que no se han representado en la figura, alcanza por fin al alambre de la línea que se trasmite a la estación siguiente, y así sucesivamente, de una a otra.

707. Telégrafo electro-químico marcador de Bain. -Se denominan *telégrafos electro-químicos*, los aparatos que marcan los partes con signos coloreados sobre un papel impregnado de ferrocianuro de potasio, sal que descompone la corriente de una pila local, en la estación que recibe el parte telegráfico, siempre que pase al través del papel.

Somos deudores al escocés Bain del primer telégrafo de esta clase en él se representan las letras por los mismos signos que en el telégrafo de Morse, es decir, por combinaciones de líneas y de puntos; pero el despacho debe *combinarse* de antemano, en la estación que lo comunica, sobre una larga tira de papel común. Para efectuarlo, se taladra ésta con un sacabocados, según varios agujeros pequeños que representan los puntos del telégrafo de Morse, y otros agujeros prolongados que corresponden a las líneas. Hecha esta operación, se interpone la tira de papel entre una pequeña roldana metálica y una lámina elástica igualmente metálica, cuyas dos piezas forman parte de la corriente de la pila de la estación. Al girar la roldana, arrastra consigo la batida de papel, cuyas partes van pasando sucesivamente entre la roldana y la lámina. Si el papel no se hubiese agujereado, se opondría constantemente al paso de la corriente por no ser cuerpo conductor; pero en virtud de los agujeros practicados en el mismo, siempre que pasa uno de ellos, media contacto entre la roldana y la lámina, y pasa la corriente que pone en acción el relevo en la estación de salida, trazando en matiz azul, sobre un disco de papel impregnado de cianuro la misma serie de puntos y de líneas que sobre la tira agujereada de papel.

M. Pouget-Maisonneuve ha construido un telégrafo en el cual se imprime el parte, en la estación que lo recibe, por el procedimiento químico de Bain, sin tenerse que combinar en la que lo trasmite, y sí enviarse directamente por medio del manipulador de Morse ([fig. 532](#)).

708. Relojes eléctricos. -Estos aparatos son movimientos de relojería, cuyo electro-imán es a un tiempo el motor y regulador, por medio de una corriente eléctrica sucesivamente interrumpida. La [figura 534](#) representa el cuadrante de dicho reloj, y la [535](#) el mecanismo para la marcha de las agujas.

Un electro-imán B atrae una pieza de hierro dulce P, móvil sobre un eje *a*. La pieza P trasmite su movimiento de vaivén a una palanca *s*, la cual, por medio de un linguete *n*, hace girar la rueda A. Ésta, por el piñón D, obliga a dar vueltas a la rueda C, que hace marchar las agujas por una serie de ruedas y de piñones. La menor marca las horas, y la mayor los minutos; pero, como no anda de un modo continuo esta última, sino por saltos bruscos efectuados de segundo en segundo, se emplea este movimiento para marcar los segundos.

Es evidente que la regularidad del movimiento de las agujas, depende de la regularidad de las oscilaciones de la pieza P. Antes de pasar por el electro-imán B, están reguladas las intermitencias de la corriente por un primer reloj tipo, regulado a su vez por un péndulo de segundos. A cada oscilación del péndulo, pasa la corriente una vez y se interrumpe otra, resultando de aquí que la pieza P bate exactamente los segundos.

Sentado esto, veamos el uso de estos relojes: supongamos que en el camino de hierro de París a Bouen, posean todas las estaciones un reloj semejante al que acabamos de describir, y que de un reloj tipo de la primera población parte un alambre conductor a todos los relojes de la línea hasta Rouen. Haciendo pasar una corriente por este alambre,

marcarán instantáneamente todos los relojes enumerados la misma hora, el mismo minuto y el mismo segundo; pues no tardaremos en ver que la electricidad de la pila recorre 43000 leguas por segundo, velocidad que, hace inapreciable el tiempo que tarda la corriente en propagarse de París a Rouen.

709. Motores electro-magnéticos. -Muchísimas tentativas se han hecho para utilizar la fuerza atractiva de los electro-imanés como fuerza motriz en las máquinas. La [figura 536](#) representa una máquina de este género, construida por M. Froment. Se compone de cuatro poderosos electro-imanés A, B, C, D, sujetos en un armazón de hierro fundido X. Entre estos electro-imanés hay un sistema de dos ruedas de igual metal, móviles sobre un eje horizontal, y que llevan sobre su contorno ocho armaduras de hierro dulce M.

La corriente de la pila llega a K, sube por el alambre E, y atraviesa el arco metálico O, que sirve para dar paso sucesivo a la corriente en cada electro-imán, de modo que no se contraríen las atracciones en las armaduras M, y sí que todas tengan el mismo sentido. No puede satisfacerse esta condición, sino en tanto que se interrumpe la corriente en cada electro-imán en el momento en que una armadura se pone delante de los ejes de los carretes. Para obtener esta interrupción, posee el arco O tres ramas *e*, terminadas cada una de ellas por una lámina de acero, en la cual está fija una pequeña polea. Dos de éstas establecen la comunicación respectivamente con un electro-imán, y la tercera con dos. Una rueda central *a* cuenta varias levas, sobre las cuales se apoyan alternativamente las poleas, y así es que siempre que una de éstas reposa sobre una de las levas, pasa la corriente por el electro-imán correspondiente, pero deja de pasar luego que cesa el contacto. Al salir de los electro-imanés, la corriente regresa al polo negativo de la pila por el alambre H.

Mediante esta disposición, son sucesivamente atraídas las armaduras M por los cuatro electro-imanés, y por lo mismo el sistema de ruedas que los sostiene adquiere un rápido movimiento de rotación que, por la rueda P y una correa sin fin, se trasmite a la polea Q y de ésta a una máquina cualquiera, por ejemplo, a una que sirva para triturar.

M. Froment tiene en sus talleres una máquina electro-motora de la fuerza de un caballo de vapor. Pero hasta ahora no han podido aplicarse a la industria estas máquinas, porque el gasto de ácidos y de zinc que originan es muy superior al del combustible en las máquinas de vapor de igual fuerza. La aplicación de las máquinas electro-motoras depende particularmente en la actualidad, de las mejoras que experimentará la pila.

△

## Capítulo VI

▽△

### Fenómenos de inducción

710. Inducción por las corrientes. -Ya hemos visto (601) que se designa, en general, con el nombre de *inducción* la acción que ejercen a distancia los cuerpos electrizados sobre los que se hallan en el estado neutro; pero se usa particularmente esta denominación cuando se trata de los efectos que produce la electricidad dinámica. M. Faraday, que fue

el primero que en 1832 dio a conocer esta clase de fenómenos, ha llamado *corrientes de inducción* o *corrientes inducidas*, a unas instantáneas que se desarrollan en los conductores metálicos por la influencia de las corrientes eléctricas y por la de poderosos imanes, o bien por la acción magnética de la tierra.

Compruébase la inducción que producen las corrientes por medio de un carrete de dos alambres. Así se denomina un cilindro de cartón o de madera, sobre el cual se arrollan en hélice, primero un grueso alambre de cobre, y luego otro más fino, cubiertos ambos de seda ([fig. 537](#)). Puestos en comunicación los dos extremos del alambre *a* y *b* con los de un galvanómetro, se hace pasar una corriente voltaica por el alambre grueso *cd*, que es el alambre *inductor*. Entonces se observan los fenómenos siguientes:

1.º En el momento en que una corriente principia a atravesar al alambre *cd*, de *c* hacia *d*, por ejemplo, la desviación de la aguja del galvanómetro indica en el alambre *ab* una corriente inversa de la primera, es decir, en sentido contrario, pero que sólo se produce durante muy poco tiempo, porque vuelve al punto la aguja al cero, permaneciendo en él mientras la corriente inductora pasa por el alambre *cd*.

2.º En el momento en que, interceptadas las comunicaciones, deja de atravesar una corriente al alambre *cd*, se produce de nuevo en el *ab* una corriente inducida, instantánea como la primera, pero *directa*; esto es, en el mismo sentido que la corriente inductora.

Pueden compararse estos fenómenos con los estudiados en la electricidad estática, conocida con el nombre de electricidad por influencia (601); y efectivamente, pueden considerarse como el resultado de la descomposición y de la recomposición, de molécula a molécula, de la electricidad natural del alambre inducido por la influencia de la electricidad que se propaga por el alambre inductor. Esta teoría de los fenómenos de inducción es la que M. de la Rive adopta en su *Tratado de electricidad*.

711. Aparato de inducción de M. Matteucci. -La [fig. 538](#) representa un aparato inventado por M. Matteucci, y construido por M. Ruhmkorff, en París, muy a propósito para demostrar el desarrollo de las corrientes de inducción, producidas, sea por la descarga de una botella de Leyden, o bien por el paso de una corriente voltaica.

Se compone este aparato de dos platillos de vidrio, de unos treinta y tres centímetros de diámetro, fijos verticalmente en dos marcos A y B de latón. Se hallan sostenidos dichos platillos por pies movibles que pueden acercarse o alejarse según se quiera. En la cara anterior del platillo A está arrollado en espiral un alambre de cobre C, de un milímetro de espesor y de 25 a 30 metros de longitud. Las dos extremidades de este alambre pasan al través del platillo, el uno por el centro, y el otro por la parte superior, terminando en dos pincitas semejantes a las *m* y *n* del platillo B. Entran en estas pinzas dos alambres de cobre cubiertos de seda *c* y *d*, que reciben la corriente inductora.

En la cara del platillo B, que mira al A, se arrolla también en espiral un alambre de cobre, pero más fino que el C. Terminan sus extremidades en las pinzas *m* y *n*, que reciben dos alambres *h* e *i*, para que transmitan la corriente inducida. Los dos alambres arrollados en los platillos A y B están, no sólo cubiertos de seda, sino que además cada circunvolución se halla aislada de la siguiente por una espesa capa de barniz de goma

laca, que es condición indispensable para experimentar con la electricidad de las máquinas eléctricas, la cual se aísla siempre con mayor dificultad que la de las pilas.

Para demostrar la producción de la corriente inducida por la descarga de una botella de Leyden, se hace comunicar, como indica la figura, uno de los extremos del alambre C con la armadura exterior de la botella, y el otro con el gancho, y al instante en que surge la chispa, obrando por influencia la electricidad que pasa por el alambre C sobre el fluido neutro del alambre arrollado en B, se origina en este alambre una corriente instantánea. En efecto, una persona que tenga en las manos dos cilindros de cobre que estén en comunicación con los alambres *i* y *h*, recibe una conmoción, cuya intensidad es tanto mayor cuanto más aproximados se hallan los platillos A y B. Este experimento demuestra que la electricidad de las máquinas eléctricas, lo mismo que la de la pila, puede dar origen a corrientes de inducción.

El aparato de M. Matteucci sirve también para demostrar la producción de las corrientes inducidas por la influencia de las corrientes voltaicas. Se hace pasar la corriente de una pila por un alambre inductor C, y al mismo tiempo se ponen en comunicación los dos alambres *h* e *i* con un galvanómetro. Obsérvanse, en el momento en que principia o acaba la corriente inductora, los mismos fenómenos que con el aparato de la [figura 537](#), desviándose tanto más la aguja del multiplicador, cuanto más aproximados están los platillos A y B.

712. Inducción por los imanes. -Se ha visto que la influencia de una corriente imanta una barra de acero (699); y recíprocamente un imán puede originar, en los circuitos metálicos, corrientes de inducción. Demostrolo M. Faraday por medio de un carrete de un solo alambre de 200 a 300 metros de longitud. Puestos sus dos extremos en comunicación con un galvanómetro, como lo indica la [figura 539](#), se introduce bruscamente en el carrete, que está hueco, una gran barra imantada, observándose entonces los fenómenos siguientes:

1.º En el momento en que se introduce la barra, indica el galvanómetro en el alambre una corriente inducida instantánea, inversa de la que existe alrededor de la barra, comparando ésta a un solenoide, conforme se hace en la teoría de Ampere (698).

2.º En el instante en que se retira la barra, la aguja del galvanómetro, que había vuelto al cero, indica una corriente inducida directa.

También se puede comprobar la influencia inductora de los imanes por medio del experimento que sigue: se coloca, en el carrete de un solo alambre, una barra de hierro dulce, y se acerca bruscamente un poderoso imán; desvíase la aguja del galvanómetro, volviendo al cero luego que se fija el imán; y se desvía en sentido contrario cuando se le aleja. La inducción es producida aquí por la imantación del hierro dulce bajo la influencia de la barra imantada.

Obtiénense los mismos efectos de inducción en el alambre de un electro-imán, si delante de sus extremidades se hace girar con rapidez una gran barra imantada, de modo que actúen sus polos sucesivamente por influencia sobre las dos ramas del electro-imán; o bien todavía, formando dos carretes alrededor de un imán en herradura, y haciendo pasar una placa de hierro dulce con rapidez delante de los polos del imán; pues

reacciona sobre este el hierro dulce imantado por influencia, resultando así, en el alambre, corrientes inducidas que poseen sucesivamente sentidos contrarios.

713. Inducción por los imanes en los cuerpos en movimiento. -Arago observó por vez primera en 1824, que el número de oscilaciones que da una aguja imantada, en tiempos iguales, cuando se la separa de su posición de equilibrio, disminuye en gran manera por la aproximación de ciertas masas metálicas, y especialmente del cobre, que puede reducir el número de oscilaciones de 300 a 4. Esta observación condujo al mismo físico, en 1825, a un hecho no menos inesperado, cual es el de la acción rotatoria que ejerce una placa de cobre en movimiento sobre una aguja imantada.

Compruébase este fenómeno por medio de un aparato ([fig. 540](#)) que se compone de un disco metálico M, móvil alrededor de un eje vertical, sobre el cual existe una polea B, en la que se arrolla un cordón sin fin que va a pasar por otra polea mayor A. Haciendo girar ésta con la mano, se puede comunicar al disco M un movimiento muy rápido de rotación. Encima del disco está fija una lámina de vidrio con un estilete que sostiene una aguja imantada *ab*. Si el disco acepta un movimiento lento y uniforme, se desvía la aguja en el sentido del movimiento, y se para a 20 o 30 grados del meridiano magnético, según la velocidad de rotación del disco. Pero si aumenta esta velocidad, se desvía al fin más de 90 grados la aguja, y arrastrada entonces, describe una revolución entera, y sigue el movimiento del disco hasta que se para éste.

El efecto disminuye con la distancia de la aguja al disco, y varía mucho con la naturaleza del mismo. Se nota el máximo de efecto en los metales; y con la madera, el vidrio, el agua, etc., es nulo. Los señores Babbage y Herschell, en Inglaterra, encontraron que, representando por 100 la acción de un imán sobre un disco de cobre, en los demás metales vale los números siguientes: zinc, 95; estaño, 46; plomo, 25; antimonio, 9; bismuto, 2. Por último, es muy débil el efecto si ofrece la placa soluciones de continuidad, sobre todo en el sentido de sus radios; pero los mismos físicos se cercioraron de que recobra sensiblemente la misma intensidad, si se sueldan las soluciones de continuidad con un metal cualquiera.

Arago ha reconocido que la fuerza que imprime el movimiento de rotación a la aguja es la resultante de otras tres fuerzas: una perpendicular al plano del disco, y que obra por repulsión sobre la aguja; la segunda, dirigida en el sentido del radio del disco, y que actúa desde luego por repulsión sobre la aguja, a contar desde la circunferencia del disco, decreciendo después a medida que se aproxima al centro, para cambiarse en fuerza atractiva cuando se acerque más a este punto, y quedar nula en este mismo. Finalmente, la tercera fuerza, paralela al plano del disco, es perpendicular, en cada punto, al radio, y su acción es atractiva: esta última fuerza es, pues, la que hace girar a la aguja. Arago no descubrió el origen de estas diferentes fuerzas, y Faraday fue el primero que, en 1832, hizo ver, con el auxilio del galvanómetro, que eran originadas por corrientes de inducción desarrolladas en los discos por la influencia de la aguja imantada.

714. Inducción por la acción de la tierra. -M. Faraday ha sido el primero en reconocer que el magnetismo terrestre puede desarrollar corrientes inducidas en los cuerpos metálicos en movimiento, obrando como un poderoso imán colocado en el interior del globo en la dirección de la aguja de inclinación, o conforme a la teoría de Ampere (698), como un circuito de corrientes eléctricas dirigidas del este al oeste paralelamente

al ecuador magnético. Lo manifestó desde luego colocando una larga hélice de alambre de cobre, recubierto de seda, en el plano del meridiano magnético, paralelamente a la aguja de inclinación: haciendo girar esta hélice de 180 grados alrededor de un eje que la atravesaba en su mitad, observó que a cada semi-revolución un galvanómetro, puesto en comunicación con los extremos de la hélice, era desviado. Para demostrar las corrientes inducidas desarrolladas por la acción de la tierra, se ha construido el aparato representado en la [figura 541](#). Se compone de un anillo circular de madera MN, fijo en un árbol horizontal, con el cual puede girar según un movimiento más o menos rápido. Alrededor de este anillo existe una garganta, sobre la cual se arrolla un largo alambre de cobre recubierto de seda. Los dos extremos de este alambre se dirigen a un conmutador a análogo al del aparato de Clarke (718), y por el cual se puede obtener siempre una corriente del mismo sentido. En fin, los dos conductores, en contacto con el conmutador, están en comunicación, por medio de dos alambres de cobre, con un galvanómetro. Sentado esto, estando dirigido el eje del anillo hacia el meridiano magnético perpendicularmente a la aguja de inclinación, y verificándose, por consiguiente, la rotación de cada punto del anillo en planos perpendiculares a este meridiano, al momento que se hace girar al anillo, se ve desviar la aguja del galvanómetro de este a oeste, según el sentido de la rotación.

715. Dirección de las corrientes inducidas sobre los discos giratorios. -M. Faraday es el primero que ha investigado cuál era la dirección de las corrientes inducidas sobre la superficie de los discos metálicos, al girar ante los polos contrarios de dos poderosos imanes. Su procedimiento consiste en poner uno de los extremos del alambre del galvanómetro en contacto con el eje del disco giratorio, y el otro extremo con diferentes puntos de la circunferencia del mismo disco. Así ha demostrado según la desviación de la aguja del galvanómetro, que, durante la rotación del disco, se producen en su superficie corrientes inducidas que se dirigen del centro a la circunferencia, o de la circunferencia al centro, según el sentido de la rotación, y que estas corrientes son simétricas con relación al diámetro polar, es decir, que pasa por encima de los polos de los imanes.

Los señores Nobili y Antinori se han ocupado también de investigar la dirección de las corrientes inducidas sobre los discos giratorios, y para esto, estando en contacto con el eje del disco uno de los extremos del alambre del galvanómetro, hacían comunicar el otro extremo, no sólo con la circunferencia del disco, sino también con los diferentes puntos de su superficie. De esta suerte observaron que sobre las partes del disco que se hallan bajo la influencia magnética, se desarrolla constantemente un sistema de corrientes contrarias a las del imán, y que, sobre las partes no sometidas a dicha influencia, se producen corrientes del mismo sentido que en el imán, y por consiguiente contrarias a las primeras.

Habiendo estudiado M. Matteucci los mismos fenómenos, aunque con más precisión, ha reconocido que son más complicados que lo que pensaba. La [fig. 542](#) representa el aparato empleado por este físico. Se compone de una caja de madera, en la cual una serie de engranajes transmiten, mediante un manubrio M, un movimiento de rotación más o menos rápido a un disco de metal A, de 20 centímetros de diámetro. Debajo del disco, a una distancia de 2 a 3 milímetros, existe un poderoso electro-imán *ab*, que se mueve en una ranura, de manera que pueda presentar sus polos sucesivamente a todos los puntos del disco. Finalmente, encima del disco hay dos varillas de cobre *m* y *n*, terminadas cada una por una punta roma y amalgamada, que están en contacto con el

disco. Estas mismas varillas comunican, por su extremidad superior, con los dos extremos del alambre del galvanómetro; además, por la disposición de los sostenes, a los cuales están fijas, pueden ocupar todas las posiciones con relación al centro y circunferencia del disco.

Ahora bien, mediante este aparato, y poniendo uno de los extremos del alambre del galvanómetro en contacto con el centro, y el otro con los diferentes puntos de la superficie del disco, M. Matteucci ha demostrado los hechos siguientes, representados en la [fig. 543](#), en la cual los puntos N y S son las proyecciones de los dos polos del electro-imán, y AB la recta que pasa sobre estos dos polos:

1.º M. Matteucci ha encontrado *líneas de corriente nula*, *a, b, c, d, e*, que son normales a la línea AB, y se contornean cerca de los bordes del disco, de manera que los cortan perpendicularmente.

2.º La proyección de cada polo del electro-imán sobre el disco es un *punto neutro*, es decir, de corriente nula; además, una línea neutra *rr*, sensiblemente circular, que pasa por las proyecciones de los dos polos, y tiene por centro el eje del electro-imán, es al mismo tiempo *línea de inversión*, es decir, que las corrientes en el interior y en el exterior de estas líneas son de dirección contraria.

3.º Las *líneas de corrientes eléctricas*, es decir, aquéllas según las cuales se efectúa el máximo de efecto, cortan siempre normalmente las líneas de corriente nula y son tangentes a la recta AB; las líneas de corriente máxima están representadas en *m, n, p, q*, en la figura anterior.

4.º La posición de la línea neutra *rS, rN*, que pasa por las proyecciones de los dos polos, no es sensiblemente modificada por la naturaleza del disco, ni por su espesor, ni por la intensidad de la corriente de la pila, pero esta línea se repliega sobre sí misma a medida que la velocidad de rotación aumenta.

5.º Finalmente, de cada lado de los puntos neutros, sobre el diámetro polar, se encuentran dos puntos *máxima* cuya distancia depende del grueso del electro-imán, y del diámetro del disco giratorio.

Para mayores detalles respecto a estos curiosos fenómenos, convertimos la atención del lector sobre el *Curso especial respecto a la inducción y al magnetismo de rotación*, publicado a fines de 1854 por M. Matteucci.

716. Inducción de una corriente sobre sí misma; extra-corriente. -Cuando el alambre que da paso a una corriente voltaica está contorneado sobre sí mismo en hélice, se observa que las espiras de esta curva reaccionan unas sobre otras para dar más intensidad a la corriente. En efecto, con una pila de algunos pares de Bunsen, por ejemplo, no se obtiene más que una chispa apenas sensible, al cerrar la corriente, si el alambre que reúne los dos polos es corto y no está arrollado. Además, si se forma parte del circuito, teniendo en cada mano un electrodo, no se siente conmoción alguna. Por el contrario, si el alambre es largo y está arrollado muchas veces sobre sí mismo, de modo que forme un carrete de pliegues próximos, es nula la chispa al cerrar la corriente, pero adquiere una intensidad bastante considerable cuando se la abre; y si una persona se encuentra en

la corriente, siente, en este último caso, una conmoción tanto más fuerte, cuanto mejor establecido está el contacto con las manos y cuanto más grueso es el carrete.

M. Faraday ha demostrado, por medio de ingeniosos experimentos, que se debe esta influencia de un carrete introducido en el circuito, a una acción inductriz que ejerce la corriente sobre el mismo alambre que recorre, así en el momento de cerrar, como en el de abrir el circuito.

Al cerrarse, por la acción mutua de las espiras del carrete entre sí, se origina, en sentido contrario de la corriente principal, una inducida que se designa con la denominación de *extra-corriente inversa*; mientras que en el momento de la ruptura, la corriente inducida que surge, es del mismo sentido que la corriente principal, de cuyo hecho toma origen el nombre de *extra-corriente directa*, con el cual se designa.

Siendo esta última corriente de igual sentido que la principal, se aúna con ella y aumenta la chispa de ruptura; por el contrario, la extra-corriente inversa, siendo de sentido contrario a el de la corriente principal, disminuye la intensidad y debilita o anula la chispa en el momento del cierre. Así pues, sólo en la ruptura puede originar efectos enérgicos la extra-corriente combinada con la principal.

Para recoger la extra-corriente directa, se suelda en cada uno de los extremos del alambre de un carrete simple, o sea de un solo alambre, un apéndice metálico, como por ejemplo, una placa de cobre, y cogiendo una en cada mano, se las hace comunicar entre sí por el conductor que quiere someterse a la extra-corriente, produciéndose ésta a cada interrupción de la corriente que pasa por el hilo del carrete. Obrando así, se nota que la extra-corriente directa origina violentas conmociones, e intensas chispas, descomponiendo el agua, fundiendo el platino y desviando la aguja imantada. Según M. Abria, que ha efectuado numerosas investigaciones sobre las corrientes de inducción, la intensidad de la extracorrente es aproximadamente igual a 0,72 de la de la corriente principal.

Los efectos que acabamos de enumerar adquieren una intensidad mucho más enérgica si se introduce en el carrete una barra de hierro dulce, o lo que viene a ser lo mismo, si se hace pasar la corriente por los carretes de un electro-imán. Este hecho es igualmente un fenómeno de inducción, originado por la reacción del hierro dulce siempre que cesa su imantación.

En los hechos expuestos se superponen los efectos de las dos extra-corrientes a los de la principal; pero esta dificultad ha desaparecido merced a una disposición de varios aparatos, de que somos deudores al sabio alemán M. Edlund, la cual permite anular por completo la acción de la corriente principal sobre los instrumentos que la miden, dejando subsistir únicamente la de la extra-corriente. Efectuando de esta suerte sus experiencias, M. Edlund ha descubierto las dos leyes siguientes:

1.<sup>a</sup> *Cada una de las extra-corrientes es proporcional a la intensidad de la corriente inductora.*

2.<sup>a</sup> *La extra-corriente directa es siempre algo más débil que la extra-corriente inversa: esto puede explicarse observando que en el momento en el cual se interrumpe el circuito, después de haberle cerrado durante algún tiempo, se debilita la corriente*

principal por la polarización que constantemente se produce con mayor o menor intensidad en la pila (650), resultando de aquí que la corriente inductora es más débil en el momento de la interrupción que en el del cierre. Admite además M. Edlund que son iguales las extra-corrientes, cuando menos respecto a las cantidades totales de electricidad que hacen pasar en una misma sección del alambre; con relación a las acciones magnetizantes o fisiológicas, difieren las dos corrientes. En efecto, según las investigaciones de M. Rijke, la extra-corriente inversa posee, en este caso, una intensidad de mayor o menor duración que la extra-corriente directa, resultado contrario al que era de esperar, teniendo en cuenta las propiedades conocidas de las corrientes inducidas (*Anales de química y de física*, año de 1858, t. LIII, P. 59).

717. Corrientes inducidas de diferentes órdenes. -A pesar de su instantaneidad pueden las mismas corrientes inducidas, por su influencia sobre los circuitos cerrados, originar nuevas corrientes inducidas, éstas después a otras, y así sucesivamente, produciendo *corrientes inducidas de diferentes órdenes*.

Compruébanse estas corrientes, descubiertas por M. Henry, de Nueva-Jersey, haciendo actuar unos sobre otros, una serie de carretes formados cada uno por un alambre de cobre cubierto de seda, contorneado sobre sí mismo en espiral en un mismo plano, según se ve en el platillo A de la figura 538. Debe observarse que las corrientes que entonces se producen siguen alternativamente una dirección contraria, y que su intensidad decrece a medida que su orden es más elevado.

▽△

## **Aparatos fundados en las corrientes de inducción**

7180. Aparato de Clarke. -M. Clarke ha construido en Londres un aparato que produce todos los efectos de las corrientes de inducción magnética. Se compone de un haz imantado A ([fig. 544](#)), muy poderoso, encorvado en herradura y aplicado verticalmente según la longitud de una plancha de madera. Delante de este haz existe un electro-imán BB', móvil alrededor de un eje horizontal. Sus carretes están formados sobre dos cilindros de hierro dulce unidos por un extremo por una placa V, del mismo metal, y en el otro por una segunda plancha de latón de igual forma. Estas dos placas se encuentran fijadas en un eje de cobre que remata según una extremidad por un conmutador *gi*, y en la otra por una polea, a la cual se trasmite el movimiento por medio de una correa sin fin y de una gran rueda R movida por un manubrio.

Cada carrete consta de un alambre de cobre muy fino que da 1500 vueltas, y que está cubierto de seda. Un extremo del alambre del carrete B se retiene, sobre el eje de rotación, con otro del de B', y los otros dos extremos, rematan en un casquillo de cobre *q*, sujeto en el eje, pero aislado de él por una cubierta cilíndrica de marfil. Se procura que en los extremos reunidos tenga igual dirección la corriente inducida, lo cual se consigue arrollando los alambres en sentidos contrarios en los dos carretes.

Ahora bien, cuando gira el electro-imán, se imantan alternativamente sus dos ramas en sentido contrario por la influencia del imán *i*, y en cada alambre se produce una corriente inducida que cambia de dirección a cada semi-revolución. Para seguir la

marcha de estas corrientes, es preciso recordar que los dos extremos del alambre que terminan en el casquillo  $q$  dan una corriente en igual sentido, sucediendo otro tanto con los que se reúnen en el eje. Pero como delante del casquillo  $q$  hay otro segundo  $o$  formado de dos piezas iguales, aislados entre sí, pero en comunicación el uno con  $q$  y el otro con el eje, resulta de esta disposición que, durante la rotación del electro-imán, cada mitad del casquillo  $o$  representa un polo que cambia de signo a cada semi-revolución. Desde las dos piezas  $o$  pasa la corriente a las láminas de latón  $b$  y  $c$ , fijas en las placas de cobre  $m$  y  $n$ ; y, merced a esta disposición, posee constantemente el mismo sentido la corriente en cada lámina  $b$  y  $c$ . En efecto, la lámina  $c$ , por ejemplo, toca sucesivamente las dos piezas  $o$ , y por lo tanto, se pone sucesivamente en comunicación con el eje y con  $q$ , y, por lo tanto, con dos extremos de los alambres y en seguida con los otros dos. Pero, estando arrollados los alambres en sentidos contrarios, cuando el carrete B, ocupa el puesto de B, la corriente del casquillo  $q$ , lo mismo que el del eje, cambia de signo; y, por consiguiente, sucede otro tanto a cada mitad del casquillo  $o$ ; y, como ahora la lámina  $c$  toca una mitad distinta de la que antes tocaba, es preciso que continúe cruzándola una corriente de igual sentido.

Sólo con las dos láminas  $b$  y  $c$ , no podrían reunirse las dos corrientes contrarias que parten de las dos piezas  $o$ : pero se consigue esto por medio de una tercera lámina  $a$  y de dos apéndices  $i$ , uno de los cuales es tan sólo visible en la figura. Estos dos apéndices se hallan aislados entre sí sobre un cilindro de marfil, pero comunican respectivamente con las piezas  $o$ . Siempre que  $a$  toca uno de dichos apéndices, está en comunicación con  $b$  y queda cerrada la corriente, pues pasa de  $b$  a  $a$ , y luego a  $c$  por la placa  $n$ . Al contrario, mientras la lámina  $a$  no toca uno de los apéndices, se halla interrumpida la corriente.

En el momento en que se interrumpe la corriente se puede obtener conmociones muy fuertes; y, al efecto, se fijan en  $n$  y en  $r$  dos largos alambres de cobre contorneados en hélice, y terminados por dos cilindros  $p$  y  $p'$ , que son los que se tienen en las manos. Entonces, cada vez que se interrumpe la corriente, se produce en el circuito que forman los alambres  $np$ ,  $rp'$ , y por el cuerpo, una extra-corriente directa (716) que causa una violenta conmoción. Renuévase ésta a cada semi-revolución del electro-imán, aumentando su intensidad con la velocidad de rotación. Además los músculos se contraen con tal fuerza, que dejan de plegarse al deseo de la voluntad, siendo imposible dejar los cilindros o manecillas. Con un aparato bien construido y de gran dimensión, no es posible resistir las conmociones, y si alguien lo intenta, es derribado, rueda por el suelo, y muy en breve cede ante la magnitud de los dolores que le aquejan.

Con el aparato de Clarke se obtienen de las corrientes de inducción todos los efectos de las voltaicas. La [figura 545](#) indica de qué manera se dispone el experimento para la descomposición del agua. En este caso se suprime la lámina  $a$ , encontrándose cerrada la corriente por el líquido en que entran los dos alambres que representan los electrodos.

Para los efectos fisiológicos y químicos, el alambre arrollado en los carretes es fino y de una longitud en cada uno de ellos de 500 a 600 metros. Para los efectos físicos, al contrario, el alambre es grueso y cuenta de 25 a 30 metros en cada carrete. Las [figuras 546](#) y [547](#) revelan la forma que se da a los carretes y al conmutador. La primera representa la inflamación del éter, y la segunda la incandescencia de un alambre  $o$ , por el cual pasa, siempre en el mismo sentido, la corriente que va de  $a$  a  $c$ .

Antes que Clarke, Pixii, hijo, había construido en París un aparato del mismo género, diferenciándose tan sólo en que el haz magnético era móvil y el electro-imán fijo.

719. Máquina magneto-eléctrica. -El principio que sirve de base al aparato de Clarke, en estos últimos años se ha aplicado a las *máquinas magneto-eléctricas*, con cuya denominación se distinguen unos aparatos, merced a los cuales se transforma un trabajo mecánico en corrientes eléctricas de extrema energía, por medio de la acción inductriz de los imanes sobre carretes en movimiento.

La primera máquina de esta clase se inventó en 1850 por Nollet, profesor de física en la escuela militar de Bruselas, y descendiente de a familia del abate Nollet, que fue igualmente profesor de física en París hace un siglo. La idea de Nollet era aplicar las corrientes eléctricas, obtenidas con su máquina, a la descomposición del agua, para utilizar en seguida para el alumbrado, el gas hidrógeno que originase dicha descomposición; desgraciadamente el éxito que alcanzó fue contrario a sus esperanzas, siendo su dolor tan intenso, que fue causa de su muerte. Por fortuna, al morir, dejó confiado su aparato a la inteligencia de M. J. Van Malderen, quien no sólo lo perfeccionó, sino que concibió la feliz idea de aplicarlo al alumbrado eléctrico.

El aparato que nos ocupa, que es hoy propiedad de la compañía denominada la *Alianza*, se halla representado en la [figura 548](#), tal como funciona en uno de los talleres de los Inválidos, en París, en el cual se ha construido. Consta de un armazón de hierro fundido de 1<sup>m</sup>,65 de altura, encontrándose dispuestos sobre el contorno del mencionado armazón, en situación paralela, sobre travesaños de madera, ocho series de cinco haces de imanes enérgicos A, A, A..., cada uno de los cuales, a más de poder sostener de 60 a 70 kilogramos, se encuentran encorvados en forma de herradura, y agrupados de suerte que si se consideran paralelamente al eje del armazón de hierro fundido, o bien en un plano perpendicular a dicho eje, sean siempre los polos de nombre contrario los que se encuentren enfrente. En cada serie se componen los haces extremos de tres láminas imantadas, constando tan sólo de seis los tres haces intermedios, puesto que éstos actúan por sus dos caras, y aquéllos por una sola.

Sobre un eje horizontal de hierro dulce, que va de un extremo a otro del armazón, se encuentran fijos cuatro rodillos de bronce, correspondiendo cada uno de ellos a los intervalos vacíos que median entre los haces imantados de dos series verticales. En la circunferencia de cada uno de los rodillos existen 16 carretes, o sea un número igual a los polos magnéticos que se cuentan en una serie vertical de haces. Dichos carretes, representados en la [figura 550](#), difieren de los del aparato de Clarke, puesto que no son de un solo hilo y sí de doce de 10<sup>m</sup>,50 cada uno, lo cual aumenta la cantidad y disminuye la resistencia. Las espiras de los carretes se encuentran aisladas, por medio de betún de Judea disuelto en la esencia de trementina, no hallándose por fin enrollados en cilindros macizos de hierro dulce, y sí respectivamente sobre dos tubos huecos de hierro, hendidos según toda su longitud, circunstancia a la cual se debe que sea más rápida la imantación y la desimantación, cuando pasan los carretes ante los polos de los imanes. Además, los discos de cobre que terminan los carretes, se encuentran cortados en el sentido de su radio para impedir la producción de corrientes inducidas en dichos discos (713). Los cuatro rodillos poseen respectivamente 16 carretes, o sea un total de 64, dispuestos en 16 series horizontales de 4, según se nota en el punto D hacia la parte izquierda del armazón. La longitud de los alambres sobre un carrete es de 12 veces

$10^m, 50$ , o sean  $126^m$ , siendo, por consiguiente, su longitud total en todo el aparato, de 64 veces  $126^m$  o de 8064 metros.

Los alambres se encuentran arrollados en el mismo sentido sobre todos los carretes, no tan sólo en uno de ellos, sino sobre los cuatro, comunicándose entre sí todos los alambres. Para conseguir este resultado, se encuentran enlazados los carretes, tal como se nota en la [figura 549](#): en el primer rodillo, los doce alambres del primer carrete terminan en una plancha de caoba, aplicada sobre la cara anterior del rodillo, en una lámina de cobre  $m$  que comunica por medio de un alambre  $O$  con la parte central del eje, sobre el cual se encuentran montados los rodillos; y por el otro extremo, sobre la segunda cara del rodillo, van a soldarse los mismos alambres a una lámina figurada por una raya fina que los une al carrete  $z$  por una lámina  $i$ , y así sucesivamente respecto a los carretes  $l, u, \dots$ , hasta el último  $v$ . En este punto los alambres del mismo carrete terminan en una lámina  $n$  que cruza el primer rodillo y que va a soldarse a los alambres del primer carrete que sigue, sobre el cual se reproduce la misma serie de comunicaciones; por último, los alambres pasan al tercer rodillo, de éste al cuarto, y por fin, al extremo posterior del eje.

En resumen, dispuestos así los carretes, unos a continuación de otros, como los elementos de una pila dispuesta en estado de tensión (657), se obtiene la *electricidad de tensión*. Pero si quiere conseguirse, por el contrario, *electricidad en cantidad*, se hacen comunicar alternativamente las láminas a las cuales nos hemos contraído antes, no entre sí, sino con dos anillos metálicos, de manera que todos los extremos del mismo nombre se encuentren en relación con el mismo anillo, siendo cada uno de éstos en tal caso un polo.

Sentados estos detalles, con facilidad puede comprenderse cómo se origina y propaga la electricidad en el aparato que nos ocupa. Una correa sin fin recibe su movimiento de una máquina de vapor y se arrolla en una polea fija en el extremo del eje que conduce los rodillos y los carretes, imprimiendo a todo el sistema un movimiento de rotación más o menos rápido. La experiencia ha puesto de manifiesto que para obtener el máximo de luz, la velocidad más conveniente es la de 235 revoluciones por minuto. Durante esta rotación, si consideramos en un principio un solo carrete, los tubos de hierro dulce sobre los cuales se encuentra arrollado, al pasar entre los polos de los imanes experimenta en sus extremos una inducción opuesta, cuyos efectos se aúnan, pero variando de un polo a otro; y como dichos tubos, durante una revolución, pasan de una manera sucesiva delante de 16 polos que son alternativamente de nombre contrario, se imantan ocho veces en un sentido y ocho en sentido contrario a éste. Durante el transcurso del mismo tiempo se originan por lo tanto en el carrete ocho corrientes inducidas directas y ocho corrientes inducidas inversas, o sea en totalidad 16 corrientes por cada revolución. Con la velocidad de 235 vueltas por minuto, el número de corrientes en el mismo tiempo es de 235 veces 16, o sean 3760, que son alternativamente de sentido contrario. El mismo fenómeno se produce en cada uno de los 64 carretes; pero como todos se encuentran enrollados en el mismo sentido, y comunican entre sí, se superponen sus efectos y surge un número constante de corrientes, diferenciándose tan sólo en su intensidad.

Para recoger las corrientes y utilizarlas en la producción de una luz eléctrica muy intensa, se establecen las comunicaciones según se nota en la [figura 551](#). Por la parte posterior, el último carrete  $x'$  del cuarto rodillo termina por el alambre  $G$  en el eje  $MN$ ,

sobre el cual se hallan montados los rodillos; la corriente así conducida sobre el eje, pasa de éste sobre toda la máquina, pudiendo en seguida recogerse en el punto que se quiera. Respecto a la parte posterior, el primer carrete  $x$  del primer rodillo comunica por el alambre O, no con el mismo eje, y sí con un cilindro de acero  $c$  que penetra en el eje, del cual se encuentra aislado por una manga o cubierta de marfil; y hasta el mismo tornillo  $e$ , que recibe el alambre O, se halla aislado por un contacto, también de marfil. Del cilindro  $e$ , pasa la corriente a una pieza metálica K que se encuentra fija, desde la cual pasa por último al alambre H que la conduce al límite  $a$  de la figura 548. Respecto al límite  $b$ , comunica con todo el bastidor, y por lo tanto con el alambre del último carrete  $x'$  ([fig. 551](#)). La corriente de los dos límites  $a$  y  $b$  pasa por medio de dos alambres de cobre a dos carbones, cuya distancia se regulariza por un aparato que describiremos en breve (720).

En la máquina que acabamos de describir no se rectifican las corrientes de sentido contrario, y por lo tanto cada uno de los carbones es alternativamente positivo y negativo, quemándose de una manera igual. La experiencia ha puesto de manifiesto que cuando se aplican las corrientes a la producción de la luz, no es necesario lograr que sean de un mismo sentido; pero cuando quieren aplicarse a la galvanoplastia o la imantación, es indispensable rectificarlas, lo cual se consigue por medio de un conmutador.

La luz que origina la máquina *magneto-eléctrica* es muy intensa: con un aparato de cuatro rodillos, dispuestos para obtener en gran cantidad las corrientes, equivale la luz que se consigue a la de 150 quinqués, sistema Cárcel, y con otro de seis rodillos, como el que construye la compañía titulada de la *Alianza*, podrá ser la intensidad de su luz igual a la de 200 quinqués del mismo sistema.

La luz que nos ocupa, que no exige otro gasto más que la de un medio caballo de vapor aproximadamente, indispensable para poner en marcha los rodillos, cuando el número de éstos no excede de cuatro, se encuentra destinada particularmente, al parecer, para el alumbrado de los faros y para el de los buques, evitando de esta suerte los siniestros que ocurren por la noche.

720. Regulador de Serrín para la luz eléctrica. -Este nuevo aparato, al igual de los que se construían antes del mismo, procura la proximidad de los carbones a medida que se gastan, pero al propio tiempo origina su separación al encontrarse en contacto. A más, no cuenta con ningún movimiento de reloj, puesto que le pone en marcha el mismo peso de las piezas. A este fin, el vástago B que conduce el carbón positivo  $c$  y cuya parte inferior termina por una cremallera C ([fig. 552](#)), resbala suavemente por un cubo H, y al descender dicho vástago por su propio peso, y con el mismo el carbón positivo, la cremallera C trasmite el movimiento a una rueda dentada G, sobre cuyo eje se encuentra fija una polea D. Al girar ésta de derecha a izquierda hace enrollar una cadena  $z$ , que pasa por una segunda polea y va a unirse a la parte inferior de un vástago rectangular. Al elevarse éste, hace ascender la pieza K que sustenta el carbón negativo  $c'$ , de suerte que asciende, éste a medida que descende el carbón positivo. En el dibujo al cual nos referimos el diámetro de la polea D sólo es la mitad del de la rueda G, resultando en virtud de estas proporciones, que el carbón positivo marcha con una velocidad doble de la que anima al carbón negativo. Esto ocurre comúnmente cuando la corriente reconoce por origen una pila voltaica, porque en este caso el carbón positivo se gasta con una rapidez doble que el carbón negativo. Con la máquina *magneto-eléctrica* descrita antes

(749), los dos carbones se gastan con igual rapidez, debiendo poseer el mismo diámetro la polea y la rueda.

Veamos en la actualidad cómo funciona el regulador: al estar en contacto los dos carbones, entra la corriente por el alambre P, sube recorriendo HB hasta el carbón positivo, desde el cual pasa al carbón negativo, a la pieza K, y llega, según el sentido de las flechas, hasta el límite *d*, a la derecha del armazón inferior, pero sin penetrar en la parte restante del aparato, puesto que se encuentran aisladas todas las piezas por las cuales pasa la corriente, por los contactos de marfil *iiii*. Del límite *d* se conduce la corriente por un alambre de cobre cubierto de guta-percha a un electro-imán E, del cual sale para el límite *x*, para regresar por último a la pila por el alambre N.

Sentado esto, en el momento en que pasa la corriente al electro-imán, se eleva una armadura de hierro dulce A, que es la que origina entonces la separación de los dos carbones. Efectivamente, en esta armadura se encuentra fijo un marco de cobre YS que oscila alrededor de un eje horizontal V, encontrándose enlazado por un extremo a un vástago *q*, articulado en el punto *n* con un segundo marco *mnp*, móvil también alrededor de un eje *m*. Sentado esto, cuando se eleva la armadura A, hace oscilar la palanca VS, y descendiendo el vástago *q*, se origina la separación de los dos carbones; pero al mismo tiempo el vástago *q* desciende con él una pieza *g*, que termina una lámina horizontal *t*, y que al engranar entonces con los dientes de una rueda de linguete *r*, detiene a ésta, y con ella todas las ruedas dentadas y la cremallera C. Así se fijan los carbones, lo cual dura mientras que la corriente conserva bastante intensidad para mantener elevada la armadura A. Al gastarse los carbones aumenta su intervalo, la corriente se debilita, desciende la armadura, y la rueda *r* queda libre. Al momento se aproximan los carbones, pero sin ponerse en contacto, porque antes de que así suceda, recobra la corriente intensidad bastante para elevar la armadura y detener los carbones. La proximidad y la separación de éstos se arreglan por el mismo aparato, tomando de aquí el origen el nombre de *regulador automático* con que justamente le designa su inventor.

721. Carrete de Ruhmkorff. -M. Ruhmkorff ha construido por vez primera, en 1851, carretes de dos alambres, de dimensiones muy considerables, por medio de las cuales se consigue que produzcan las corrientes de inducción, aun con un solo par de Bunsen; efectos físicos, químicos y fisiológicos equivalentes y hasta superiores a los de las máquinas eléctricas más enérgicas.

El aparato de M. Ruhmkorff se compone de un gran carrete B ([figura 553](#)), situado verticalmente sobre un platillo de vidrio grueso que le aísla. Este carrete, que tiene unos 30 centímetros de altura, se compone de dos alambres, uno grueso, de dos milímetros de diámetro, que da trescientas vueltas, y otro fino de sólo un tercio de milímetro de diámetro, arrollado sobre el primero y de 8 a 10 kilómetros de longitud, constituyendo unas diez mil vueltas. Estos alambres, no sólo se hallan cubiertos de seda, sino que cada espira está aislada de la siguiente por una capa de barniz de goma laca. El alambre grueso es el inductor, y la corriente que lo recorre es simplemente la de uno o de dos pares de Bunsen. Comunicando el polo positivo de la pila con el alambre PH, va la corriente por un conductor C a un conmutador G; desde cuyo punto baja por una pieza metálica *g*, y sigue por una laca de cobre F que le conduce a una de las extremidades *v* del alambre grueso del carrete. El otro extremo termina en *i* en uno de los pies de cobre que sostienen el platillo de vidrio, y la corriente, al salir del carrete, se dirige a una segunda placa *c*, desde la cual sube por una columna de hierro *uA*, en donde alcanza un

martillo oscilante *a* (figura 554) que unas veces se halla en contacto con un conductor *n*, alejándose en otras del mismo. Cuando se efectúa el contacto, sigue la corriente los conductores *n* y *E* (fig. 553) conforme lo indican las flechas, sube por el conductor *G* y vuelve a la pila por el conductor *d* y el alambre *Q*.

El movimiento de vaivén del martillo *a* proviene de un cilindro de hierro dulce *ro*, situado en el eje del carrete. Cuando la corriente de la pila recorre el alambre grueso, se imanta el hierro (699) y atrae de abajo hacia arriba al martillo *a*, que es también de hierro. Interrumpida entonces la corriente, puesto que no puede pasar por la pieza *n*, pierde el cilindro *or* su imantación y vuelve a caer el martillo *a*. En este momento principia de nuevo la corriente, vuelve a levantarse la pieza *a*, y así sucesivamente. A medida que pasa de esta suerte la corriente de la pila de una manera intermitente, por el alambre grueso del carrete, se produce en el alambre fino, a cada interrupción, una corriente de inducción sucesivamente directa e inversa. Completamente aislado este último alambre, adquiere la corriente inducida una tensión tan considerable, que puede producir efectos muy intensos. M. Fizeau ha aumentado todavía esta intensidad, interponiendo un condensador en el circuito inductor. Este condensador, tal cual lo ha construido M. Ruhmkorff, consta de dos láminas de estaño, pegadas sobre las dos caras de una tira de tafetán engomado, de unos cuatro metros de longitud aproximadamente, y replegadas entre otras dos del mismo tafetán, de modo que se puedan introducir en el interior de la tablita que sirve de sostén al aparato. Las armaduras del condensador comunican con dos botones *X*, fijos en la tablita, para recoger la extra-corriente (716) a cada interrupción de la corriente inductora.

Además del modelo que acabamos de describir, construye actualmente M. Ruhmkorff carretes de mayores dimensiones, que alcanzan hasta 22 centímetros de diámetro y 45 de longitud. El alambre grueso cuyo diámetro es de dos milímetros y medio, se enrolla dos veces, según toda la longitud del carrete, y en seguida lo efectúa el alambre delgado que cuenta un diámetro de un quinto de milímetro, siendo su longitud de 15000 metros. Este último se aísla con sumo cuidado por medio de cintas de seda y de goma laca, porque del aislamiento completo depende particularmente la potencia del carrete.

En estos aparatos es constantemente el alambre delgado, es decir, el inducido, el que origina los diferentes efectos que vamos a consignar.

722. Efectos producidos con el carrete de Ruhmkorff. M. Masson fue el primero que notó la considerable tensión de las corrientes de inducción, y el que trató de utilizarla para obtener efectos de electricidad estática. Con este objeto construyó, en 1842, con M. Bréguet, un aparato de inducción, por medio del cual obtuvo efectos luminosos y caloríficos muy notables por cierto; pero sólo desde que M. Ruhmkorff aisló completamente la corriente de inducción con goma laca en su carrete, conforme hemos dicho antes, pudo utilizarse toda la tensión de las corrientes de inducción, y reconocer que éstas poseen a la vez las propiedades de la electricidad estática y de la dinámica. Muchos físicos se han apresurado a multiplicar los experimentos con el aparato de Ruhmkorff, particularmente los señores Grove, Neef, Poggendorff y Plücker, y en Francia, en particular, los señores Quet, Masson, Despretz, Ed. Becquerel, Gaugain y Du Moncel.

Los efectos fisiológicos del carrete de Ruhmkorff son sumamente intensos, pues la violencia de las conmociones es tal, que muchos observadores han sido derribados

súbitamente. Con dos pares de Bunsen se mata un conejo, y con un número poco considerable de los mismos pares, le cabría igual suerte a una persona.

Compruébanse también con facilidad los efectos caloríficos, pues basta interponer entre los dos extremos  $p$  y  $q$  del alambre conducido, otro alambrito de hierro muy fino, el cual se funde y arde con viva luz. Obsérvase aquí el curioso fenómeno de que si se hace terminar cada uno de los alambres  $p$  y  $q$  por otro de hierro muy delgado cuando se acercan éstos entre sí, sólo se funde el del polo negativo, indicando este hecho que la tensión es mayor en aquél que en el positivo.

Los efectos químicos del carrete de Ruhmkorff son sumamente variados, porque este aparato da a la vez electricidad estática y dinámica. Por ejemplo, según la forma de los electrodos de platino que se introducen en el agua, por su distancia y por el grado de acidificación del agua, se pueden obtener en este líquido simples efectos luminosos sin descomposición, o bien descomposición del agua con la separación de los gases en los dos polos, con los gases mezclados en uno solo, o finalmente, con los mismos mezclados en ambos polos.

Pueden también descomponerse o combinarse los gases por la acción prolongada de la chispa de la corriente de inducción. Los señores Ed. Becquerel y Fremy han comprobado que, si se hace pasar la corriente del aparato de Ruhmkorff por un tubo de vidrio lleno de aire y herméticamente cerrado ([fig. 555](#)), se combinan el nitrógeno y el oxígeno del aire, originando el ácido nitroso.

También son muy variados los efectos luminosos del aparato de Ruhmkorff, según se originen en el aire, en el vacío o en los vapores muy enrarecidos. En el aire producen una chispa viva y ruidosa, cuya longitud se extiende hasta 30 centímetros, con el gran carrete de 45 centímetros de diámetro; en el vacío no pueden ser más notables sus efectos. Se hacen comunicar los dos alambres  $q$  y  $p$  del carrete, con las dos varillas del huevo eléctrico (628), descrito ya para observar en el vacío los efectos luminosos de la máquina eléctrica. Hecho en el globo el vacío, por lo menos hasta uno o dos milímetros, se ve un hermosísimo penacho luminoso de una a otra esfera, de un modo sensiblemente continuo y con la misma intensidad que la que se obtiene con una poderosa máquina eléctrica, cuyo disco se hace girar con rapidez. Este experimento se halla representado en la [fig. 553](#), y en mayor escala en la [558](#). La [556](#) representa una desviación singular que experimenta la luz eléctrica cuando se acerca la mano al huevo.

El polo positivo de la corriente inducida es el que presenta más brillo; su luz es de un color rojo de fuego, mientras que la del negativo es débil y violácea; además, esta última se prolonga a lo largo de la varilla negativa, fenómeno que no se produce en la positiva.

Finalmente, el carrete de Ruhmkorff origina efectos mecánicos tan poderosos, que con el gran aparato se horadan placas de vidrio de dos centímetros de grueso, si bien este resultado no se obtiene por una descarga única, y sí por muchas repetidas sucesivamente.

Hace muy poco tiempo que M. Ruhmkorff ha aplicado su carrete para cargar energías baterías de seis frascos, siendo aproximadamente la superficie de sus armaduras de 30 decímetros cuadrados, baterías que se cargan instantáneamente o sea en algunos

segundos, con un gran carrete que dé chispas de 15 a 20 centímetros de longitud y que actúe por medio de 6 elementos de Bunsen de gran superficie; estas baterías se cargan, por decirlo así, casi instantáneamente, o sea en algunos segundos.

En este experimento, estando un alambre del carrete en comunicación con una de las armaduras, el otro no debe tocar la segunda armadura, y sí distar de la misma algunos centímetros. En efecto, si se encontrasen en contacto con las armaduras cada uno de los hilos, las dos extra-corrientes de abertura y cierre, siendo iguales en cantidad (716), pero de dirección contraria, reciben las dos armaduras cantidades iguales de electricidad contraria, y por consiguiente, deja de cargarse la batería, siendo así que cuando uno de los hilos se encuentra distante algunos centímetros, la electricidad de ruptura que cuenta una tensión mayor, estalla aisladamente y es la única que carga la batería.

723. Estratificación de la luz eléctrica. -Estudiando la luz eléctrica que procura el aparato de inducción de M. Ruhmkorff, ha observado M. Quet que si no se hace el vacío en el globo del experimento anterior hasta después de haber introducido en él esencia de trementina, alcohol, sulfuro de carbono, etc., se modifica por completo el aspecto de la luz. Aparece entonces bajo la forma de una serie de zonas alternativamente brillantes y oscuras, que forman como una pila de luz eléctrica entre los dos polos ([fig. 557](#)).

En este experimento resulta de la intermitencia de la corriente de inducción, que no es continua la luz, sino que consiste en una serie de descargas tanto más rápidas, cuanto mayor es la rapidez con que oscila el martillo *a* ([fig. 554](#)). Parece que las zonas luminosas se hallen entonces animadas por un doble y rápido movimiento giratorio y ondulatorio. M. Quet considera dicho movimiento como una ilusión de óptica, fundándose en que si se hace oscilar lentamente el martillo con la mano, aparecen muy distintas y fijas las zonas.

La luz del polo positivo es roja las más de las veces, y violácea la del negativo. Con todo, la tinta varía con el vapor o el gas que contiene el globo.

M. Despretz ha observado que los fenómenos que los señores Ruhmkorff y Quet constituyeron con una corriente discontinua, se reproducen con una corriente continua ordinaria, pero con la importante diferencia que esta última exige más pares de Bunsen, mientras que la corriente discontinua del carrete de Ruhmkorff no exige más que uno solo. No menos notable es otro hecho comprobado por la experiencia, cual es el de que la intensidad de los efectos luminosos de dicho aparato aumenta muy poco multiplicando el número de los pares de la pila.

No se conoce aún la teoría de los fenómenos de estratificación de la luz eléctrica en los vapores, y de la coloración de los polos.

724. Tubos de Geissler. -Cuando adquiere la estratificación de la luz eléctrica un brillo y una belleza notable, es cuando se hace pasar la descarga del carrete de Ruhmkorff por tubos de vidrio que contienen un vapor o un gas enrarecido. Se originan estos fenómenos, estudiados por los señores Masson Grove, Gassiot, Plücker y otros, en tubos de vidrio o de cristal construidos por Geissler en Bonn (Prusia). Al cerrarlos se encuentran dichos tubos en condiciones idénticas a la de la cámara o receptáculo barométrico; pero antes de soldarlos, se hace que los cruce una cantidad bastante pequeña de un gas o de un vapor, de suerte que sobre uno u otro sólo actúe una presión

medida por un medio milímetro. Finalmente, en las dos extremidades de los tubos se sueldan dos alambres de platino, que penetran en aquéllos de uno a dos centímetros.

Desde el momento en que se ponen en comunicación los dos alambres de platino con los extremos del carrete de Ruhmkorff, se originan en toda la longitud del tubo magníficas y brillantes estrías, separadas por fajas oscuras, variando aquéllas de forma, color y brillo, según el grado del vacío, la clase del gas o del vapor y las dimensiones de los tubos. Muchas veces el fenómeno adquiere mayor belleza por la fluorescencia que la descarga eléctrica excita en el vidrio.

La [figura 559](#) representa las estrías que origina el hidrógeno, según una presión de medio milímetro, en un tubo cuya sección aumenta y disminuye alternativamente. La luz es blanca en las esferas y roja en las partes capilares.

La [figura 560](#) representa las estrías que ofrece el ácido carbónico, cuando supresión es tan sólo de un cuarto de milímetro; el color es verdoso, y las estrías no poseen la misma forma que en el hidrógeno en el ázoe, la luz es amarilla roja.

Consigna M. Plücker, que ha estudiado detenidamente la luz de los tubos de Geissler, que no depende en manera alguna de la sustancia de los electrodos, y sí tan sólo de la naturaleza del gas o del vapor que encierra el tubo. El mismo físico ha expuesto que las luces que procuran el hidrógeno, el ázoe, el ácido carbónico, etc., difieren en mucho respecto al espectro que originan cuando cruzan un prisma. También asienta, que la descarga del carrete de inducción, que se trasmite a un gas muy enrarecido, no se comunicaría en el vacío absoluto, y la presencia de una materia ponderable es de todo punto indispensable para que se efectúe el paso de la electricidad.

Merced a un poderoso electro-imán, M. Plücker ha sometido la descarga eléctrica, en los tubos de Geissler, a la acción del magnetismo, como Davy lo había efectuado, respecto al arco voltaico ordinario. Siéndonos imposible enumerar toda la serie de curiosos experimentos de dicho físico, mencionaremos únicamente, en el caso en que sea la descarga perpendicular a la línea de los polos, la separación de dicha descarga en dos partes distintas, fenómeno que puede explicarse por la acción que opone el electro-imán sobre las dos extra-corrientes de abertura y cierre que se encuentran en la descarga.

Al terminar este estudio, citaremos una aplicación reciente de los tubos de Geissler a la patología. Después de soldar un largo tubo capilar a dos esferas, provista cada una de hilos de platino, se encurva aquél por su centro, de suerte que se toquen sus dos ramas, y se enrolla su extremo en espiras muy apretadas, según se ve en *a*, [figura 561](#). Dispuesto así el tubo, que contiene un gas muy enrarecido, según hemos consignado anteriormente, al momento que pasa la descarga, se origina en *a*, una luz bastante viva para alumbrar las fosas nasales, la garganta, o cualquier otra cavidad del cuerpo humano, en la cual se introduzca el tubo. Desgraciadamente este experimento exige no tan sólo un carrete, sino una pila para ponerlo en acción, lo cual se opone a su admisión en la medicina práctica.

725. Rotación de las corrientes inducidas por los imanes. -Últimamente ha combinado M. de La Rive una experiencia que manifiesta de una manera curiosa la acción rotativa de los imanes sobre las corrientes. Dicho físico efectuó en un principio el experimento

que nos ocupa con una máquina eléctrica de extrema energía; pero procura un brillo más notable con el carrete de Ruhmkorff.

El aparato de M. La Rive consta de un globo de vidrio o huevo eléctrico provisto de dos llaves en uno de sus extremos, una para atornillarlo sobre la máquina neumática, y la otra, que es semejante a la llave de Gay-Lussac (323), sirve para introducir en el globo algunas gotas de un líquido volátil. En el otro extremo de esta última, se encuentra masticado un tubo por el cual pasa un vástago de hierro dulce *mn* (fig. 562), y cuyo extremo superior, llega casi hasta el centro del globo. Según toda su longitud, exceptuando sus dos extremos, se cubre dicho vástago de una capa aisladora muy espesa, formada primero de goma laca, después de un tubo de vidrio cubierto igualmente de dicha sustancia, en seguida de otro segundo tubo y últimamente, de una capa de cera muy unida. El espesor de la capa aisladora así dispuesta, debe ser cuando menos de un centímetro. En el interior del globo la segunda capa aisladora se encuentra rodeada en *x* de un anillo de cobre, que comunica por un hilo del mismo metal con un tapón exterior *c*.

Conocidos estos detalles, después de haber efectuado el vacío más perfecto que sea posible, se introducen en el globo algunas gotas de esencia de trementina, por medio de la llave *a*; después se practica nuevamente el vacío, de manera que sólo quede en aquél un vapor sumamente enrarecido. Poniendo entonces, sobre una de las ramas de un electro-imán muy rigoroso AB, un disco grueso de hierro dulce *o*, provisto de un botón, se aplica sobre este disco el extremo *m* del vástago *mn*, y después se hacen llegar los dos extremos del alambre inducido del carrete de Ruhmkorff, uno al botón *c*, y el otro al segundo botón *o*. Si en este estado se hace andar el carrete sin que funcione el electro-imán, las electricidades contrarias de los alambres *s* y *r*, pasando, la del primero hasta el extremo superior *n* del vástago de hierro dulce, y la del segundo al anillo *x*, surge un penacho luminoso más o menos irregular en el interior del globo *n* en el punto *x*, alrededor del vástago, como en la experiencia del huevo eléctrico.

El fenómeno varía desde luego, si se hace pasar una corriente voltaica por el electro-imán: en vez de surgir de los diferentes puntos del contorno superior *n* y del anillo *x*, la luz se condensa y surge en un solo arco luminoso de *n* a *x*. Además, y éste es el hecho verdaderamente notable, en el experimento que nos ocupa, dicho arco gira con bastante lentitud alrededor del cilindro imantado *mn*, ya en un sentido, ya en otro, según la dirección de la corriente inducida, o según el sentido de la imantación. Desde que cesa ésta, el fenómeno luminoso, vuelve a su estado anterior.

Un hecho digno de consignarse en este experimento, es que fue establecido a priori por M. de La Rive para explicar por la influencia del magnetismo terrestre cierto movimiento rotatorio del oeste al este pasando por el sur, que se notó en las auroras boreales. En efecto, la rotación del arco luminoso debe relacionarse a la rotación de las corrientes por los imanes (692).

726. Cohete de Stateham. -El ingeniero inglés M. Stateham ha encontrado recientemente, que en un alambre de cobre AB (fig. 563), cubierto de guta-percha sulfurada, se forma a los pocos meses, en contacto con el metal y con su cubierta, una capa de sulfuro de cobre suficiente para conducir la corriente. En efecto, si se corta, en cualquier punto del circuito, la mitad superior de la cubierta, y si en la escotadura que queda se separa un pedazo de alambre de cobre de unos seis milímetros de longitud, se

interrumpe de  $a$  a  $b$  una corriente intensa que pase por el alambre, la cual se trasmite en este caso por el sulfuro de cobre que hace entrar en ignición. Resulta de todo esto que, si en la escotadura en cuestión se pone un cuerpo inflamable, como la pólvora común o el algodón pólvora, se inflama, y de aquí toma origen el nombre de *cohetes de Stateham*, dado al aparato que nos ocupa. M. Du Moncel ha aplicado recientemente con un éxito completo este cohete y el aparato de Ruhmkorff a la explosión de las minas en el puerto de Cherburgo.

Si se quiere que funcione con una pila, ha de ser ésta muy poderosa y la corriente que entra por A regresa a la pila por B, o se pierde en el suelo, lo cual es idéntico. Pero si, en vez de una pila, se usa el carrete de M. Ruhmkorff, se obtienen los mismos efectos con dos pares de Bunsen; en este caso la corriente inducida de dicho aparato entra por A y sale por B; y así se comprueban también los efectos caloríficos de las corrientes de inducción.

M. Faraday, que ha efectuado recientemente curiosos experimentos con los alambres de cobre cubiertos de guta-percha, ha encontrado que los efectos físicos fisiológicos producidos por una corriente que pasa por dichos alambres son muy débiles y hasta insensibles en el aire libre, pero muy intensos si se hallan éstos sumergidos en agua o enterrados en el suelo. M. Faraday, que actuaba con alambres de 160 kilómetros de longitud, explica este fenómeno, comparando el alambre de cobre, cubierto de guta-percha, a una botella de Leyden construida en grande escala: el alambre de cobre, cargado de electricidad por la pila o por el carrete, actúa por influencia, al través de la guta-percha, sobre el agua o el suelo, el cual viene a formar de esta manera la armadura exterior de la botella, resultando como consecuencia la acumulación de electricidad y los efectos poderosos que en tal caso se obtienen.

727. Caracteres de las corrientes de inducción. -Por los diferentes experimentos que hemos indicado hasta ahora sobre las corrientes de inducción, se ve que, a pesar de su instantaneidad, poseen todas las propiedades de las corrientes voltaicas ordinarias. Lo mismo que éstas, causan violentos efectos fisiológicos, producen otros luminosos, caloríficos y químicos, y dan a su vez origen a nuevas corrientes inducidas. Finalmente, desvían la aguja de los galvanómetros e imantan las barras de acero, cuando pasan por un alambre de cobre arrollado en espiral alrededor de dichas barras.

La intensidad de la conmoción de las corrientes inducidas es causa de que se comparen sus efectos a los de la electricidad en el estado de tensión. Con todo, como actúan siempre sobre el galvanómetro, hay que admitir que, en los alambres sometidos a la inducción, se encuentra a la vez electricidad en el estado de tensión y en el dinámico. En efecto, recogiendo de un modo continuo la corriente inducida del mismo sentido, por medio de un conmutador, consiguió M. Masson cargar el condensador. Pero esta hipótesis es aun más probable en vista de los efectos que anteriormente se han obtenido con el carrete de M. Ruhmkorff.

Las corrientes inducidas directa e inversa se han comparado entre sí bajo tres puntos de vista, que son: la energía de la conmoción, la amplitud de la desviación del galvanómetro y la acción magnetizante sobre las barras de acero. Apreciadas así, ofrecen estas corrientes muy diversos resultados, pues parecen sensiblemente iguales en punto a la desviación del galvanómetro, mientras que por lo que hace a la conmoción es

muy viva la de la corriente directa, y casi nula la de la inversa. Igual diferencia se nota en la fuerza magnetizante, pues la directa imanta a saturación, y la inversa no imanta.

728. Leyes de las corrientes de inducción. -En su *Tratado especial sobre la inducción*, M. Matteucci deduce de sus propios estudios y de los de los señores Faraday, Lenz, Dove, Abria, Weber, Marianini y Felici, las siguientes leyes sobre las corrientes de inducción:

1.<sup>a</sup> *La intensidad de las corrientes inducidas es proporcional a la de las corrientes inductoras.*

2.<sup>a</sup> *Esta misma intensidad es proporcional al producto de las longitudes de los circuitos inductor e inducido.*

3.<sup>a</sup> *La fuerza electro-motriz desarrollada por una cantidad dada de electricidad es la misma, cualesquiera que sean la naturaleza, sección y forma del circuito inductor.*

4.<sup>a</sup> *La fuerza electro-motriz desarrollada por la inducción de una corriente sobre un circuito conductor cualquiera, es independiente de la naturaleza de este conductor.*

5.<sup>a</sup> *El desarrollo de la inducción es independiente de la naturaleza del cuerpo aislador interpuesto entre los circuitos inductor e inducido.*

Esta última ley no está acorde con las experiencias de M. Faraday sobre la inducción de la electricidad estática (602).

729. Calor desarrollado por la inducción de los imanes poderosos sobre los cuerpos en movimiento. -Hablando del experimento de Arago (713), se ha visto que un disco de cobre, girando sobre sí mismo, actúa a distancia sobre un imán móvil para transmitirle su movimiento de rotación. Muy en breve veremos (731) que recíprocamente, un cubo de cobre, animado de un rápido movimiento de rotación, es detenido bruscamente por la influencia de los polos de dos poderosos imanes ([fig. 567](#)). Es evidente que, en estos experimentos si se quiere impedir la rotación de la aguja, o que el cubo continúe girando, será menester gastar constantemente cierto trabajo mecánico para vencer la resistencia que resulta de la acción inductriz de los imanes. Pero, fundándose en la teoría de la transformación del trabajo mecánico en calor, que preocupa a los físicos desde algunos años a esta parte (358) se ha buscado cuál sería así la cantidad de calor desarrollada por las corrientes de inducción bajo la influencia de poderosos imanes. M. Joule, con objeto de determinar el equivalente mecánico del calor, ha arrollado un carrete de inducción alrededor de un cilindro de hierro dulce, y habiendo encerrado el aparato en un tubo de vidrio lleno de agua, ha impuesto al conjunto un rápido movimiento de rotación entre las ramas de un poderoso electro-imán. Un termómetro situado en el líquido, servía para medir la cantidad de calor desarrollada por las corrientes de inducción en el hierro dulce y en el alambre de cobre que lo envolvía.

M. Foucault ha efectuado recientemente, respecto a este particular, un experimento notable con el aparato representado en la [figura 564](#), que consiste en un poderoso electro-imán fijo horizontalmente sobre una mesa. Dos piezas de hierro dulce A y B están en contacto con los polos del electro-imán, de manera que, imantándose ellas mismas por influencia, concentran sobre las dos caras de un disco metálico su acción

magnética inductriz. El disco de cobre D, de 75 milímetros de diámetro y 7 milímetros de espesor, se introduce en parte entre las piezas A y B, en cuya situación se le comunica, mediante un manubrio y una combinación de ruedas y piñones dentados, una velocidad de 150 a 200 vueltas por segundo.

Supuesto esto, en tanto que la corriente de la pila no pasa por el alambre del electro-imán, no se experimenta más que una débil resistencia al hacer girar el manubrio, y si, cuando ha adquirido por medio de las ruedas del disco un rápido movimiento de rotación, se la abandona a sí misma, la rotación continúa bastante tiempo, en virtud de la velocidad adquirida. Pero si se hace pasar la corriente, el disco y las otras piezas se paran casi instantáneamente, y si entonces se empuña de nuevo el manubrio, se experimenta una resistencia considerable. Pero si a pesar de esta resistencia se continúa girando, es cuando la fuerza que se gasta se trasforma en calor, pues el disco se calienta de una manera notable. En un experimento que hemos presenciado, efectuado por M. Foucault, la temperatura del disco se elevó desde 10 hasta 61 grados en 3 minutos, siendo producida la corriente tan sólo por tres pares de la pila de Bunsen. Con seis, es tal la resistencia, que no se podría girar por mucho tiempo.

▽△

## Capítulo VII

▽△

### Efectos ópticos de los imanes poderosos; diamagnetismo

730. Efectos ópticos de los imanes poderosos. -M. Faraday descubrió, en 1845, que un electro-imán poderoso ejerce en muchas sustancias transparentes una acción tal, que si un rayo polarizado las atraviesa en la dirección de la línea de los polos magnéticos, se desvía el plano de polarización hacia la derecha o bien hacia la izquierda (544), según el sentido de la imantación.

La [fig. 565](#) representa el aparato de M. Faraday, tal cual lo construye M. Ruhmkorff. Se compone de dos electro-imanes M y N sumamente poderosos, fijos en dos soportes de hierro O, O', que pueden acercarse más o menos deslizándose sobre el armazón o pie K. La corriente de una pila de 10 a 11 pares de Bunsen penetra por A, sigue por un conmutador H, por el carrete M, luego por el N, por el alambre g, baja por el i, pasa de nuevo al conmutador, y sale por B. Los dos cilindros de hierro dulce, que ocupan el eje de los carretes, poseen unos agujeros cilíndricos para el paso de los rayos luminosos. Finalmente, en b y en a, existen dos prismas de Nicol (542, 4.º), que sirven, el primero de polarizador, y el segundo de analizador. Gira este último, por medio de una alidada, en el centro de un círculo graduado P.

Dispuestos estos dos prismas de modo que sus secciones principales sean perpendiculares entre sí, el prisma a extingue por completo la luz transmitida al través del prisma b. Si entonces se coloca en c, sobre el eje de los dos carretes, una placa de caras paralelas de flint o de vidrio, se extingue también la luz mientras no pasa la corriente; pero luego que se establecen las comunicaciones, reaparece la luz, pero

coloreada; y si se hace girar el analizador a hacia la derecha o hacia la izquierda, en la dirección de la corriente, recorre la luz las diversas tintas del espectro, conforme sucede con las placas de cuarzo talladas perpendicularmente al eje (545). M. E. Becquerel ha consignado que muchas sustancias sólidas y líquidas pueden hacer girar así el plano de polarización bajo la influencia de imanes poderosos. M. Faraday admite que en estos experimentos, la rotación del plano de polarización depende de una acción de los imanes sobre los rayos luminosos, y los señores Biot y Ed. Becquerel creen que procede de una acción de los imanes sobre los cuerpos transparentes sometidos a su influencia, que es la hipótesis que generalmente se admite.

751. Efectos diamagnéticos de los imanes poderosos. -Se ha visto ya (565) que se llaman *diamagnéticos* los cuerpos que son repelidos por los imanes. Esta denominación se ha adoptado por M. Faraday, quien observó por primera vez estos fenómenos en 1847. Los efectos diamagnéticos de los imanes no se manifiestan sino cuando son éstos muy poderosos, y con el aparato de M. Faraday es como ([fig 565](#)) se han descubierto y estudiado. Encuéntanse sustancias diamagnéticas lo mismo en los sólidos que en los líquidos y en los gases, conforme lo demuestran los experimentos que siguen, para los cuales se atornillan sobre los carretes armaduras de hierro dulce S y Q, de formas distintas.

1.º *Diamagnetismo de los sólidos.* -Suspendiendo un cubito de cobre, entre los dos imanes, de un hilo de seda torcida, y girando rápidamente sobre sí mismo por efecto de la destorsión del hilo ([fig. 567](#)), se para el cubo en la posición en que se encuentra en el momento en que pasa la corriente por los carretes. Si se da a la pieza móvil la forma de una barrita rectangular, se pone en cruz con el eje de los carretes, o se dirige en el sentido de este eje, según se componga de una sustancia diamagnética, como el bismuto y el antimonio, o bien de una magnética, como el hierro, el níquel o el cobalto.

2.º *Diamagnetismo de los líquidos.* -Los líquidos ofrecen también los fenómenos de magnetismo y de diamagnetismo. Para observarlos, se llenan con ellos unos tubitos muy delgados de vidrio que se suspenden en vez del cubo *m* en la [figura 567](#). Si los líquidos son magnéticos, como las disoluciones de hierro, de níquel o de cobalto, se dirigen los tubos en el sentido del eje de los dos electro-imites; pero, si son diamagnéticos, como el agua, el alcohol, el éter, la esencia de trementina y la mayor parte de las disoluciones salinas, se colocan los tubos en una dirección perpendicular al eje de los imanes.

La acción de los imanes poderosos sobre los líquidos magnéticos o diamagnéticos, se observa también por medio del experimento que sigue, que M. Plücker efectuó por vez primera. Se vierte una disolución de cloruro de hierro en un vidrio de reloj, y se pone éste sobre las dos armaduras P y Q. de los electro-imites del aparato de Faraday. Apenas pasa la corriente por los electro-imites, se ve que forma la disolución, según el intervalo de los carretes, uno o dos rehenchimientos como se representan en A y B ([fig. 568](#)), que persisten mientras pasa la corriente, produciéndose en grados distintos con todos los líquidos magnéticos. Los diamagnéticos ofrecen efectos inversos, conforme se cercioró de ello M. Plücker con el mercurio, observando su curvatura en una moneda de plata recientemente amalgamada y puesta sobre las armaduras.

3.º *Diamagnetismo de los gases.* -M. Bancalary ha sido el primero en observar que la llama de una vela situada entre los dos carretes del aparato de Faraday, es energicamente repelida ([fig. 566](#)). Todas las llamas presentan en grados diversos el

mismo fenómeno: M. Quet ha obtenido efectos de repulsión sumamente intensos, sometiendo al mismo experimento la luz eléctrica de la pila, obtenida con los dos conos de carbón (fig. 483).

Después del experimento de M. Bancalary, han hecho numerosas investigaciones los señores Faraday y Ed. Becquerel sobre el diamagnetismo de los gases, según hemos dicho ya al hablar de la acción de los imanes poderosos sobre todos los cuerpos (565). Además, reconoció M. Faraday que el oxígeno, que es magnético a la temperatura ordinaria, se vuelve diamagnético a otra muy elevada, y que, a menudo, el magnetismo y el diamagnetismo de una sustancia dependen del medio en que está. Por ejemplo, un cuerpo magnético en el vacío puede ser diamagnético en el aire.

4.º *Detonación producida por la rotura de la corriente bajo la influencia de un poderoso electro-imán.* -Citaremos todavía, como efecto notable del aparato de M. Faraday, el siguiente experimento del cual somos deudores a M. Ruhmkorff. Cuando se colocan entre los dos polos S y Q de la figura 566 las dos extremidades del grueso alambre por el cual pasa la corriente del electro-imán, es decir, cerrando la corriente entre los dos polos S y Q, este cierre se verifica sin chispa y sin ruido, o bien con un ruido y una chispa débiles. Pero, en el momento en que se separan las dos extremidades del alambre, y que, por consiguiente, se interrumpe la corriente, surge una detonación violenta, casi tan fuerte como la de un pistoletazo. Al parecer pues, en este caso es la intensidad de la extra-corriente (716) la que se aumentaría poderosamente por la influencia de los dos polos de un electro-imán.

732. Teoría del diamagnetismo. -Muchas son las teorías que se han propuesto para explicar los fenómenos diamagnéticos. Ya se ha consignado que M. Ed. Becquerel (565) admite que la repulsión que ejercen los imanes sobre ciertas sustancias, depende de que se hallan rodeadas por un medio más magnético que ellas, lo cual es evidentemente una aplicación del principio de Arquímedes. M. Plücker dio una teoría que difiere de la de M. Ed. Becquerel, pero apoyada también en el principio de Arquímedes. M. Faraday relaciona los fenómenos diamagnéticos a los de inducción, admitiendo que en un cuerpo diamagnético, como el bismuto por ejemplo, se producen al aproximar un poderoso imán, corrientes de inducción sobre las cuales reaccionan las de Ampere, es decir, las que este físico ha supuesto en los imanes (698). De suerte que, colocándose ante sí los polos del mismo nombre, hay repulsión, como en los solenoides. En las sustancias magnéticas, por el contrario se producen corrientes orientadas de modo que están el uno enfrente del otro los polos no idénticos, y en tal caso se manifiesta la atracción.

▽△

## Capítulo VIII

▽△

### Corrientes termo-eléctricas

733. Experimento de Seebeck. -Hasta ahora sólo hemos hablado del corrientes eléctricas desarrolladas por las acciones químicas, porque éstas constituyen efectivamente el manantial más poderoso de electricidad dinámica. El calor puede dar también origen a corrientes, aunque muy débiles en verdad, notables por el enlace que establecen entre el calor y la electricidad, y por la aplicación que han recibido en el aparato de M. Melloni. Estas corrientes se han denominado *termo-eléctricas*, para distinguirlas de las que proceden de acciones químicas, que se llaman *corrientes hidro-eléctricas*.

Sabíase ya que muchos cristales naturales, como la turmalina y el topacio, adquirían propiedades eléctricas cuando se elevaba su temperatura, y Volta había consignado que una lámina de plata, calentada desigualmente en sus dos extremidades, constituía un elemento electro-motor; pero Seebeck, profesor de Berlín, fue el primero que, en 1821, demostró que el movimiento del calórico en un circuito metálico podía originar corrientes eléctricas.

Compruébanse estas corrientes por medio de un aparatito ([fig. 569](#)) que consiste en una lámina de cobre *mn*, cuyas extremidades están encorvadas y soldadas con una lámina de bismuto *op*. En el interior del circuito así formado, existe una aguja imantada *a*, móvil sobre un eje. Dispuesto el aparato en la dirección del meridiano magnético, se calienta ligeramente una de las soldaduras, según indica la figura, y entonces se desvía la aguja, indicando una corriente de *n* hacia *m*, es decir, de la soldadura caliente a la fría, en el cobre. Si, en vez de calentar la soldadura *n*, se enfría con hielo, conservando a la otra su temperatura, se produce también una corriente, pero en sentido inverso, esto es, de *m* a *n*, y en ambos casos es tanto más enérgica, cuanto mayor es la *diferencia* de temperatura de las dos soldaduras.

734. Causa de las corrientes termo-eléctricas. -No pueden atribuirse al contacto las corrientes termo-eléctricas, porque se desarrollan en circuitos constituidos por un solo metal; ni tampoco provienen de acciones químicas, pues M. Becquerel se ha cerciorado de que se originan igualmente en el vacío y en el hidrógeno. Observando estas corrientes por medio del galvanómetro, encontró el mismo físico que dependen siempre de la desigual propagación del calórico al través de las diferentes partes del circuito.

Para demostrarlo, se toma un arco formado de dos metales, y se reúnen sus dos extremidades con las del alambre galvanométrico, ya simplemente por contacto, o bien soldándolas entre sí. Mientras que todos los puntos del circuito poseen una temperatura, no indica el galvanómetro ninguna corriente; mas, si se calienta una, de las soldaduras, inmediatamente la desviación de la aguja del multiplicador acusa el paso de una corriente.

Si todas las partes del circuito son homogéneas, no se manifiesta corriente alguna al calentar cualquiera de sus puntos, porque entonces se propaga el calórico con igualdad en todas direcciones; cual sucede, por ejemplo, si se reúnen los dos extremos del alambre de cobre que se arrolla alrededor del galvanómetro con otro alambre también de cobre. Pero, si se destruye la homogeneidad de este último alambre en uno de sus puntos, torciéndole muchas veces sobre sí mismo, o anudándole, y si se calienta entonces cerca de este punto, la aguja indica, por su desviación, una corriente que va del punto calentado a aquél en el cual se ha destruido la homogeneidad. Calentando el otro lado de este último punto, se produce la corriente en sentido inverso.

735. Poder termo-eléctrico de los metales. -Se denomina *poder termo-eléctrico* de un metal, la energía de la corriente producida por la propagación del calor en dicho metal. Para una misma diferencia de temperatura, entre dos puntos próximos, varía este poder según los metales, y para un mismo metal, aumenta con la diferencia de temperatura.

Formando circuitos de distintos metales, y elevando a 20 grados una soldadura, mientras se mantienen las otras a cero, pudo clasificar M. Becquerel los metales en el orden creciente de sus poderes termo-eléctricos, a saber: bismuto, platino, plata, estaño, plomo, cobre, oro, zinc, hierro y antimonio: cada uno es positivo comparado con los que le preceden, y negativo respecto de los que le siguen.

756. Teoría de las corrientes termo-eléctricas. -Para explicar la producción de las corrientes por la acción del calor, admite M. Becquerel que, cuando un circuito metálico se calienta en un punto, se descompone el fluido natural, de modo que, en el momento en que aumenta la temperatura de las moléculas, se apoderan éstas de la electricidad positiva y repelen la negativa. Luego, calentándose a su vez las moléculas siguientes, se electrizan positivamente, cediendo su electricidad negativa a las primeras, y así sucesivamente a medida que se propaga el calórico por el circuito; de suerte que se origina una corriente de electricidad positiva de la región caliente a la fría, y otra de electricidad negativa en sentido contrario.

Propagándose el calórico en un circuito homogéneo con igualdad en todos sentidos, la parte calentada da origen a dos corrientes contrarias y de la misma intensidad, cuyo efecto es nulo en la aguja del galvanómetro. Pero si pierde la homogeneidad el circuito, no siendo ya idéntica la conductibilidad calorífica, y como se calienta el circuito más en un sentido que en otro, se producen dos corrientes inversas de desigual intensidad, de suerte que la energía de la que se observa, es entonces la diferencia de las de estas dos. La corriente obtenida es, pues, tanto más intensa, cuanto mayor es la diferencia de los poderes termo-eléctricos de los dos metales. Dedúcese su dirección de la teoría anterior, que dice que el polo positivo corresponde al metal de más poder termo-eléctrico, y el negativo al otro.

737. Propiedades de las corrientes termo-eléctricas. -Las corrientes termo-eléctricas se distinguen de las hidro-eléctricas en que, conducidas como éstas por los metales, no lo son por los líquidos, o a lo menos en grado muy remiso. Con todo, no depende esta diferencia de la naturaleza de las corrientes, sino de su tensión, que es mucho más débil que la de las hidro-eléctricas. En efecto, M. Pouillet ha comprobado, por medio del galvanómetro diferencial, que la intensidad de la corriente termo-eléctrica, desarrollada por un par de bismuto y de antimonio, cuyas soldaduras ofrecen una diferencia de temperatura de 100 grados, es cien mil veces menor que la de la hidro-eléctrica de una pila de artesa ordinaria de 12 pares.

Como los líquidos no conducen las corrientes termo-eléctricas por su escasa tensión, no producen éstas, en general, ningún efecto químico, si bien M. Botto, de Turín, con 150 pares termo-eléctricos de platino y de hierro pudo observar indicios de descomposición en los líquidos.

Las corrientes termo-eléctricas ejercen, lo mismo que las hidro-eléctricas, una acción directriz sobre la aguja imantada; pero como por efecto de su escasa tensión se debilitan rápidamente, cuando crece la longitud del circuito que atraviesan, no debe hacerse que

recorran alambres largos cuando pasan por el circuito del galvanómetro. Por esta razón, en tal caso se forma el circuito con un alambre corto y grueso, mientras que en los galvanómetros destinados para las corrientes hidro-eléctricas, el alambre es fino y largo.

738. Pila termo-eléctrica de Nobili. -Las *pilas termo-eléctricas* son unos aparatos que acumulan las tensiones termo-eléctricas que se producen en un circuito compuesto de muchos metales, cuando se calientan de dos en dos las soldaduras, permaneciendo las otras a una temperatura constante.

La primera pila de este género, construida por Oersted y Fourier, se componía de una serie de barras de bismuto y de antimonio, soldadas en línea recta o formando un círculo. Entre cada dos soldaduras terminaban las barras de bismuto en una parte angular que se introducía en hielo a cero, mientras que se calentaban las otras soldaduras a 200 o 300 grados, por medio de pequeñas lámparas.

M. Nobili ha modificado la forma de la pila termo-eléctrica, con el objeto de dotarle de un número mayor de pares, según un volumen más reducido. Para conseguirlo reunió los pares de bismuto y de antimonio de modo que, después de haber formado una fila de cinco pares ([fig. 571](#)), el bismuto *b* se suelde lateralmente con el antimonio de una segunda hilera semejante, luego el último bismuto de ésta con el antimonio de una tercera hilera, y así sucesivamente hasta cuatro hileras verticales, que contengan reunidas 20 pares, principiando por un antimonio y acabando por un bismuto. Dispuestos de esta suerte los pares, se aíslan entre sí por medio de tiritas de papel cubiertas de barniz, y encerradas luego en un estuche de cobre P ([fig. 570](#)); en términos de que sólo las soldaduras aparezcan en los extremos de la pila. Dos varillas de cobre *m* y *n*, aisladas en un anillo de marfil, comunican interiormente, una con el primer antimonio, representando el polo positivo, y la otra con el último bismuto, haciendo veces del negativo. Estas varillas comunican con las extremidades del alambre de un galvanómetro, cuando se desea observar la corriente termo-eléctrica.

730. Termo-multiplicador de Melloni. -La pila termo-eléctrica construida como la representa la [figura 570](#), combinada con el galvanómetro, se ha transformado en manos de Melloni, en el aparato termométrico más sensible que se conoce. Dicho físico le dio el nombre de *termo-multiplicador* y lo dispuso según indica la [fig. 572](#).

En una tabla de madera sostenida por cuatro tornillos de nivel, se fija *de canto* una regla de cobre de un metro de longitud, dividida en centímetros. En esta regla se colocan, a distancias variables, por medio de tornillos de presión, diferentes piezas, que son: un pie *a*, en el cual se sitúa una lámpara de Locatelli u otro foco de calor, después las pantallas F y E; un segundo pie C, en el cual se sitúan los cuerpos sometidos al experimento, y por último, la pila termo-eléctrica *m*. Cerca del aparato existe un galvanómetro D, de alambre corto y grueso, que comunica en A y en B con los dos polos de la pila. La sensibilidad de este instrumento es tal, que el calor de la mano basta, a la distancia de un metro, para desarrollar en la pila una corriente capaz de desviar la aguja del galvanómetro. Ya sabemos (677) de qué modo se gradúa este último instrumento, así como las importantes aplicaciones que Melloni ha efectuado con su termo-multiplicador al investigar el poder diatérmico de los cuerpos (375 a 385), y la polarización del calor (556).

Para emplear el termo-multiplicador con objeto de medir las temperaturas, hay que determinar antes la relación de la desviación de la aguja, y por lo mismo la intensidad de la corriente, con la diferencia de las temperaturas de las soldaduras. Averiguado esto, y conocida la temperatura de las soldaduras no expuestas al foco de calor, la desviación nos ofrece la de las otras soldaduras, y por consiguiente, la temperatura del manantial.

▽△

## Capítulo IX

▽△

### Intensidad, conductibilidad y velocidad de las corrientes; trasportes y corrientes derivadas

740. Rheostato. -El *rheostato* sirve para aumentar o disminuir la longitud del circuito que recorre una corriente, de modo que produzca en el galvanómetro una desviación determinada. Este aparato, del cual somos deudores a M. Wheatstone, se compone de dos cilindros paralelos, el uno A de latón y el otro B de madera ([fig. 573](#)). Este último posee en toda su longitud una ranura en forma de hélice, y termina en la extremidad *a* por un anillo de cobre, al cual se fija la punta de un alambre fino de latón. Este alambre, que tiene 40 metros de longitud, se arrolla más o menos en la ranura, pasa por el cilindro A, y después de dar muchas vueltas en dicho cilindro, se fija en su extremidad *e*. Finalmente, dos tornillos de presión *n* y *o*, que mantienen fijos los conductores de la corriente que se desea observar, comunican por dos láminas de acero, uno con el cilindro de cobre A, y el otro con el anillo *a*.

Cuando una corriente entra en *o*, no atraviesa más que la porción de alambre arrollada en el cilindro B, en el cual están aisladas las espiras por la ranura; pero luego que llega al cilindro A, que es metálico y que se halla en contacto con el alambre, pasa directamente de *m* a *n*. Por lo tanto, si se desea aumentar la longitud del circuito, basta hacer girar al manubrio *d* de derecha a izquierda; y si, por el contrario, se la quiere disminuir, se coloca el manubrio sobre el eje *c*, y girando entonces de izquierda a derecha, se arrolla el alambre sobre el cilindro A. Podemos pues, disminuir o aumentar así, según se quiera, la intensidad de la corriente, pues pronto veremos (742) que esta intensidad se halla en razón inversa de la longitud del circuito. En cuanto a ésta, se la mide en metros y en centímetros, merced a dos agujas que ponen en movimiento, en la extremidad del aparato no visible en el dibujo, los cilindros A y B cuando giran a la vez.

741. Brújula de seno. -La *brújula de seno* es un galvanómetro que mide las corrientes intensas, sin tener que recurrir a una tabla de graduación (677). Este aparato, combinado por M. Pouillet, difiere del galvanómetro ya descrito, en que el alambre de cobre por el cual pasa la corriente, da muy pocas vueltas, a veces una sola, alrededor de la aguja imantada. En el centro de un círculo horizontal N ([figura 574](#)) existe una aguja imantada *m*; otra *n* de cobre plateado, y móvil juntamente con la primera, en la cual está fija, sirve de señal a la aguja *m* en el círculo graduado N. Otro círculo M, de cobre, se halla dispuesto perpendicularmente al horizontal; y en él se arrolla el alambre de cobre que da

paso a la corriente. Las dos puntas de este alambre, representadas en  $i$ , terminan en una pieza E, a la cual concurren dos alambres de cobre  $a$  y  $b$ , que comunican con el manantial eléctrico cuya corriente se quiere medir. Finalmente, los círculos N y M están sostenidos por un pie O, que puede girar alrededor de un eje, que pasa por el centro de un círculo horizontal fijo H.

Dirigido el circuito galvanométrico M en el sentido del meridiano magnético y por consiguiente, en el mismo plano que la aguja, se hace pasar la corriente por los alambres  $a$  y  $b$ . Luego que se desvían las agujas, se da vuelta al circuito M hasta que coincida con el plano vertical que pasa por la aguja imantada  $m$ , en cuyo momento, ejerciéndose la acción directriz de la corriente perpendicularmente a la dirección de la aguja imantada, demuestra el cálculo que la intensidad de la corriente es proporcional al seno del ángulo de desviación de esta aguja, ángulo que se mide en el círculo H, por medio de un nonius que existe en la pieza C. Ésta es la que, fija en el pie O, sirve para hacerle girar por medio de un botón A. Conocido el ángulo de desviación, y por lo tanto su seno, se deduce del mismo la intensidad de la corriente, pues acabamos de ver que ésta es proporcional al seno.

Para demostrar que la intensidad de la corriente es proporcional al seno del ángulo de desviación, sean  $mm'$  (fig. 575) la dirección del meridiano magnético,  $d$  el ángulo de desviación,  $I$  la intensidad de la corriente, y  $T$  la fuerza directriz de la tierra. Si se representa por  $ak$  la dirección y la intensidad de esta última fuerza, se la puede reemplazar por las dos componentes  $ah$  y  $ac$  (29). Como la primera no ejerce acción alguna directriz sobre la aguja, la  $ac$  es la que equilibra a  $I$ , de modo que es preciso que sea  $I=ac$ . Pero el triángulo rectángulo  $ack$  da  $ac=ak \cos cak$ , o  $ac=T \sen d$ , por ser el ángulo  $cak$  el complemento del  $d$ , y  $ak$  igual a  $T$ ; y de consiguiente, por último,  $I=T \sen d$ , que es lo que se quería demostrar.

Se ha construido igualmente una especie de rheómetro, denominado *brújula de tangentes*, porque la intensidad de la corriente es proporcional a la tangente del ángulo de desviación.

742. Leyes de Ohm sobre la intensidad de las corrientes. -Llámanse *corrientes de igual intensidad* aquéllas que, en igualdad de condiciones, producen la misma desviación en una misma aguja imantada. Muchos físicos, y particularmente los Sres, Ohm, Fechner, Lenz, Jacobi, Pouillet, Faraday, de La Rive y Magnus, han tratado de comparar, bajo el punto de vista de su intensidad, las corrientes eléctricas originadas por diversos manantiales. Estas investigaciones, efectuadas con el galvanómetro, con la brújula de seno, con la de tangentes y el rheostato, han conducido a las mismas leyes para las termo-eléctricas o hidro-eléctricas, sin más que, en las primeras, se desprecia la influencia conductriz de la pila, porque siendo metálica y de cortas dimensiones, puede prescindirse de su resistencia; pero no sucede lo mismo con las últimas. En este caso, hay que tener en cuenta la resistencia de la pila, conforme lo hizo M. Pouillet, añadiendo a la longitud del alambre interpolar la del que, por su resistencia, produciría en la corriente la misma disminución de intensidad que causa la pila por su débil conductibilidad. El circuito enteramente metálico, que se supone que entonces recorre la corriente, es lo que M. Pouillet ha denominado *corriente reducida*.

He aquí las diferentes leyes que presentan las corrientes eléctricas, sea cual fuere el manantial de que dimanen:

1.<sup>a</sup> *La intensidad de una corriente es directamente proporcional a la suma de las fuerzas electro-motoras que están en actividad en el circuito;* entendiéndose aquí por

fuerza electro-motora, la causa, sea cual fuere, que produce un desarrollo de electricidad dinámica;

2.<sup>a</sup> *La intensidad es la misma en todos los puntos del circuito;*

3.<sup>a</sup> *Está en razón inversa de la longitud reducida de todas las partes del circuito;*

4.<sup>a</sup> *Está además en razón directa de la sección y de la conductibilidad del alambre que trasmite la corriente.*

Dedúcese de estas dos últimas leyes, que la intensidad permanece constante cuando varía la sección como la longitud del alambre.

M. Pouillet ha encontrado que, así en los líquidos como en los sólidos, la intensidad de la corriente está en razón directa de la sección de la columna líquida que atraviesa, e inversa de su longitud, siempre que valga ésta por lo menos cinco o seis veces el diámetro de la sección.

Las leyes que hemos expuesto, se conocen con la denominación de *leyes de Ohm*, porque fue éste distinguido físico el primero en darlas a conocer hace unos treinta años. Se dedujeron por consideraciones teóricas; pero los señores Lenz y Jacobi, y luego después Pouillet, las han comprobado experimentalmente.

Representando por  $E$  la suma total de las fuerzas electro-motoras en actividad en la pila, por  $R$  la suma total de las resistencias que encuentra la electricidad al propagarse, y por  $I$  la intensidad de la corriente, ha deducido Ohm la siguiente expresión  $I=E/R$ .

Esta fórmula que comprende la primera y la tercera ley de las que antes hemos expuesto, es general, tanto si es o no homogéneo el circuito que reúne los dos polos.

Si representamos por  $L$  la longitud del alambre que reúne los polos, por  $r$  la longitud del alambre que puede reemplazar la resistencia de la pila, o la *longitud reducida de ésta*, se transformará la fórmula en  $I=E/L+r$ .

En las pilas termo-eléctricas en las cuales puede despreciarse la resistencia de la pila, por ser metálicas todas las piezas y de una longitud muy exigua, se reduce la fórmula a la expresión  $I=E/L$ ; es decir, que la intensidad de la corriente se encuentra simplemente en razón inversa del alambre conjunto.

En el caso en que existan  $n$  pares iguales, constituyendo una batería, denominando  $E$  la fuerza electro-motora de un solo par, y  $r$  a su resistencia, admite Ohm que se tiene  $I=nE/L+nr$ ; fórmula que puede escribirse como sigue  $I=E/L/n+r$ . Si el número  $n$  de pares es muy considerable, y  $L$  muy pequeña, se puede despreciar la fracción  $L/n$  y se reduce la fórmula a  $I=E/r$ ; es decir, que en este caso la intensidad es la misma que para un solo par.

743. Conductibilidad por las corrientes hidro-eléctricas. -El poder conductor de los cuerpos, respecto a las corrientes hidro-eléctricas, varía con la energía de éstas y con los diversos conductores que ya han atravesado. En efecto, M. de La Rive observó que las corrientes atraviesan con tanta más facilidad las placas metálicas y los líquidos, cuanto mayor es el número de los que han cruzado, propiedad análoga a la que se nota en los poderes diatérmanos (381).

Por medio del voltámetro (667) encontró Davy, que la conductibilidad de un mismo metal es proporcional a la sección del alambre, estando en razón inversa de su longitud.

M. Becquerel se cercioró de la exactitud de esta ley, por medio de un galvanómetro de dos alambres. En punto a la conductibilidad eléctrica de los diferentes metales, encontró M. Ed. Becquerel que, a cero, sus poderes conductores relativos pueden representarse por los números siguientes: plata recocida, 100; cobre recocido, 91,5; oro recocido, 64,9; zinc, 24; estaño, 14; hierro, 12,3; plomo, 8,9; platino, 7,9, y mercurio, 1,739.

Comparando entre sí los poderes conductores de los diversos líquidos, y tomando como unidad el del agua destilada, obtuvo M. Pouillet estos resultados: agua que contiene  $\frac{1}{20000}$  de ácido nítrico, 6; agua saturada de sulfato de zinc, 167; ídem de sulfato de cobre, 400. Respecto a la relación entre la conductibilidad de los metales y la de los líquidos, es esta última inmensamente más débil, pues, según el mismo físico, el cobre conduce 16 millones de veces más que la disolución saturada de sulfato de cobre, lo cual equivale a 6,400 millones de veces más que el agua destilada.

Finalmente, se ha observado que la elevación de temperatura aumenta el poder conductor de los líquidos, y disminuye el de los metales.

La conductibilidad de los líquidos compuestos se ha considerado hasta hora, por la mayor parte de los físicos, como una conductibilidad puramente *electrolítica*; esto es, procedente de la descomposición química (666). Sin embargo, M. Faraday, al dar a conocer su ley general de las descomposiciones electrolíticas (747), había anunciado ya, que exigía algunas restricciones en el caso de que fuesen capaces los líquidos de conducir la electricidad sin descomponerse.

La conductibilidad puramente electrolítica ha sido sostenida, particularmente por M. Buff; pero M. Foucault ha demostrado recientemente, por medio de delicados experimentos, que los líquidos poseen también una conductibilidad propia, o *conductibilidad física*, a la manera de los metales, sin más diferencia que el ser esta última mucho más débil que la electrolítica, si bien puede ejercer una influencia sensible sobre los efectos químicos de las corrientes y respecto a la ley de M. Faraday.

744. Velocidad de la electricidad. -Numerosas tentativas se han efectuado para determinar la velocidad de propagación de la electricidad en los alambres. En 1834 se sirvió M. Wheatstone de un espejo giratorio semejante al que describimos hablando de la velocidad de la luz ([fig. 259](#)). Por el retardo que surgía, en un tiempo dado, en verse la imagen de la chispa producida por una botella de Leyden cuando pasaba la electricidad por un largo alambre, encontró M. Wheatstone que dicho fluido, en un alambre de latón de 2 milímetros de diámetro, se propagaba con una velocidad de 460.000 kilómetros por segundo, velocidad que corresponde a una vez y media la de la luz. M. Walker, en América, hizo en 1840 varios experimentos sobre el mismo punto, por medio de señales que transmitían los alambres de los telégrafos eléctricos, y encontró que la velocidad de la electricidad era de 30.000 kilómetros por segundo, o sea 15 veces más pequeña que la anterior.

En 1850, los señores Fizeau y Gounelle, experimentando con los alambres telegráficos de París a Amiens y a Rouen, obtuvieron los resultados siguientes:

1.º En un alambre de hierro de 4 y medio milímetros de diámetro, se propaga la electricidad con una velocidad de 101.700 kilómetros por segundo;

2.º En uno de cobre de 2 y medio milímetros de diámetro, la velocidad es de 177.700 kilómetros;

3.º Las dos electricidades se propagan con igual velocidad;

4.º El número y la naturaleza de los elementos que forman la pila, y de consiguiente, la tensión de la electricidad y la intensidad de la corriente, no influyen en la velocidad de propagación;

5.º En conductores de diferente naturaleza, las velocidades no son proporcionales a las conductibilidades eléctricas.

En los experimentos efectuados entre los observatorios de Greenwich y de Edimburgo, con alambres de cobre, se ha encontrado como velocidad de la electricidad 12.200 kilómetros; y entre los observatorios de Greenwich y de Bruselas, por medio de un alambre sub-marino, tan sólo se han hallado 4.300 kilómetros; pero, en este último caso, el alambre de cobre, recubierto de guta-percha, estaba en gran parte sumergido en el mar. M. Faraday la evidenciado que esta enorme diferencia reconoce por causa la acción por influencia que el alambre ejerce al través de la guta-percha sobre el líquido en el cual está sumergido (726). Parece, pues, que los números de MM. Fizeau y Gounelle representan con más exactitud la velocidad de la electricidad en los alambres metálicos.

▽△

## Trasportes por las corrientes; corrientes derivadas

745. Trasportes verificados por las corrientes. -En las descomposiciones químicas originadas por la pila, no sólo hay separación de los elementos, sino también transporte de unos al polo positivo y de los otros al negativo. Davy ha demostrado este fenómeno por medio de varios experimentos, de los cuales no citaremos más que los dos que siguen:

1.º Habiendo vertido una disolución de sulfato de sosa en dos cápsulas reunidas por una torcida de amianto humedecida con la misma disolución, se introduce en la una el electrodo positivo, y en la otra el negativo. Se descompone entonces la sal, y a las pocas horas todo el ácido sulfúrico se encuentra en la primera cápsula, y la sosa en la segunda.

2.º Teniendo tres copas A, B, C ([fig. 576](#)), conteniendo una disolución de sulfato de sosa la primera, jarabe de violeta diluido la segunda, y agua pura la tercera, se ponen en comunicación entre sí por medio de torcidas de amianto humedecidas, y luego se hace pasar la corriente de C hacia A, por ejemplo. Se descompone entonces el sulfato de la copa A, en la cual que es negativa, queda muy pronto la sosa, siendo transportado todo el ácido a la copa positiva C. Si, por el contrario, va la corriente de A a C, a ésta se dirige la sosa quedándose el ácido en A; pero en ambos casos se observa el notable fenómeno de que la tintura de violeta de B, ni se enrojece, ni se enverdece por el paso del ácido ni de la base por su masa, fenómeno cuya explicación vamos a exponer.

746. Hipótesis de Grothus sobre las descomposiciones electro-químicas. -Grothus dio de las descomposiciones electro-químicas operadas por la pila la teoría que sigue: adoptando primero la hipótesis de que en todo compuesto binario, o que se comporta como tal, uno de los elementos es electro-positivo y el otro electro-negativo (668), admite dicho físico que, bajo la influencia de las electricidades contrarias de los electrodos de la pila, se produce en el líquido en que penetran una serie de composiciones y recomposiciones sucesivas de uno a otro polo, de suerte que sólo los elementos de las moléculas extremas, por no recomponerse, quedan libres y se dirigen a los polos. El agua, por ejemplo, como se compone de un átomo de oxígeno y de dos de hidrógeno, y como el primer gas es electro-negativo y el segundo electro-positivo, cuando dicho líquido es atravesado por una corriente suficientemente enérgica, la molécula *a*, en contacto con el polo positivo, se orienta como indica la [figura 577](#); esto es, el oxígeno se encuentra atraído el hidrógeno repelido. Dirigiéndose entonces el oxígeno de esta molécula al electrodo positivo, el hidrógeno que queda libre se une inmediatamente con el oxígeno de la molécula *b*, luego el hidrógeno de ésta con el oxígeno *c*, y así sucesivamente hasta el polo negativo, en donde los últimos átomos de hidrógeno quedan libres y van al polo. La misma teoría se aplica a los óxidos metálicos, a los ácidos y a las sales, y explica por qué en el experimento del párrafo anterior no se enverdecó ni enverdeció la tintura de violeta de la copa B.

747. Ley de las descomposiciones químicas por la pila. -M. Faraday dio a conocer esta notable ley de las descomposiciones por medio de la pila: *Cuando una misma corriente actúa sucesivamente sobre una serie de disoluciones, los pesos de los elementos separados están en la misma relación que sus equivalentes químicos.*

Los experimentos que han conducido a esta ley se hicieron con voltímetros (667) reunidos entre sí por medio de alambres de platino y atravesados por la misma corriente. Así se ha encontrado, con disoluciones salinas de diversos metales, que las cantidades de metal depositadas sobre los alambres negativos, en los voltímetros, eran respectivamente proporcionales a los equivalentes de dichos metales.

748. Corrientes derivadas, leyes de la derivación. -Supongamos la corriente producida por un par de Bunsen recorriendo un alambre de cobre *rqpnm* ([fig. 578](#)), y consideremos el caso en que se reúnen dos puntos cualesquiera *n* y *q* de este circuito por un segundo alambre *nxq*. Bifurcándose la corriente de la pila en el punto *q*, se divide en otras dos, la una que continúa propagándose en el sentido *qpnm*, y la otra que acepta la dirección *qxn*.

Supuesto esto, los dos puntos *q* y *n*, de donde parte y a donde termina el segundo conductor, han recibido el nombre de *puntos de derivación*, el intervalo *qpn* que los separa, el de *distancia de derivación*, y el alambre *qxn*, el de *alambre de derivación*. La corriente que recorre el alambre *qxn*, se llama la *corriente derivada*; la que recorría el circuito *rqpnm* antes de la derivación, es la *corriente primitiva*; la que atraviesa al mismo conductor después de la derivación, es la *corriente parcial*; y por último, se denomina *corriente principal*, la totalidad de la nueva corriente que recorre todo el conjunto del circuito cuando se añade el alambre de derivación.

M. Pouillet, que ha efectuado numerosas investigaciones sobre las corrientes derivadas, ha deducido las leyes siguientes: *la intensidad de la corriente derivada es directamente proporcional a la intensidad de la corriente primitiva y al intervalo de derivación, pero*

se encuentra en razón inversa de la sección del alambre en este intervalo, y también en razón inversa de la conductibilidad del mismo alambre.

▽△

## Capítulo X

▽△

### Electricidad animal, aplicación de la electricidad a la terapéutica

749. Corriente propia de los animales. -La electricidad animal ha sido, según sabemos, un objeto de viva discusión entre los fisiólogos y los físicos (635 y 636). Desde el tiempo de Galvani se han hecho numerosos experimentos, especialmente por Aldini, Humboldt, Lehot, Nobili, Marianini y Matteucci.

M. Nobili fue el primero que observó con el galvanómetro, en ranas preparadas como la de Galvani ([fig. 466](#)), una corriente que denominó *corriente propia* de la rana. Introducía, al efecto, los miembros crurales de aquella en una cápsula llena de agua salada, y luego los nervios lumbares en una segunda cápsula llena de una disolución análoga, y cerraba el circuito, sumergiendo en cada cápsula una punta del alambre de un galvanómetro muy sensible. Así obtenía una desviación de 10 a 30 grados, que indicaba una corriente que se dirigía desde los pies a la cabeza del animal.

M. Matteucci ha obtenido efectos análogos, formando pilas con muslos de rana. Al efecto, tomaba las mitades de aquéllos más próximas a la pierna, las desollaba conservándoles el nervio lumbar, y las disponía en series, de modo que el nervio de cada una se aplicase a la parte muscular de la siguiente. Cerrado en seguida el circuito con el alambre de un galvanómetro, obtuvo M. Matteucci, con 8 mitades de muslos, una desviación de 12 grados.

El mismo físico formó también pilas de muslos de rana, separando el nervio lumbar y haciendo tocar el interior del músculo de cada muslo con la superficie externa del siguiente. Siempre observó en los músculos de los animales vivos o muertos recientemente, una corriente, al cerrar el circuito, que iba del interior del músculo a su superficie. M. Matteucci la designa con el nombre de *corriente muscular*, que distingue de la *corriente propia* de la rana. En ésta encontró siempre a la vez las dos corrientes, y en los demás animales sólo la muscular.

M. del Bois-Reymond ha publicado recientemente nuevas investigaciones sobre las corrientes musculares en el hombre. Atendida la gran resistencia del cuerpo humano, hubo de recurrir a un galvanómetro de veinte y cuatro mil vueltas. M. del Bois-Reymond ha comprobado que, haciendo comunicar los dos extremos del alambre galvanométrico con dos puntos simétricos del cuerpo, por ejemplo, con las dos manos o con los dos pies, da el galvanómetro primero indicaciones muy irregulares, pero que muy en breve se produce una corriente cuya dirección permanece constante cuando se repite muchas veces el experimento, aun a grandes intervalos. No tiene esta corriente la misma intensidad en todos los individuos, sino que puede mudar de dirección en uno mismo, si bien en épocas muy distantes, porque persiste a veces por muchos meses en una dirección constante.

750. Peces eléctricos. -Llámanse así los que poseen la notable propiedad, cuando se los irrita, de hacer experimentar a los que los tocan conmociones comparables a las de la botella de Leyden. Muchas especies existen de peces eléctricos; pero los más conocidos son la tremielga, el gimnoto y el siluro. La tremielga, que es muy común en el Mediterráneo, ha sido estudiada con especial esmero por los señores Becquerel y Breschet, en Francia, y por M. Matteucci, en Italia; y el gimnoto por los señores Humboldt y Bompland, en la América del Sur, y, por M. Faraday, que se los proporcionó vivos, en Inglaterra.

La conmoción que producen los peces eléctricos les sirve de arma ofensiva y defensiva, voluntaria por su parte, pero que se debilita gradualmente a medida que se renueva y que pierden su vitalidad dichos animales, porque la acción eléctrica determina muy pronto en ellos una considerable extenuación.

Esta conmoción es muy violenta: según Faraday, equivale la del gimnoto a la de una batería eléctrica de 15 frascos, midiendo la superficie total de las armaduras  $2\frac{1}{4}$  metros cuadrados, con lo cual se explica por qué en muchos casos sucumben caballos a las reiteradas descargas de los gimnotos.

Muchos experimentos comprueban que la causa de las conmociones es sin duda alguna la electricidad ordinaria. En efecto, si tocando con una mano el dorso del animal, se pasa la otra o una varilla metálica por el vientre, se siente una violenta conmoción en las muñecas y en los brazos, mientras que si se hace lo mismo con un cuerpo aislador, es nula la conmoción. Además, cuando se hacen comunicar las dos puntas del alambre del galvanómetro, la una con el dorso del animal, y la otra con el vientre, a cada descarga se desvía la aguja y vuelve inmediatamente al cero, lo cual demuestra que hay corriente instantánea; y por otra parte, el sentido de la desviación indica que la corriente se dirige del dorso al vientre del pez. En fin, si se hace pasar la corriente de una tremielga por una hélice en cuyo centro exista una barrita de acero, queda ésta imantada por el paso de la descarga.

Por medio del galvanómetro comprobó M. Matteucci los hechos que siguen:

1.º Mientras es vivaz la tremielga, puede causar la conmoción por cualquiera punto de su cuerpo; pero a medida que se extenua la vitalidad del animal, las partes que pueden producir la conmoción se acercan más y más al órgano que sirve de asiento al desarrollo de la electricidad.

2.º Un punto cualquiera del dorso es constantemente positivo con relación al punto correspondiente del vientre.

3.º De dos puntos lejanos desigualmente del órgano eléctrico, el más inmediato desempeña siempre el papel de polo positivo, y el más apartado el de negativo; sucediendo lo inverso con los puntos del vientre.

El órgano que da origen a la electricidad en la tremielga, es doble, y consta de dos partes simétricas, situadas a ambos lados de la cabeza y adheridas a los huesos del cráneo por su cara interna. Estas dos partes se reúnen entre sí delante de los huesos de la nariz, pero están separadas de la piel por una gran aponeurosis. Según M. Matteucci, cada uno de estos órganos se compone de un número bastante considerable de pequeñas masas prismáticas, unas al lado de otras, y que van de la cara externa a la interna, de modo que su sección perpendicular a las aristas de los prismas ofrece el aspecto de los alvéolos de un panal de miel. Estos prismas están divididos, perpendicularmente a sus aristas, por una serie de diafragmas que forman otra de vesiculitas idénticas entre sí y llenas de 9 partes de agua por 1 de albúmina, y de un poco de sal común.

M. Matteucci, fundándose en el siguiente experimento, considera cada una de estas vesiculitas como el órgano elemental del aparato eléctrico. Aísla del aparato de una tremielga viva una masa de estas vejiguillas que tenga el tamaño de la cabeza de un gran alfiler, y la pone en contacto con los nervios de una rana muerta, preparada por el método de Galvani; observando que, cuando excita esta masa vesicular pinchándola con un cuerpo puntiagudo, se manifiestan contracciones en la rana.

M. Matteucci ha buscado, además, la influencia del cerebro en la descarga; y al efecto, puso al descubierto el cerebro de una tremielga viva, y observó que se pueden irritar los tres primeros lóbulos sin que se produzca la descarga, y que, separándolos, continúa poseyendo el animal la facultad de causar la conmoción. Lo contrario sucede con el cuarto lóbulo, que no puede irritarse sin que se manifieste al instante la descarga, pero amputándolo desaparece todo de desarrollo de electricidad, aun cuando queden intactos los demás lóbulos. Se ha llegado así a admitir, que el foco primero de la electricidad elaborada sería el cuarto lóbulo, desde donde se transmitiría, merced a los nervios, a los órganos que acabamos de describir, órganos que obrarían como multiplicadores. En el siluro parece que el cerebro es igualmente el punto de partida de la electricidad.

Fundándose los físicos en la considerable cantidad de electricidad que se desarrolla en la economía de ciertos peces, trataron de averiguar si se elaboraba en los demás animales, no ya en suficiente cantidad

para producir conmociones como las de la botella de Leyden, como para originar acciones lentas y desempeñar funciones esenciales de la vida, como las secreciones, la digestión, etc.

751. Aplicación de la electricidad a la terapéutica. -Las primeras aplicaciones de la electricidad a la medicina datan desde el descubrimiento de la botella de Leyden. Nollet y Boze, fueron, al parecer, los primeros físicos que pensaron en la aplicación de la electricidad, y muy pronto las chispas y las fricciones eléctricas se convirtieron en una panacea universal; pero preciso es confesar que los primeros ensayos no correspondieron las esperanzas de los experimentadores.

Apenas se descubrió la electricidad dinámica, propuso Galvani su aplicación a la medicina; y después, muchos físicos y fisiólogos han tratado esta cuestión; pero no obstante, reina aún hoy día una grande incertidumbre sobre los efectos reales de la electricidad, sobre los casos en que hay que aplicarla, y en fin, sobre el mejor sistema de aplicación. Sin embargo, todos los prácticos convienen en preferir el uso de las corrientes al de la electricidad estática, y salvo en un corto número de casos, las interrumpidas a las continuas. Existen también dudas entre las corrientes de la pila y las de inducción, y además, varían los efectos de éstas, según se haga uso de las de inducción de primero o de segundo orden (717).

En efecto, las corrientes de inducción, aunque muy intensas, ejercen una acción química muy débil, y por lo mismo, cuando atraviesan los órganos, no producen en ellos los efectos químicos que las de la pila, y de consiguiente, tampoco los desorganizan. Además, para la electrización de los músculos de la cara deben preferirse las corrientes de inducción porque el doctor Duchenne, que ha efectuado numerosas investigaciones médicas de la electricidad, ha comprobado que estas corrientes obran muy débilmente sobre la retina, mientras que las de la pila lo efectúan con mucha viveza, pudiendo afectar peligrosamente dicho órgano, según lo han demostrado funestos accidentes. Al decir del doctor Duchenne, la corriente inducida de primer orden determina vivas contracciones musculares; pero afecta muy poco la sensibilidad cutánea, mientras que la de segundo orden la exalta, por el contrario, en términos que deben proibirse a las personas de piel muy irritable.

De todo lo que precede, debemos deducir que no han de aplicarse las corrientes a la terapéutica sino con un profundo conocimiento de sus diversas propiedades. Además, se usarán con mucha prudencia, porque su acción, demasiado prolongada, puede acarrear graves accidentes. M. Matteucci, en sus lecciones sobre los fenómenos físicos de los cuerpos vivos, se expresa así: «Se principiará siempre empleando una corriente muy débil. Esta precaución me parece hoy más importante, desde que he visto un paralítico atacado de convulsiones verdaderamente tetánicas, por la acción de la corriente producida por un solo elemento. Procúrese no prolongar jamás su paso, sobre todo si la corriente es enérgica. Aplíquese la corriente interrumpida mejor que la continua; pero se darán algunos momentos de descanso al enfermo antes de *veinte*, o a lo sumo de *treinta* sacudidas».

Muchos aparatos se han ideado para aplicar a la terapéutica las corrientes interrumpidas, obtenidas, ya por la inducción de las corrientes, ya por la de los imanes, ya por la misma pila. El doctor Rogueta, italiano, construyó en París el primer aparato de esta especie, y después dieron a conocer otros varios los señores Masson, Dujardin, Gloesner, Breton y Duchenne. Describiremos tres de ellos, que serán: dos del doctor Duchenne, que dan, el uno la corriente inducida del primer orden, y el otro la del primero o del segundo, según se quiera; y el tercer aparato, inventado por M. Pulvermacher, da la corriente ordinaria de la pila, pero interrumpida y con gran tensión.

752. Aparato electro-voltaico del doctor Duchenne. -Se compone este aparato de un carrete de dos alambres, análogo al que hemos descrito ya al hablar de las corrientes de inducción (712), y encerrada en un estuche de latón V (fig. 579). Dicho carrete se halla fijo en una caja de madera que tiene dos cajones: el primero contiene una brújula que hace veces de galvanómetro, y que sirve para medir la intensidad de la corriente inductora por la desviación que imprime a la aguja; y el segundo encierra una pila de carbón dispuesta de modo que presente el menor volumen posible. El elemento zinc Z tiene la forma de una gavetilla, en la cual se echa una disolución de sal común y una placa rectangular de carbón de coke bien calcinado, como el de la pila de Bunsen. En la parte central del carbón existe una pequeña cavidad O, donde se vierte un poco de ácido nítrico, que es absorbido. Dos laminas de cobre L y N comunican, la primera con el zinc, y representa el polo negativo, y la segunda con el carbón para hacer las veces del positivo. Cuando están cerrados los cajones, los polos L y N se hallan en contacto con las extremidades inferiores de los botones de cobre E y C, partiendo de estos últimos dos alambres de cobre EF y CB, que

conducen la corriente a las piezas H y G, la primera de las cuales es móvil. Cuando ésta desciende, pasa la corriente; pero si sube, según se ve en el grabado, se interrumpe ésta.

Como no principia la corriente inducida sino en el momento en que la inductora principia o termina, conviene que esta última sufra continuas intermitencias. Éstas pueden ser rápidas o lentas según se quiera, en el aparato del doctor Duchenne. En las rápidas, pasa la corriente por una pieza A de hierro dulce, que oscila con viveza bajo a influencia de un haz de alambre de hierro dulce, situado en el eje del carrete, y que se imanta temporalmente mientras circula la corriente. Esta pieza A es la que, en su movimiento de vaivén, interrumpe y restablece la corriente inductora, y por lo tanto, produce la inducida.

Para las intermitencias lentas se fija la pieza oscilante por medio de una varilla *a*, y luego, en vez de hacer pasar la corriente por A, lo efectúa por una lámina elástica K y por los dientes de una rueda de madera D, que son de metal y que comunican con el pie I y el botón C. Girando el manubrio M, se interrumpe la corriente siempre que K deja de tocar un diente, y como existen cuatro, hay cuatro intermitencias por revolución, lo cual permite, dando vueltas con más o menos rapidez variar según se desee el número de las intermitencias, y por lo mismo, de las conmociones en un tiempo dado.

Para transmitir las conmociones, se hacen llegar las dos puntas del alambre de inducción a dos botones P y Q, en los cuales se fijan dos largos alambres de cobre cubiertos de seda y terminados por dos excitadores con mangos de vidrio T, T. Estos excitadores se aplican a los órganos, de modo que pase la corriente por la región que se desea.

Finalmente, el aparato posee un *graduador* que modifica la intensidad de la corriente. Consiste en un cilindro de cobre que envuelve al carrete y que se puede tirar de él más o menos, como de un cajón, por medio de una varilla graduada R. Se nota el máximo de intensidad cuando el graduador descubre todo el carrete, y el mínimo cuando le cubre. Esta influencia del cilindro-cubierta, observada por M. Dore y por M. Duchenne, se explica por corrientes de inducción, que se producen en su masa.

753. Aparato electro-magnético del doctor Duchenne. -M. Duchenne usa también, en su práctica, un segundo aparato, en el cual no funciona la pila, sino la acción inductora de un poderoso imán, para desarrollar la corriente, lo mismo que en el aparato de Clarke (718). El imán KK ([fig. 580](#)) tiene dos ramas, reunidas en sus extremidades posteriores por una armadura de hierro dulce, y delante de las anteriores hay otra de la misma sustancia C, que puede girar libremente sobre un eje horizontal, merced a un piñón O, a una gran rueda A, a una cadena a la Vaucanson y a un manubrio M.

En las dos ramas de los imanes se arrolla un alambre de cobre cubierto de seda, que recibe la inducción de aquéllos, y luego sobre el primer alambre otro EE, que da paso la corriente inducida de segundo orden.

Ahora bien, cuando se comunica a la pieza C un movimiento de rotación más o menos rápido, imantándose ella siempre pasa por delante de los polos de los imanes KK, ejerce en éstos, en punto a la distribución del magnetismo, una reacción que origina en el primer alambre una corriente de inducción del primer orden, mientras que ésta desarrolla a la vez en el EE otra de segundo orden. Se pueden recoger por separado estas corrientes, por medio de un sistema de piezas P o Q, dobles, pero no visible en nuestro dibujo más que una de ellas en cada sistema. La corriente se dirige en seguida por alambres de cobre arrollados en espiral a dos excitadores Y, Y, que se cogen con la mano por sus mangos de vidrio, y que se dirigen según se quiera sobre las partes afectadas, con objeto de que pase por éstas la corriente. Las intermitencias necesarias para la formación

de las corrientes inducidas se obtienen mediante un conmutador B, análogo al del aparato de Clarke, y una serie de piezas S, I, D, F, en cuyos pormenores no entraremos.

Por último, se regula la intensidad de las corrientes por medio de un botón de tornillo N, que acerca o aleja los imanes de la pieza C; pero el principal regulador consta de dos cilindros de cobre H, H, que envuelven los carretes, cubriéndolos más o menos, según la dirección de un tirador R, al cual están fijas. Llegan a su mínimo de intensidad las conmociones cuando los cilindros cubren por completo los carretes, y a su máximo, cuando se hallan éstos completamente descubiertos, fenómenos que se explican por las corrientes de inducción que se desarrollan en la masa de los cilindros.

Como no podemos describir aquí los efectos terapéuticos de estos aparatos, nos limitaremos a decir que su eficacia ha sido comprobada, sobre todo en las parálisis, y más particularmente en las parálisis saturninas. Para más pormenores, remitimos al lector a la grande obra que ha publicado M. Duchenne con el título *De la electrización localizada y de su aplicación a la fisiología, a la patología y a la terapéutica*.

754. Cadena galvánica de M. Pulvermacher. -M. Pulvermacher ha ideado recientemente una nueva pila, notable por su gran tensión y por la facilidad con que funciona. Se parece mucho a la de columna (638), y está representada en la [fig. 581](#), en el momento en que se recibe la conmoción, y en la [582](#) se ven sus detalles.

Se compone de una serie de cilindritos de madera M y N, en los cuales se arrollan, el uno al lado del otro, sin tocarse, un alambre de zinc y otro de cobre. En cada una de sus puntas, el alambre de zinc *ab* del cilindro M se articula con el de cobre del N, por medio de dos pequeños anillos de cobre implantados en la madera; luego el zinc de N se une del mismo modo con el cobre del tercer cilindro, y así sucesivamente, en términos de que siempre el zinc de un cilindro forma con el cobre del siguiente un par comparable a los de la pila de la columna. Formando así el todo una especie de cadena que se coge por los dos extremos, se introduce en una vasija con vinagre más o menos diluido en agua. Los cilindritos de madera, que son porosos, se empapan entonces en el líquido, hacen el oficio de las rodajas aciduladas de la pila de columna, y la acción química que se produce entre el zinc y el ácido acético da origen a una corriente, tanto más intensa, cuanto más numerosos son los pares. Con una cadena de 120 pares se reciben muy fuertes sacudidas.

Para interrumpir la corriente, lo cual es necesario para las conmociones. M. Pulvermacher hace uso de dos armaduras A y B ([fig. 581](#)), en las cuales se fijan los dos polos de la pila M. La B sirve para establecer mejor el contacto con la mano; pero la A, además de tener el mismo objeto, contribuye a la interrupción de la corriente. Contiene, al efecto, un pequeño movimiento de relojería que hace oscilar una pieza, de modo que, unas veces comunica interiormente, y otras no, el polo de la pila con la pared *i* de la armadura. La rapidez de las oscilaciones, y de consiguiente, el número de sacudidas pueden variar en ciertos límites por medio de un pequeño regulador o que se hace marchar con la mano. Por último, se da cuerda al movimiento de relojería, dando vuelta a una llave *d* que sirve de puño a la armadura.

▽△

## Elementos de meteorología y de climatología

▽△

### Meteorología

755. Objeto de la meteorología. -Se denominan *metéoros* los fenómenos que se producen en la atmósfera, y *meteorología*, la parte de la física que reconoce por objeto el estudio de los mismos.

Se dividen en metéoros *aéreos*, que son los vientos, los huracanes y las trombas; en metéoros *acuosos*, que comprenden las nieblas, las nubes, la lluvia, el rocío, el relente, la nieve y el granizo, y en *luminosos*, como el rayo, el arco iris y las auroras boreales.

#### *Metéoros aéreos.*

756. Dirección y velocidad de los vientos. -Los vientos son corrientes que se manifiestan en la atmósfera con direcciones y velocidades muy variables. Aunque soplan en todas direcciones, se distinguen ocho principales, que son, el *norte*, el

*nordeste*, el *este*, el *sudeste*, el *sur*, el *sudoeste*, el *oeste* y el *noroeste*. Los marinos dividen además los intervalos entre estas ocho direcciones en otras cuatro, cuyo conjunto componen 32 direcciones, que se designan respectivamente con el nombre de *rumbo*. El trazado de estos 32 rumbos, sobre un círculo, en forma de estrella, se conoce con la denominación de *rosa de los vientos*.

La dirección del viento se determina por medio de veletas, y su velocidad se mide con el *anemómetro*, o sea un molinete de alas que el viento hace girar, y del número de sus revoluciones en un tiempo dado, se deduce la velocidad. En nuestros climas la velocidad media es de 5 a 6 metros por segundo. Con una de 2 metros es moderado el viento; con 10, fresco; con 20, fuerte; con 25, hay tempestad, y con 40, huracán.

757. Causas de los vientos. -Los vientos reconocen por causa una falta de equilibrio en cualquiera parte de la atmósfera, procedente de una diferencia de temperatura entre los países próximos. Por ejemplo, si la temperatura del suelo sube en cierta extensión, el aire en contacto con él se calienta, se dilata y asciende hacia las altas regiones de la atmósfera, donde circula, produciendo vientos que soplan de las regiones cálidas a las frías. Además, roto el equilibrio en el nivel del suelo, reproducen al mismo tiempo en las capas inferiores corrientes en sentido contrario a las primeras, por efecto del exceso de peso que existe lateralmente sobre las capas superiores de la atmósfera, a consecuencia del aire que a ellas afluyó.

758. Vientos regulares, periódicos y variables. -En virtud de la dirección más o menos constante en que soplan los vientos, se pueden clasificar en tres grandes divisiones, a saber: vientos regulares, periódicos e irregulares.

1.<sup>a</sup> Son *vientos regulares* los que soplan todo el año según una dirección sensiblemente constante. Estos vientos conocidos igualmente con el nombre de *vientos alíseos*, se observan lejos de las costas, sin interrupción, en las regiones ecuatoriales, soplando del nordeste al sudoeste en el hemisferio boreal, y del sudeste al noroeste en el austral. Reinan a ambos lados del ecuador, hasta los 30 grados de latitud, y su dirección sigue el movimiento aparente del sol; es decir, del este al oeste.

Como los vientos alíseos reconocen necesariamente por causa, lo mismo que los demás, variaciones de temperatura en la atmósfera, se explican por el mayor calor que origina de oriente a occidente la rotación de la tierra. Como este calor hace subir constantemente a la atmósfera el aire de las regiones ecuatoriales, es éste reemplazado por otro más denso que en cada hemisferio va del polo al ecuador; pero, combinándose dichas corrientes con el movimiento de rotación, adquieren, respecto al ecuador, la dirección inclinada y constante que constituye los vientos alíseos.

2.<sup>a</sup> Los *vientos periódicos* son los que soplan con regularidad en la misma dirección, en las mismas estaciones o en las mismas horas del día; tales son, el monzón, el simoun y la brisa. Son *monzones* los vientos que soplan seis meses en una dirección y seis en otra, observándose principalmente en el mar y en el golfo de Arabia, en el de Bengala y en el mar de la China. Estos vientos se dirigen hacia los continentes en verano, y en sentido contrario en invierno.

El *simún* es un viento muy cálido que sopla de los desiertos del Asia y del África, y que está caracterizado por su alta temperatura y por las arenas, que levanta y transporta por la

atmósfera. Cuando sopla, se oscurece el aire, se seca la piel, la respiración se acelera y la sed es ardiente.

Este viento, denominado en España *solano* o *levante*, se llama *sirocco* en Italia y en Argel, donde sopla del gran desierto de Sahara. En Egipto, en cuyo país se deja sentir desde fines de abril hasta junio recibe la denominación de *chamsin*. Los indígenas del África se untan el cuerpo con manteca para preservarse de los efectos de una traspiración cutánea demasiado rápida, ocasionada por dicho viento.

La *brisa* es un viento que sopla en las costas del mar, hacia la tierra durante el día, y de la tierra hacia el mar en el transcurso de la noche; es decir, de la región más fría a la más caliente. En efecto, calentándose de día la tierra más que el mar, el aire se dilata más en los continentes que en éste, sube por lo tanto, y es reemplazado por una corriente de aire más densa, que va del mar hacia la tierra. De noche se enfría más ésta que el agua del mar por la radiación, y se produce el mismo fenómeno en sentido contrario. La brisa de mar principia después de la salida del sol, aumenta hasta las tres de la tarde, y decrece hasta la noche, transformándose en brisa de tierra después de la puesta del sol. Las brisas del mar y de la tierra no se notan más que a poca distancia de las costas. Son regulares entre los trópicos, y mucho menos en nuestras regiones, y se observan indicios de ellas hasta en las costas de la Groenlandia. La proximidad de las montañas origina también brisas periódicas diurnas.

3.<sup>a</sup> Los *vientos variables* son los que soplan unas veces en una dirección, otras en otra, sin sujeción a ley alguna. En las latitudes medias es muy variable la dirección de los vientos; pero, si se avanza hacia los polos, aumenta esta irregularidad, y en la zona glacial soplan a veces los vientos desde muchos puntos del horizonte. Al contrario, se vuelven más y más regulares al acercarse a la zona tórrida. El viento del sudoeste domina en el norte de Francia, en Inglaterra y en Alemania; en el mediodía de Francia la dirección de los vientos se inclina más hacia el norte, y en España o Italia el viento norte es el que predomina.

Ateniéndonos a los datos publicados por el Real Observatorio de Madrid, respecto al año meteorológico de 1860, si representamos por 1000 las horas en que han reinado los vientos del primer cuadrante, los números proporcionales que indican las que han dominado los vientos de diferente dirección, son los que siguen:

Frecuencia de los vientos del N. al E.	1000
- - E. al S.	440
- - S. al O.	936
- - O. al N.	661

759. Trombas. -Las *trombas* son masas de vapores en suspensión en las capas inferiores de la atmósfera que atraviesan, animadas las más de las veces de un movimiento giratorio bastante rápido para arrancar de raíz los árboles, derribar las casas, y destrozarse y destruir cuanto se opone a su marcha.

Estos metéoros, que van generalmente acompañados de granizo y de lluvia, lanzan a menudo relámpagos y rayos, dejando oír en toda la zona que recorren el ruido de un

carromato que pasa por un camino pedregoso. Muchas trombas o mangas no poseen movimiento giratorio, y la cuarta parte de ellas se forma en una atmósfera tranquila.

Las trombas se manifiestan en los mares lo mismo que en los continentes; pero entonces el fenómeno presenta un aspecto muy notable. Las aguas se agitan y se elevan en forma de cono, al paso que las nubes bajan constituyendo un cono invertido; los dos conos se reúnen por sus vértices y originan una columna continua del mar a las nubes ([fig. 583](#)). Sin embargo, el agua de las trombas no es salada, ni aun en alta mar, lo cual prueba que se componen principalmente de vapores condensados, y no de agua del mar elevada por aspiración.

Se ignora el origen de las trombas. M. Kaemtz admite que dependen principalmente de dos vientos opuestos, que pasan el uno al lado del otro, o bien de un viento muy fuerte que reina en las altas regiones de la atmósfera. Peltier y otros muchos físicos, las atribuyen a una causa eléctrica.

#### *Metéoros acuosos.*

760. Nieblas. -Las *nieblas* son masas de vapor acuoso que, condensadas en la atmósfera, ocupan sus regiones bajas y enturbian su transparencia.

Las nieblas se forman cuando el suelo húmedo es más caliente que el aire; los vapores que entonces suben, se condensan y se hacen visibles, si bien es preciso que llegue el aire a su punto de saturación (299), pues de lo contrario no se verifica la condensación. Las nieblas se pueden formar también cuando una corriente de aire caliente y húmedo pasa por encima de un río cuya temperatura es inferior a la suya, porque enfriándose entonces el aire, luego de saturado, se condensan los vapores que contiene.

761. Nubes. -Las *nubes* son también masas de vapores condensados en gotitas de extremada pequeñez, así como las nieblas, de las cuales sólo difieren en que ocupan las altas regiones de la atmósfera, pues siempre resultan de la condensación de los vapores que suben de la tierra. Las nubes se dividen por su aspecto en cuatro especies principales, que son: los *cirrus*, los *cumulus*, los *stratus* y los *nimbus*. Estas cuatro especies de nubes se han representado en la [figura 584](#), y se hallan designadas respectivamente por cuatro, tres, dos o un ave volando.

Los *cirrus* son nubecillas blanquizas que ofrecen el aspecto de filamentos delgados muy semejantes a la lana cardada. Son las nubes más altas, y, atendida la baja temperatura de las regiones que ocupan, se consideran formadas de partículas heladas o de copos de nieve. Su aparición precede a menudo a un cambio de tiempo.

Los *cumulus* son nubes redondeadas que parecen montañas amontonadas unas sobre otras. Son más frecuentes en verano que en invierno, y formándose por la mañana se disipan generalmente por la tarde. Si, por el contrario, aumentan entonces, y sobre todo, si las coronan algunos cirrus, es señal de lluvia o de tempestades.

Los *stratus* son capas nebulosas horizontales, muy anchas y continuas, que se forman a la puesta del sol y que desaparecen a su salida. Son frecuentes en el otoño, raras en la primavera, y más bajas que las anteriores.

Finalmente, los *nimbus* o nubes de lluvia no afectan forma alguna característica, distinguiéndose tan sólo por un color gris uniforme y por sus bordes franjeados.

La altura de las nubes es variable; pero, por término medio, es de 1200 a 1400 metros en invierno, y de 3000 a 4000 en verano. Pero a menudo es mucho mayor, pues Gay-Lussac en su ascensión *aerostática*, a una altura de 7016 metros sobre el nivel del mar, observó encima de él cirrus que se hallaban, al parecer, a gran distancia.

M. d'Abbadie ha notado, en Etiopía, nubes tempestuosas cuya altura no pasaba de 212 metros sobre el nivel del suelo.

Para explicar la suspensión de las nubes en la atmósfera, Halley fue el primero que propuso la hipótesis de los vapores vesiculares, hipótesis que consiste en suponer a las nubes formadas de una multitud de vesículas sumamente pequeñas, huecas como las burbujas de jabón, y llenas de un aire más caliente que el ambiente por un efecto de absorción del calor solar; de modo que estas vesículas flotarían en el aire como si fuesen pequeños globos aerostáticos. Esta teoría, sostenida por Saussure, por Kratzenstein, Bravais y el mayor número de físicos, fue universalmente adoptada en la enseñanza; pero combatida al principio por Desagulier, y, luego por Monge, cuenta hoy con numerosos adversarios, que admiten que las nubes y las nieblas están formadas de gotitas de agua sumamente pequeñas, macizas y que flotan en la atmósfera a consecuencia de las corrientes ascendentes de aire cálido, del mismo modo que el polvo fino es elevado por los vientos. En cuanto a la inmovilidad que ordinariamente presentan las nubes, en sentido vertical, no sería más que aparente, según estos físicos. Con frecuencia las nubes caen lentamente; pero entonces su parte inferior se va disipando de continuo en las capas de aire más caliente que atraviesa, mientras que su parte superior crece sin cesar por la adición de nuevos vapores que se condensan; hecho que nos explica cómo las nubes conservan, al parecer, una altura constante.

Según las observaciones meteorológicas efectuadas en el Real Observatorio de Madrid, desde el 1.º de diciembre de 1859 al 30 de noviembre de 1860, los días despejados fueron: 20 durante los meses de invierno, diciembre, enero y febrero; 32 en los de primavera, marzo, abril y mayo; 40 en los de verano, junio, julio y agosto, y 15 en los de otoño, setiembre, octubre y noviembre. Se entiende por días despejados, no tan sólo aquellos en los cuales no se ven nubes, sino también todos los que no presentaron cubierta por éstas la décima parte de la atmósfera.

762. Lluvia. -La *lluvia* es la caída, en el estado de gotitas, del agua que procede de la condensación, en las altas regiones de la atmósfera, de los vapores que se elevan del suelo.

Se mide la cantidad de lluvia que cae anualmente en un lugar, por medio del *pluviómetro* o *udómetro*. Consiste en una vasija cilíndrica M ([fig. 585](#) y [586](#)), cerrada por su parte superior con una tapadera B en forma de embudo, en el cual cae el agua. Ésta penetra en seguida en el interior de la vasija por un pequeño orificio, de modo que impida en cuanto sea posible la evaporación. De la base del aparato parte un tubo de vidrio A, en el cual sube el agua a la misma altura que en el interior del pluviómetro altura que se mide por medio de una escala graduada en milímetros, situada al lado del tubo ([fig. 585](#)). Puesto el aparato en un sitio descubierto, si al cabo de un mes, por ejemplo, la altura del agua en el tubo es de 5 centímetros, es señal de que en la vasija

llega al mismo nivel, y de consiguiente, que si el agua caída se extendiese sobre el suelo, sin evaporación ni infiltración, habría en todo él una capa de 5 centímetros.

Se ha observado, en el Observatorio de París, que la cantidad de lluvia recogida en el pluviómetro es tanto mayor, cuanto menos elevado está este instrumento sobre la superficie del suelo. Igual observación se ha hecho en Inglaterra y en América. Se ha explicado desde luego este fenómeno, diciendo que las gotas de lluvia que están, en general, más frías que las capas de aire que atraviesan, condensan el vapor contenido en estas capas, y van, por consiguiente, aumentando de volumen; lo cual es causa de que caiga más lluvia en la superficie del suelo que a cierta altura. Pero a esta teoría se ha objetado que el exceso de agua que cae sobre la superficie del suelo sobre la que lo efectúa a una altura determinada, excede seis o siete veces a la que podría resultar de la condensación, aun durante todo el tránsito de las gotas de lluvia desde las nubes hasta la tierra. Se ha atribuido, pues, esta diferencia a una causa puramente local, y se admite hoy que semejante diferencia es ocasionada por remolinos que se producen en el aire alrededor del pluviómetro, de una manera tanto más sensible, cuanto más elevado se encuentra sobre el suelo: estos remolinos originan el efecto de dispersar las gotitas que tienden a caer en el instrumento, y disminuyen de esta suerte el agua que penetra en el mismo.

Sin embargo, es evidente que si las gotas de lluvia atraviesan un aire húmedo, pueden, en virtud de su temperatura, condensar los vapores y aumentar de volumen. Si atraviesan, por el contrario, un aire seco, las gotitas tienden a evaporarse y entonces cae menos lluvia en el suelo que a una altura dada, y hasta puede acontecer, por esta misma razón, que la lluvia no llegue a la tierra.

Muchas circunstancias locales pueden hacer variar la cantidad de agua que cae en diversos países; pero en igualdad de circunstancias, debe llover más en los países cálidos, porque es más abundante la vaporización. Se observa, en efecto, que la cantidad de lluvia decrece del ecuador a los polos. En París, la altura de agua que cae anualmente es de 0<sup>m</sup>,564; en Burdeos, de 0<sup>m</sup>,650; en Madera, de 0<sup>m</sup>,767; en la Habana, de 2<sup>m</sup>,32, y en Santo Domingo, de 2<sup>m</sup>,73.

La cantidad de lluvia varía con las estaciones. En París cae, en invierno, una altura de agua igual a 0<sup>m</sup>,107; en la primavera, 0<sup>m</sup>,174; en verano, 0<sup>m</sup>,161, y en otoño, 0<sup>m</sup>,122. En invierno, pues, es cuando cae menos agua.

En Madrid, los días de lluvia han sido 17 en los meses de invierno, diciembre, enero y febrero; 16 en los de marzo, abril y mayo, que corresponden a la primavera; 10 en los meses de verano, junio, julio y agosto, y 27 en los del otoño, o sean en los de setiembre, octubre y noviembre.

Respecto a los días tempestuosos, no surgió ninguno en los ya mencionados meses de invierno; 3 en los de primavera; 5 en los de verano, y 7 en los del otoño. Estos datos se refieren al año meteorológico de 1860. La lluvia caída en el mismo fue de 268<sup>mm</sup>,2, y la caída el día 25 de diciembre (máximo) 19<sup>mm</sup>,1.

763. Rocío, relente, escarcha. -El rocío no es más que el vapor que se condensa y deposita los cuerpos durante la noche. Este fenómeno depende del enfriamiento que experimentan, por efecto de la radiación nocturna (413), los cuerpos que están en la

superficie del suelo. Descendiendo entonces su temperatura muchos grados bajo la del aire, sucede, particularmente en las estaciones calurosas, que dicha temperatura llega a ser inferior a la de saturación de la atmósfera. Al surgir este hecho, las capas de aire, en contacto con los cuerpos, y sensiblemente a su misma temperatura, dejan depositar parte del vapor que contienen, fenómeno análogo al que se produce cuando, en una pieza caliente y húmeda, se entra una botella de agua fresca, en cuyo caso los vapores se condensan en sus paredes.

Según esta teoría, de la cual somos deudores al inglés Wells, todas las causas que favorecen al enfriamiento de los cuerpos, aumentan la cantidad de rocío. Estas causas son: el poder emisor de los cuerpos, el estado del cielo y la agitación del aire. Los cuerpos de gran poder emisor (371) se enfrían más, y por lo mismo han de condensar más vapor. En efecto, el depósito de rocío es nulo en los metales cuyo poder emisor es débil, sobre todo si están pulimentados; mientras que la tierra, la arena, el vidrio y las plantas, que lo poseen en alto grado, se cubren abundantemente de rocío.

El estado del cielo ejerce también marcada influencia sobre el rocío. Si está despejado, los espacios planetarios, que se hallan a una temperatura muy baja, sólo proyectan sobre la tierra una cantidad inapreciable de calor, y enfriándose entonces rápidamente el suelo por la radiación nocturna, se nota un abundante depósito de rocío. Pero si existen nubes, éstas, cuya temperatura es mucho menos baja que la de los espacios planetarios, radian hacia el suelo, y los cuerpos de la superficie de la tierra se enfrían débilmente, por lo cual no hay depósito de rocío.

También influye el viento en la cantidad de vapor que se deposita. Si es débil, lo aumentará, renovando el aire; y si es más fuerte, origina una disminución, porque el aire, al renovarse, calienta, los cuerpos con su contacto. Por último, crece el rocío con la humedad del aire, porque se halla éste más cerca de su punto de saturación.

El *relente* es una precipitación de agua en forma de finísima lluvia, sin que se perciba nube alguna. Este fenómeno se produce durante los grandes calores, en las regiones húmedas, a la puesta del sol, cuando las capas inferiores del aire descienden a una temperatura inferior a su punto de saturación.

La *escarcha* resulta, lo mismo que el rocío, de los vapores contenidos en la atmósfera que se condensan sobre los cuerpos que poseen una temperatura inferior a cero. La forma esponjosa que presentan los cristallitos de que está formada, manifiesta que aquí se congelan los vapores sin pasar por el estado líquido. La escarcha se deposita, lo mismo que el rocío, sobre los cuerpos que más radian, tales como los tallos y hojas de los vegetales, y el depósito se verifica principalmente sobre las partes dirigidas hacia el cielo.

764. Nieve, granizo, agua-nieve. -La *nieve* es agua solidificada en cristallitos en forma de estrellas, diversamente ramificados y flotantes en la atmósfera. Estos cristales proceden de la congelación de las gotitas que forman las nubes cuando la temperatura de estas últimas desciende bajo cero, siendo tanto más regulares, cuanto más tranquilo está el aire en que se forman. Para observarlos se recogen sobre un cuerpo negro y se miran con una buena lente. La regularidad, y al mismo tiempo la variedad de sus formas, son verdaderamente admirables. La [figura 587](#) representa algunas de las formas

de los cristales de nieve cuando se observan con el microscopio. Sus variedades llegan a constituir un número muy considerable.

Nieva tanto más en un punto, cuanto más cerca se encuentra de los polos, o más elevado sobre el nivel del mar. Hacia los polos, la tierra está constantemente cubierta de nieve, y lo propio sucede en las altas montañas, donde reinan perpetuamente, aun en las regiones ecuatoriales.

Otro fenómeno de esta misma especie; que surge con menos frecuencia, es el llamado *grésil* por los franceses, de cuya palabra no tenemos debida equivalencia en español, a no ser en las provincias, como en Aragón, donde se denomina *amargura*, y en Valencia *peste*. Es también agua solidificada, y se compone de agujitas de hielo apretadas entre sí de un modo confuso. Se atribuye su formación a la congelación brusca del vapor de las nubes en un aire agitado.

El *agua-nieve*, llamada en francés *verglas* (cristal de hielo), es una capa de hielo, lisa y trasparente, que se forma en el suelo en la superficie de los cuerpos. La condición necesaria para constituirse es que, estando bajo cero la temperatura del suelo, caiga un poco de lluvia después de algunos días de frío continuo; en este caso se congela al instante el agua; pero si continúa lloviendo, se calienta la tierra y no se forma el cristal de hielo.

765. Granizo. -El *granizo* es una masa de glóbulos de hielo compactos, más o menos voluminosos, que caen de la atmósfera. En nuestros climas, surge principalmente este fenómeno durante la primavera y el verano en las horas más calurosas del día, y raras veces de noche. El granizo va precedido siempre de un ruido particular.

El granizo es generalmente precursor de las tempestades; casi nunca las acompaña, siendo muy raro que surja después de ellas. El tamaño de las piedras es muy variable, pero con frecuencia alcanza el de una avellana, y han llegado a observarse grandes como un huevo de paloma y del peso de 200 a 300 gramos. Ninguna teoría explica de un modo satisfactorio la formación del pedrisco, y en particular cómo pueden adquirir tanto peso antes de caer. En la teoría de Volta (615), las piedras son sucesivamente atraídas por dos nubes cargadas de electricidades contrarias; pero si esto sucediese con la piedra, con más razón deberían atraerse las dos nubes y confundirse en una sola.

#### *Metéoros luminosos.*

766. Electricidad atmosférica; experimento de Franklin. -Los fenómenos luminosos más frecuentes y más notables por sus efectos son los que produce la electricidad libre que se encuentra en la atmósfera. Los primeros físicos que observaron la chispa eléctrica, la compararon al instante al resplandor del relámpago, y el chasquido que produce, al ruido del trueno. Pero Franklin fue quien, por medio de las baterías eléctricas que había inventado, pudo establecer un completo paralelo entre el rayo y la electricidad, e indicar, en una memoria publicada en 1749, los experimentos que debían efectuarse para atraer de las nubes tempestuosas su electricidad, con puntas metálicas. Guiado el físico francés Dalibard por las ideas teóricas de Franklin, elevó en un jardín, en Marly, cerca de París, una barra de hierro aislada, de 33 metros de altura, la cual, por la influencia de una nube tempestuosa, dio, el 10 de mayo de 1752, chispas bastante fuertes para cargar muchas botellas de Leyden. Sin embargo, Franklin se disponía por

su parte a verificar el experimento que había anunciado; pero, mientras estaba aguardando para esto que estuviese terminado un campanario en construcción, le ocurrió la idea de valerse de una cometa, armada con una punta metálica, que podía llegar a las más altas regiones de la atmósfera. En junio de 1752, con un tiempo borrascoso, y sin tener noticia del experimento de Dalibard, se fue a un campo, cerca de Filadelfia, en compañía de su hijo, aún muy joven. Echó a volar la cometa, atando una llave al bramante, y a aquélla un cordón de seda que había de aislar al aparato, atándolo luego a un árbol. Habiendo presentado la mano a la llave, no saltó primero chispa alguna, y ya principiaba a desesperar del buen resultado, cuando, habiendo sobrevenido una ligera lluvia, se hizo el bramante buen conductor, surgiendo de la llave la deseada chispa. La emoción del célebre físico fue tan viva, según él mismo manifiesta en sus cartas, que no pudo contener las lágrimas.

Franklin, que había descubierto el poder de las puntas (597), pero que ignoraba su teoría, pensaba que la cometa atraía la electricidad de la nube; mas, según la teoría de la electrización por influencia (601), debe explicarse el fenómeno por la influencia que la nube tempestuosa ejercía sobre la cometa y el bramante.

767. Aparatos para apreciar la electricidad de la atmósfera. -Los aparatos que dan a conocer la presencia de la electricidad en la atmósfera son: el electrómetro de esferas de médula de saúco, de pajas o de panes de oro, el aparato de Dalibart, las flechas lanzadas a la atmósfera, y también las cometas o los globos cautivos.

Para observar la electricidad en un tiempo sereno, en que de ordinario es débil la tensión, se usa con preferencia el electrómetro que Saussure había aplicado a este género de investigaciones. Es un electrómetro semejante al que ya hemos descrito (605), pero en el cual el eje que lleva los panes de oro o las pajas, se halla coronado por un conductor de seis décímetros de altura, terminado por una esfera o punta ([fig. 588](#)). Para reservar el aparato de la lluvia, se cubre con una tapadera cónica de latón y de un décímetro de diámetro. La caja de vidrio, que es cuadrada, en vez de redonda, no tiene más de cinco centímetros de lado, y un cuadrante dividido, aplicado en su cara anterior, indica el ángulo de desviación de los panes de oro o de las pajas. Este electrómetro no da signos de electricidad atmosférica, si no se eleva en la atmósfera de modo que se encuentre en capas de aire cuyo estado eléctrico sea superior al suyo. Una elevación de tres décímetros basta para obtener una divergencia de 20 grados a consecuencia del exceso de electricidad.

Saussure empleó igualmente, para reconocer la electricidad de la atmósfera, una esfera de cobre que lanzaba verticalmente con la mano.

Esta esfera estaba fija en la extremidad de un alambre atado por la otra extremidad a un anillo que podía resbalar según toda la longitud del conductor del electrómetro. De la desviación de las pajas o de los panes de oro se deducía el estado eléctrico del aire a la altura a que llegaba la esfera. M. Becquerel, en varios experimentos que efectuó en el monte San Bernardo, perfeccionó el aparato de Saussure, reemplazando la esfera por una flecha que se lanzaba a la atmósfera con un arco muy tenso. Un hilo de seda cubierto de oropel, de 80 metros de longitud, estaba fijo en un extremo de la flecha y comunicaba por el otro con la varilla de un electrómetro de pajas o de panes de oro.

Peltier se valió de un electrómetro de panes de oro que poseía en su parte superior un globo de cobre algo grueso. Con este instrumento, se coloca el observador en un sitio que domine los puntos que le rodean, y basta entonces elevar el electrómetro muy poco, tan sólo algunos decímetros, para que dé muestras de electricidad.

Cuando se quiere observar la electricidad de las nubes, como la tensión eléctrica es entonces muy considerable, sirve una larga barra metálica terminada en punta, como la que adoptó Dalibard. Se aísla bien esta barra, se clava en el remate de un edificio, y por su parte inferior se pone en comunicación con un electrómetro, o bien con un campanario eléctrico ([fig. 439](#)), que anuncia la presencia de las nubes tempestuosas. Con todo, como la barra puede dar entonces chispas peligrosas, hay que colocar al lado una esfera metálica, cuya comunicación con el suelo esté bien establecida, y que se halle más cerca de la barra que el mismo experimentador, a fin de que, si estalla la chispa, no la reciba éste y sí la esfera. Richmann, profesor de San Petersburgo, fue muerto en un experimento de este género por una chispa que le hirió en la frente.

Por último, se ha hecho uso también de cometas con una punta, como en el experimento de Franklin, y que comunican con un electrómetro por medio de una cuerda cubierta de oropel. Se han utilizado igualmente globos cautivos o retenidos por cuerdas metálicas.

768. Electricidad habitual de la atmósfera. -Por medio de los diversos aparatos que acabamos de describir, se ha descubierto que, no sólo posee electricidad la atmósfera mientras hay tempestad, sino en todas épocas, unas veces positiva y otras negativa. Cuando el cielo se halla sereno y sin nubes, se nota constantemente electricidad positiva en la atmósfera; pero varía su intensidad según la altura de los lugares y las horas del día. En los sitios más altos y aislados se observa el máximo de intensidad. En las casas, en las calles y debajo de los árboles no se nota vestigio alguno de electricidad positiva; y ésta no es sensible en las ciudades, sino en las grandes plazas, en los pretilos de los ríos y en los puentes. En todos estos casos, no se observa electricidad positiva sino a cierta altura respecto al suelo. En campo raso se hace sensible a 1<sup>m</sup>,30 de altura, si bien aumenta luego según una ley desconocida y que depende del estado higrométrico del aire.

A la salida del sol, es débil el exceso de electricidad positiva de la atmósfera; aumenta hasta las ocho o las once, según las estaciones, y entonces adquiere un primer máximo; decrece en seguida rápidamente hasta poco antes de la puesta del sol, para aumentar de nuevo, y llega a un segundo máximo pocas horas después de puesto aquél, disminuyendo luego en todo el resto de la noche. Estos períodos crecientes y decrecientes, que se observan en el trascurso completo del año, son tanto más sensibles, cuanto más sereno está el cielo y más tranquilo el tiempo. Por último, la electricidad positiva de los tiempos serenos es mucho más intensa en invierno que en verano.

Cuando el cielo está cubierto, se observa en la atmósfera, o la electricidad positiva, o la negativa. Sucede con frecuencia que la electricidad cambia de signos muchas veces en un día por el paso de una nube electrizada. Durante las tempestades, y mientras está lloviendo o nevando, la atmósfera se halla electrizada positivamente un día, negativamente otro, y los dos números de días son sensiblemente iguales. La tensión eléctrica puede ser bastante intensa para originar la lluvia chispeante, que es un fenómeno que se ha observado con frecuencia.

La electricidad de la tierra, conforme observó Peltier con un multiplicador, es constantemente negativa; pero en diversos grados, según el estado higrométrico y la temperatura del aire.

769. Causas de la electricidad de la atmósfera. -Diferentes hipótesis se han inventado para explicar el origen de la electricidad de la atmósfera. Unos la han atribuido al rozamiento del aire con la tierra; otros a la vegetación de las plantas, o a la evaporación del agua; algunos han comparado también la tierra a una vasta pila voltaica, y varios a un aparato termo-eléctrico (733). Muchas de estas causas pueden concurrir, en efecto, a la producción del fenómeno.

Volta fue el primero que demostró que la evaporación del agua produce electricidad; y después encontró Pouillet que, si el agua se destila, jamás la produce la evaporación; pero que si contiene en disolución, aunque no sea más que una mínima cantidad de un álcali o de una sal, se electriza el vapor positivamente y la disolución negativamente. Lo inverso acontece si el agua se halla combinada con un ácido. Desde entonces se ha admitido que las aguas que hay en la superficie de la tierra y en los mares, por contener siempre en disolución materias salinas, emiten vapores que han de estar electrizados positivamente y el suelo negativamente.

Para comprobar el desarrollo de la electricidad por evaporación; se calienta perfectamente una cápsula de platino, se vierte en ella una corta cantidad de líquido, y se la coloca en el platillo superior del electrómetro condensador ([fig. 455](#)), cuidando de que comunique el platillo inferior con el suelo. Evaporada el agua de la cápsula, se interrumpe la comunicación con el suelo y se quita el platillo superior. Los panes de oro divergen entonces, si el agua tenía en disolución algunas sustancias extrañas; pero quedan en reposo, si estaba destilada.

Fundándose M. Pouillet en este experimento, atribuyó el desarrollo de la electricidad por evaporación a la separación de las moléculas de agua de las sustancias disueltas; pero M. Reich y Riess, en Alemania, han demostrado que puede atribuirse la electricidad desprendida durante la evaporación al rozamiento de las partículas de agua que arrastra el vapor contra las paredes de la vasija, de la misma manera que en la máquina de Armstrong (613). A consecuencia de recientes experimentos, acaba de obtener M. Gaugain el mismo resultado, deduciendo del mismo que no existe razón alguna para atribuir la electricidad de la atmósfera a las segregaciones químicas que se operan durante la evaporación tranquila de las aguas de los mares.

Respecto a la hipótesis que consiste en considerar a la tierra como un inmenso manantial de electricidad voltaica debida a las acciones químicas, M. Becquerel ha publicado recientemente numerosos experimentos, de los que se deduce que en el contacto de las tierras y de las aguas hay siempre desarrollo de electricidad: la tierra acepta un notable exceso de electricidad positiva o negativa, y el agua un exceso correspondiente de electricidad de nombre contrario según la naturaleza de las sales u otros compuestos habidos en disolución en el agua. Éste es un hecho general que, según los trabajos de Becquerel, no reconoce excepción.

M. Becquerel efectuaba los experimentos con un multiplicador ordinario, cuyo alambre se hallaba en comunicación con dos láminas de platino que se sumergían en los terrenos o aguas cuyo estado eléctrico se deseaba conocer. Así es como ha manifestado que,

cuando dos terrenos húmedos están en contacto, el que contiene la disolución más concentrada es el que toma un exceso de electricidad positiva. Del mismo modo ha encontrado que, en la proximación de un río, aun a una distancia bastante grande, la tierra y los cuerpos existentes en su superficie poseían un exceso de electricidad negativa, mientras que el agua y las plantas acuáticas que sobrenadaban en su superficie estaban cargadas de electricidad positiva. Pero, según la naturaleza de las sustancias disueltas en las aguas, pueden producirse efectos contrarios.

Teniendo las aguas, según los experimentos de Becquerel, ya un estado positivo, ya un estado negativo, y las tierras un estado contrario, resulta que, al evaporarse el agua, debe esparcir en la atmósfera un exceso de electricidad positiva o negativa, mientras que la tierra, por los vapores que se desprenden en su superficie, deja escapar un exceso de electricidad contraria. Pero estos excesos de electricidad deben intervenir necesariamente en la distribución de la electricidad esparcida en la atmósfera, y pueden servir para explicar cómo las nubes están electrizadas, ya positiva, ya negativamente (770).

770. Electricidad de las nubes. -En general, las nubes están todas electrizadas, o positiva, o negativamente, no difiriendo entre sí más que en una tensión eléctrica mayor o menor. Fácilmente se explica la formación de las nubes positivas, pues los vapores que se desprenden del suelo y van a condensarse en las altas regiones de la atmósfera para constituir las nubes, se hallan a su vez electrizados positivamente. En cuanto a las nubes negativas, se admite que resultan de nieblas que, por su contacto con el suelo, se han cargado de fluido negativo que conservan en seguida al elevarse a la atmósfera; o bien que, separadas de la tierra por capas de aire cargadas de humedad, se han electrizado negativamente por la influencia de nubes positivas que han repelido al suelo la electricidad positiva.

Pero los experimentos citados (769) de M. Becquerel, bastan para dar la explicación de los dos estados eléctricos que pueden presentar las nubes.

771. Relámpago. -El *relámpago* es una luz deslumbradora proyectada por la chispa eléctrica que estalla de las nubes cargadas de electricidad. La luz de los relámpagos es blanca en las regiones bajas de la atmósfera; pero en las altas, en donde está más enrarecido el aire, adquiere una tinta violácea, como acontece en igual caso en la chispa de la máquina eléctrica (628).

Los relámpagos cuentan a veces muchas leguas de longitud. Su paso por el aire se opera siempre en zigzag, atribuyéndose este fenómeno a la resistencia que opone el aire comprimido a una gran descarga. La chispa se desvía entonces de la línea recta para aceptar la dirección en que es menor la resistencia. En efecto, en el vacío se efectúa en línea recta la trasmisión eléctrica.

Se pueden distinguir cuatro especies de relámpagos, a saber: 1.<sup>a</sup> Los relámpagos en zigzag, que se mueven con suma velocidad, en forma de una ráfaga de fuego de contornos perfectamente determinados, comparables completamente a la chispa de las máquinas eléctricas. 2.<sup>a</sup> Los relámpagos que, en vez de ser lineares, como los anteriores, abrazan todo el horizonte sin ofrecer ningún contorno aparente, cual lo haría el resplandor rápido de materias inflamables que entrasen en explosión. Estos relámpagos, que son los más frecuentes, se producen, al parecer, en el seno mismo de la nube e

iluminan su masa. 3.<sup>a</sup> Los relámpagos denominados *de calor*, porque brillan en las noches de verano, sin que en el horizonte se perciba nube alguna y sin que tampoco se note ruido. Numerosas hipótesis se han propuesto para explicar el origen de estos relámpagos; pero la más aceptable es la que asienta que no son más que relámpagos ordinarios que estallan en nubes situadas debajo del horizonte, a distancias tales, que el observador no puede oír el trueno. 4.<sup>a</sup> Los relámpagos que aparecen en forma de globos de fuego. Éstos, que son visibles a veces durante más de diez segundos, van de las nubes a la tierra con bastante lentitud para que el ojo pueda seguirles. Estos globos rebotan a menudo en la superficie del suelo, y otras veces se dividen y estallan con un ruido comparable a la detonación de muchos cañonazos. Se ha notado que bajo esta forma penetra, en general, en nuestras casas el rayo; pero se desconoce por completo el origen de estos relámpagos.

La duración del relámpago de las tres primeras especies no llega a un milésimo de segundo, conforme lo comprobó M. Wheatstone, por medio de una rueda que se hace girar con bastante velocidad para que sus radios sean invisibles; pero iluminándolos con la luz de un relámpago, la duración de éste es tan corta, que, sea cual fuere la velocidad de rotación de la rueda, aparece completamente inmóvil, es decir, que su traslación no se hace sensible durante el relámpago.

772. Ruido del trueno. -El *trueno* es la detonación violenta que sucede al relámpago en las nubes tempestuosas. El relámpago y la detonación son siempre simultáneos; pero se nota un intervalo de muchos segundos entre estos dos fenómenos, porque el sonido sólo recorre 337 metros por segundo (204), mientras que la luz no emplea más que un intervalo inapreciable para propagarse de la nube al ojo del observador (420). De consiguiente, éste no oye el ruido del trueno sino cinco o diez segundos, por ejemplo, después del relámpago, según diste de la nube tempestuosa cinco o diez veces 337 metros.

Origina el ruido del trueno la conmoción que excita en la nube y en el aire la descarga eléctrica, conmoción que hace sensible el experimento del termómetro de Kinnersley (631). Cerca del sitio en que surge el relámpago, el ruido del trueno es seco y de corta duración; pero a mayor distancia se oye una serie de ruidos que se suceden con rapidez, y a mayor distancia aún, el ruido, débil en un principio, se transforma en un redoble prolongado y de desigual intensidad. Se han asentado muchas hipótesis para explicar este retumbo del trueno, pero ninguna completamente satisfactoria. Unos lo han atribuido a la reflexión del sonido sobre la tierra y las nubes; otros han considerado el relámpago, no como una sola chispa eléctrica, sino como una serie de chispas elementales que dan origen cada una a una detonación particular. Partiendo estas detonaciones particulares de puntos diversamente lejanos y de zonas de desigual densidad, no sólo llegan al oído del observador sucesivamente, sino que también le allegan sonidos de distinta intensidad, originándose así la duración y la desigualdad del retumbo. Por último, se ha atribuido el fenómeno que nos ocupa, a los zigzags del relámpago, admitiendo que hay un máximo de compresión del aire en cada ángulo saliente, lo cual produciría la intensidad desigual del sonido.

773. Efectos del rayo. -El rayo es la descarga eléctrica entre una nube tempestuosa y el suelo. Éste, por la influencia de la electricidad de la nube, se carga de fluido contrario, y cuando el esfuerzo que hacen las dos electricidades para reunirse supera la resistencia del aire, estalla la chispa, lo cual se expresa diciendo que el rayo cae. Se admite, de

ordinario, que el relámpago se mueve de arriba hacia abajo; pero a menudo se observa una dirección opuesta, siendo probable que estalle al mismo tiempo de la nube y del suelo.

Según la primera ley de las atracciones eléctricas (594), el rayo debe caer sobre los objetos más cercanos a la nube y sobre los mejores conductores; y en efecto, se observa que los árboles, los edificios altos y los metales, son los que destruye particularmente el rayo: por ser así, es imprudente colocarse debajo de los árboles en tiempo de tempestad, sobre todo si son buenos conductores, como el roble y el olmo, si bien el peligro es menor respecto a los resinosos, tales como los pinos, porque conducen mal la electricidad.

Los efectos del rayo son muy variados y de la misma clase que los de las baterías (627), pero muchísimo más intensos. El rayo mata al hombre y a los animales, inflama las materias combustibles, y reduce a astillas los cuerpos poco conductores. Al penetrar en la tierra, funde las sustancias silíceas que encuentra, y así produce en la dirección de la descarga tubos vitrificados que se han denominado *tubos fulminarios* o *fulguritas*, que llegan a contar hasta diez metros de longitud. Por último, al caer sobre las barras de hierro las imanta, e invierte a menudo los polos de las brújulas.

El rayo difunde, en general, por su tránsito un olor que se ha comparado con el del azufre inflamado o con el de una materia fosfórica. Atribuyose primero este olor a un compuesto oxigenado que se formaba por la influencia de la descarga eléctrica, al cual dieron el nombre de *ozono*; pero M. Schoenbein, en 1840, luego después los señores Marignac y de La Rive, y por fin, Ed. Becquerel y Frémy, han demostrado que el ozono no es más que oxígeno electrizado.

774. Choque de retroceso. -El *choque de retroceso* es una conmoción violenta y hasta mortal, que sienten a veces los hombres y los animales, a distancia bastante considerable del punto en donde estalla el rayo. Este fenómeno reconoce por causa la acción por influencia que la nube tempestuosa ejerce sobre todos los cuerpos situados en su esfera de actividad. Estos cuerpos se encuentran entonces, lo mismo que la tierra, cargados de electricidad contraria a la de la nube, pero si ésta se descarga por la recomposición de su fluido con el del suelo, en el acto cesa la influencia, y recobrando bruscamente los cuerpos su estado neutro, se origina la sacudida que caracteriza al choque por retroceso. Se hace sensible este fenómeno colocando una rana cerca de una gran máquina eléctrica, pues a cada chispa que se saca de ésta, experimenta el animal una sacudida brusca.

775. Pararrayos. -Un *pararrayos* es una barra de hierro que sirve para facilitar el paso de la electricidad de la tierra, atraída por la electricidad contraria de las nubes tempestuosas. Franklin inventó estos aparatos en 1755.

Se distinguen en todo pararrayos dos partes, que son: la barra y el conductor. La *barra* que es de hierro y rectilínea, termina en punta y se clava verticalmente en los tejados de los edificios que se quieren preservar; cuenta de seis a nueve metros de altura, y su sección en la base es un cuadrado de cinco a seis centímetros de lado. El *conductor* es una varilla de hierro que desciende desde el pie de la barra hasta el suelo, en el cual penetra profundamente. Como las varillas de hierro no pueden seguir con facilidad, a causa de su rigidez, los contornos de los edificios, es preferible formar el conductor con

cuerdas de alambre, como las de los puentes colgantes. La Academia de Ciencias ha publicado recientemente un dictamen sobre los pararrayos, en el cual recomienda que se prefieran los alambres de cobre a los de hierro, en la fabricación de las cuerdas metálicas que han de servir de conductores, pues el cobre conduce la electricidad mejor que el hierro. Estas cuerdas deben poseer, dice el dictamen, un centímetro cuadrado de sección metálica, los alambres de 1 a 1,5 milímetros de diámetro, pudiendo reunirse en tres cordoncitos, como se efectúa comúnmente con las cuerdas. También aconseja que se termine la barra de los pararrayos en una punta de cobre y no de platino, atendida la mayor conductibilidad de aquél.

El conductor se dirige por lo común a un pozo, y para establecer mejor la comunicación con el suelo, se termina por dos o tres ramificaciones. Si no hay en las inmediaciones pozo alguno, se abre en el suelo un hoyo de cuatro a seis metros de profundidad, y después de haber introducido en él el pie del conductor, se acaba de rellenar el resto con cisco de retama, que es cuerpo buen conductor.

La teoría de los pararrayos se funda en la electrización por influencia y en la acción de las puntas (597). Franklin, que apenas hubo comprobado la identidad del rayo y de la electricidad, pensó en aplicar la acción de las puntas a los pararrayos, admitía que éstos se apoderaban del fluido de las nubes tempestuosas; pero precisamente sucede lo contrario. Cuando una nube tempestuosa electrizada positivamente, por ejemplo, se eleva en la atmósfera, obra por influencia sobre la tierra, repele a lo lejos el fluido positivo y atrae el negativo que se acumula en los cuerpos de la superficie del suelo, con tanta más abundancia, cuanto mayor es la altura a que se encuentran éstos. Los más altos son entonces los de mayor tensión, y de consiguiente, los más expuestos a la descarga eléctrica; pero si poseen puntas metálicas como las barras de los pararrayos, el fluido negativo, atraído de la tierra por la influencia de la nube, se va a la atmósfera y neutraliza el positivo de la nube. Por lo tanto, no sólo un pararrayos se opone a la acumulación de la electricidad en la superficie de la tierra, sino que también tiende a hacer recobrar a las nubes tempestuosas su estado natural, doble efecto que previene la caída del rayo. Sin embargo, es a veces tan abundante el desarrollo de electricidad, que no basta el pararrayos para descargar el suelo, y estalla el rayo; pero entonces el pararrayos recibe la descarga, por razón de su mayor conductibilidad, preservándose así el edificio.

La experiencia ha enseñado que una barra de pararrayos protege eficazmente a su alrededor un espacio circular de un radio doble de su altura. De consiguiente, un edificio de 64 metros de longitud, quedará preservado por dos barras de 8 metros, que disten entre sí 32.

Para que sea eficaz un pararrayos, debe poseer las siguientes condiciones: 1.<sup>a</sup> la barra ha de ser bastante gruesa para que no la funda el rayo si cae en ella; 2.<sup>a</sup> ha de terminar en punta, a fin de que preste más fácil salida a la electricidad que se desprende del suelo, y esta punta se hace de platino o de cobre dorado, para evitar la oxidación; 3.<sup>a</sup> el conductor no ha de ofrecer ninguna solución de continuidad desde la barra al suelo; 4.<sup>a</sup> la comunicación entre éste y aquélla ha de ser lo más íntima posible, y 5.<sup>a</sup> si el edificio cuenta con piezas metálicas de gran extensión, como una cubierta de zinc, canalones de metal, armaduras de hierro, etc., se hará que comuniquen con el conductor del pararrayos.

Si no se satisfacen las tres últimas condiciones, hay exposición de *descargas laterales*, esto es, de que la chispa eléctrica estalle entre el conductor y el edificio, en cuyo caso el pararrayos aumenta el peligro.

Para mayores detalles respecto a los pararrayos, puede consultarse la *Instrucción sobre los pararrayos*, publicada por Gay-Lussac en 1823, que acaba de imprimir la Academia de Ciencias, aumentándola con un suplemento que tiene en cuenta la gran cantidad de hierro que entra en las nuevas construcciones.

776. Arco iris. -El *arco iris* es un metéoro luminoso que aparece en las nubes opuestas al sol cuando se resuelven en lluvia. Consta de siete arcos concéntricos que presentan sucesivamente los colores del espectro solar, pero a veces no hay más que un solo arco, si bien lo regular es que se vean dos: uno interior, de colores muy vivos, y el otro exterior, más pálido y con el orden de los colores invertido.

En el interno, el rojo es el color más alto, y en el otro, el violado. Raras veces se observan tres arcos iris, por más que la teoría diga que pueden formarse mayor número, pues sus colores son tan débiles, que la vista no puede apreciarlos.

El fenómeno del arco iris procede de la descomposición de la luz blanca del sol en el momento en que penetra en las gotas de lluvia, y de su reflexión en su cara interna. Se observa, en efecto, en las gotas de rocío, en los chorros o surtidores de agua, y en una palabra, donde quiera que la luz solar penetre en gotas de agua según cierto ángulo.

La aparición del arco iris y su extensión dependen de la posición del observador y de la altura del sol sobre el horizonte, de donde debemos deducir que todos los rayos refractados por las gotas de lluvia y reflejados sobre su concavidad hacia el ojo del espectador no son propios para producir el fenómeno. Los que pueden originarlo se denominan *rayos eficaces*.

Para darse cuenta de esta eficacia, sea una gota de agua  $n$  ([fig. 589](#)), en la cual penetra un rayo solar  $Sa$ . En el punto de incidencia  $a$ , parte de la luz se refleja sobre la superficie del líquido, y la otra penetra en el mismo descomponiéndose, cruzando la gota en la dirección  $ab$ . Llegada a  $b$ , una porción de la luz emerge fuera de la gota de lluvia, y el resto se refleja en la superficie cóncava y va a salir por  $g$ ; mas en este punto la luz se refleja también parcialmente, la restante emerge en una dirección  $gO$ , que forma con el rayo incidente  $Sa$  un ángulo que se denomina *ángulo de desviación*. Los rayos, tales como  $gO$ , salidos por el lado del observador, son los que determinan en la retina la sensación de los colores, con la condición, sin embargo, de que la luz sea suficientemente intensa.

El cálculo nos demuestra que para una serie de rayos paralelos que caen sobre una misma gota, y que no sufren más que una reflexión en su interior, el ángulo de desviación aumenta sucesivamente desde el rayo  $S'n$ , respecto al que es nulo hasta cierto límite, más allá del cual decrece, y además que, cerca de este límite, los rayos que entran paralelamente a sí mismos en una gota de lluvia, salen de la misma conservando su paralelismo. Resulta de éste un haz de luz que posee bastante intensidad para impresionar la retina, siendo los rayos eficaces los que salen paralelos entre sí.

Como son desigualmente refrangibles los diversos colores que componen la luz blanca, no es idéntico para todos el máximo del ángulo de desviación. El cálculo nos patentiza que, para los rayos rojos, el valor de dicho ángulo correspondiente a los rayos eficaces es de  $42^{\circ} 2'$ , y para los violados de  $40^{\circ} 17'$ . Síguese de aquí que respecto a todas las gotas colocadas de modo que los rayos que van del sol a la gota formen, con los que van de ésta al ojo, un ángulo de  $42^{\circ} 2'$ , recibe la vista la sensación del color rojo; lo cual sucede evidentemente con todas las gotas situadas en la circunferencia de la base de un cono cuyo vértice coincide con el ojo del observador, cuyo eje sea paralelo a los rayos solares, y en el cual el ángulo formado por dos generatrices opuestas sea de  $84^{\circ} 4'$ . Tal es la formación de la faja foja del arco iris; con relación a la faja violada, el ángulo del cono es de  $80^{\circ} 34'$ . Los conos correspondientes a cada faja tienen el mismo eje, que se denomina *eje de visión*. Paralela esta recta a los rayos del sol, cuando se halla este astro en el horizonte, queda horizontal el eje de visión, y el arco iris aparece según la forma de una semi-circunferencia. Si asciende el sol, el eje de visión baja, y con él el arco iris. Por último, cuando el sol llega a la altura de  $42^{\circ} 2'$ , el arco desaparece por completo ocultado por el horizonte. Por eso el fenómeno del arco iris se presenta tan sólo por la mañana o por la tarde.

Todo lo expuesto se aplica al arco interior. El exterior se compone de rayos que han sufrido dos reflexiones, según lo demuestra el rayo *S'idfeO* en la gota *p*. El ángulo *S'IO*, formado por los rayos emergente e incidente, se denomina también ángulo de desviación; pero aquí no es susceptible de un máximo, sino de un mínimo que varía para cada especie de rayos, y al cual corresponden igualmente los eficaces. Se comprueba por el cálculo que, para los rayos violados, el ángulo mínimo es de  $54^{\circ} 7'$ , y para los rojos tan sólo de  $50^{\circ} 57'$ ; lo cual explica por qué el arco rojo es aquí interior y el violado exterior. Como a cada reflexión interior en la gota de lluvia hay pérdida de luz, el arco iris externo es siempre más pálido que el interno, dejando aquél de ser visible cuando el sol está a más de 54 grados sobre el horizonte.

La luna produce a veces arco iris, como el sol, pero son muy pálidos.

777. Aurora boreal. -Se denomina *aurora boreal*, o con mayor propiedad, *aurora polar*, un fenómeno luminoso sumamente notable que aparece con frecuencia en la atmósfera en los dos polos terrestres. Cuando se produce en el polo norte, se denomina *aurora boreal*, y *aurora austral* si surge en el otro polo. Las auroras boreales son, al parecer, más numerosas que las australes, si bien acaso dependa este echo de la mayor facilidad con que aquéllas pueden observarse. Vamos a copiar del *Tratado de Meteorología* de los señores Becquerel la siguiente descripción de una aurora boreal vista en Bossekop, en la Laponia noruega, a 70 grados de latitud, en el invierno de 1838 a 1839.

Por la tarde, entre las 4 y 8, la niebla que reina habitualmente en el norte de Bossekop, se colora en su parte superior. Este resplandor aumenta su regularidad y forma un arco vago, de un amarillo pálido, cuya concavidad mira hacia la tierra, y cuyo vértice se encuentra situado sensiblemente en el meridiano magnético.

En breve estrías negruzcas separan con regularidad las partes iluminadas del arco; y varios rayos luminosos se forman, se alargan y se acortan lenta o instantáneamente, aumentando y disminuyendo su brillo de una manera rápida. Los pies de estos rayos ofrecen siempre la luz más viva y constituyen un arco más o menos regular. Es muy varia longitud de los rayos; pero todos convergen hacia un mismo punto del cielo,

indicado por la prolongación de la extremidad sur de la aguja de inclinación; y a veces los rayos se prolongan hasta su punto de concurso, figurando así el fragmento de una cúpula luminosa.

El arco continúa ascendiendo hacia el cenit, presentando en su brillo un movimiento ondulatorio. A veces uno de sus pies, y aun los dos, abandonan el horizonte. Entonces los pliegues son más pronunciados y más numerosos; el arco en este caso no es más que una larga faja de rayos, que se contornea y se separa en muchas partes, formando graciosas curvas que se doblan sobre sí mismas y que ofrecen la llamada *corona boreal*. Como el brillo de los rayos varía súbitamente de intensidad, alcanza el de las estrellas de primer orden, los rayos se lanzan con rapidez, y las curvas se forman y se desarrollan como los pliegues y repliegues de una serpiente ([fig. 590](#)). Luego se coloran los rayos, poniéndose roja la base, verde el centro, y conservando su tinte amarillo el resto. Finalmente, el brillo disminuye, los colores desaparecen, y todo se debilita poco a poco o se apaga de improviso.

La comisión científica del Norte ha observado, en 200 días, 150 auroras boreales; al parecer son completamente excepcionales en los polos las noches sin aurora boreal, de suerte que puede admitirse que todas las noches las hay, si bien de intensidad muy variable. Las auroras boreales son visibles a distancias considerables del polo y en una extensión inmensa, puesto que a veces una misma se ha observado al propio tiempo en Moscou, en Varsovia, en Roma y en Cádiz.

Se han emitido muchas hipótesis sobre la causa de las auroras boreales. La dirección constante de sus arcos con relación al meridiano magnético, y las perturbaciones que ejercen en las brújulas (569), revelan que hay que atribuir las a corrientes eléctricas que se desprenden de los polos hacia las altas regiones de la atmósfera. Esta hipótesis se ha confirmado por un hecho que ha sido patente el día 29 de agosto y el 1.º de setiembre de 1859 en Francia y en casi toda Europa, durante los cuales dos brillantes auroras boreales, han actuado enérgicamente sobre los alambres telegráficos: los timbres o campanillas han funcionado por mucho tiempo y los despachos se han interrumpido frecuentemente por la acción espontánea y anormal de los aparatos.

Según M. de La Rive, la aurora boreal depende de descargas eléctricas en las regiones polares, entre la electricidad positiva de la atmósfera y la negativa del globo; electricidades separadas a su vez por la acción directa o indirecta del sol, principalmente en las regiones ecuatoriales.

## Climatología

778. Temperaturas medias. -Se denomina *temperatura media*, o simplemente *temperatura* de un día, la que se obtiene haciendo la suma de 24 observaciones termométricas tomadas sucesivamente de hora en hora, y dividiéndola por 24. La experiencia ha demostrado que se obtiene muy aproximadamente esta temperatura, tomando la media entre las temperaturas máxima y mínima del día y de la noche, las cuales se determinan por medio de los termómetros de máxima y de mínima. Deben encontrarse estos instrumentos fuera del alcance de los rayos solares, elevados sobre el suelo y apartados de todo cuerpo que pueda influir en ellos con su radiación.

La temperatura de un mes es la media de la de los 30 días, y la del año la media de la de los 12 meses. Por último, la temperatura de un lugar es la media de su temperatura anual durante muchos años. La temperatura de París es de 10° 8. En todos los casos, estas temperaturas son las del aire y no las del suelo (400).

Según los datos publicados por el Real Observatorio astronómico de Madrid, que se refieren al año meteorológico, que comprende desde el 1.º de diciembre de 1859 al 30º de noviembre de 1860, las temperaturas medias mensuales son las siguientes:

Temperatura media de diciembre.	4°,4	Temperatura media de junio.	20°,8
-- de enero.	6°,9	-- de julio.	24°,6
-- de febrero.	3°,3	-- de agosto.	23°,9
-- de marzo.	9°,7	-- de setiembre.	16°,0
-- de abril.	10°,7	-- de octubre.	15°,7
-- de mayo.	18°,8	-- de noviembre.	9°,9

La temperatura máxima de julio llegó a la sombra a 40,8, y la mínima, en el mes de febrero, a -9,6. La temperatura media del año fue de 13°,7.

779. Causas que modifican la temperatura del aire. -Las causas que hacen variar la temperatura del aire son principalmente la latitud, la altura, la dirección de los vientos y la proximidad de los mares.

1.<sup>a</sup> *Influencia de la latitud.* -La influencia de la latitud resulta de la mayor o menor oblicuidad de los rayos solares, porque siendo tanto más considerable la cantidad de calor absorbida, cuanto más se acercan los rayos a la incidencia normal (373), es claro que el calor que absorbe el suelo decrece del ecuador a los polos, pues los rayos son cada vez más y más oblicuos relativamente al horizonte. Con todo, esta pérdida se halla compensada en parte, durante el verano, en las zonas templadas y en las glaciales, por la longitud de los días. En el ecuador, en donde es constante dicha longitud, es casi invariable la temperatura; en la latitud de París, y aun en las regiones más septentrionales, en que los días son muy desiguales, la temperatura varía mucho; pero, en verano, sube a veces casi tanto como en el ecuador. Por lo demás, el descenso de temperatura que resulta de la latitud es lento; y así, en Francia, por ejemplo, es preciso avanzar hacia el norte 185 kilómetros para encontrar un enfriamiento de un grado en la temperatura media del aire.

2.<sup>a</sup> *Influencia de la altura.* -La elevación sobre el nivel de los mares comunica a la temperatura de la atmósfera un decrecimiento mucho más rápido que el que resulta de la latitud. En efecto, en una ascensión al Mont-Blanc, observó Saussure un descenso de temperatura de 1 grado por una altura de 144 metros, y M. de Humboldt, en el Chimborazo, encontró 1 grado respecto a una altura de 218 metros; pero tomando la media entre estos dos números, se obtiene un enfriamiento de 1 grado por una altura de 181 metros, de modo que el descenso de temperatura viene a ser mil veces más rápido relativamente a la altura que respecto a la latitud.

El enfriamiento del aire, a medida que se sube en las altas regiones de la atmósfera, se comprueba en las ascensiones aerostáticas; y además, lo revelan también las nieves perpetuas que cubren las cúspides de las altas montañas. Sus causas son el gran enrarecimiento del aire, el cual disminuye necesariamente su poder absorbente, la distancia del suelo que no puede calentar al aire por su contacto, y por último el gran poder diatérmico de los gases.

No se conoce la ley del descenso de la temperatura, a medida que se sube en la atmósfera, a causa de las numerosas causas perturbadoras que tienden a modificarla, como son los vientos reinantes, el grado de humedad, la hora del día, etc. La experiencia enseña que la diferencia de temperatura de dos lugares desigualmente elevados no es proporcional a la diferencia de nivel; mas para alturas poco considerables puede admitirse de un modo aproximado esta ley. Se evalúa por termino medio el descenso de la temperatura del aire en 1 grado por 187 metros de elevación en la zona tórrida, y en 1 grado por 150 en la

templada; pero estos números se hallan sujetos a muchas variaciones que guardan relación con las circunstancias locales.

3.<sup>a</sup> *Influencia de la dirección de los vientos.* -Participando necesariamente los vientos de la temperatura de las regiones que han atravesado, su dirección, para un mismo lugar, influye mucho en la temperatura del aire. En París, el viento más cálido es el del sur, siguiendo luego el sudeste, el sudoeste, el oeste, el este, el noroeste, el norte, y por último, el nordeste, que es el más frío. Por lo demás, el carácter de los vientos cambia con las estaciones, y así el viento del este, por ejemplo, que es frío en invierno, es cálido en verano.

4.<sup>a</sup> *Influencia de la proximidad de los mares.* -La proximidad de los mares tiende a hacer subir la temperatura del aire y a aumentar su uniformidad. En efecto, se observa que, en los trópicos y en las regiones polares sobre todo, es siempre más alta la temperatura de los mares que la de la atmósfera. En cuanto a la uniformidad de temperatura de los mares, demuestra la experiencia que en las regiones templadas, es decir, de 25 a 50 grados de latitud, la diferencia entre el máximo y el mínimo de un día no pasa, en el mar, de 2 a 3 grados, mientras que en los continentes llega a 12 o 15 grados. En las islas es muy sensible la uniformidad de temperatura, aun durante los calores más rigurosos. Penetrando en los continentes, los inviernos, en igualdad de latitud, se vuelven más fríos, y crece la diferencia entre las temperaturas de los inviernos y de los veranos.

780. Líneas isotermas. -Cuando se unen entre sí, en un mapa, todos los puntos que cuentan la misma temperatura media, se obtienen curvas que M. de Humboldt dio a conocer designándolas con el nombre de *líneas isotermas*. Si la temperatura de un lugar no variase sino con la oblicuidad de los rayos solares, es decir, con la latitud, las líneas isotermas serían todas paralelas al ecuador; pero, como varía por muchas causas locales, y sobre todo por la altura, dichas líneas son siempre más o menos sinuosas. Sin embargo, en los mares se alejan poco del paralelismo. Existen también *líneas isóteras* (de igual verano), y *líneas isoquímenas* (de igual invierno). Por último, se entiende por *zona isoterma* el espacio comprendido entre dos líneas isotermas.

781. Climas. -Se da el nombre de *climas* a cierto número de zonas isotermas caracterizadas por sus temperaturas media anual, estivales e invernales, y por los límites en que todas ellas están incluidas. Se distinguen siete climas clasificados por sus temperaturas medias, a saber: -1.<sup>o</sup> *clima tórrido o ardiente*, de 27°,5 a 25 grados; -2.<sup>o</sup> *cálido*, de 25 a 20 grados; -3.<sup>o</sup> *suave*, de 20 a 15 grados; -4.<sup>o</sup> *templado*, de 15 a 10 grados; -5.<sup>o</sup> *frío*, de 10 a 5 grados; 6.<sup>o</sup> *muy frío*, de 5 grados a cero; 7.<sup>o</sup> *glacial*, bajo cero.

Estos climas se dividen a su vez en *climas constantes*, cuya diferencia de temperatura entre el invierno y el verano no pasa de 6 u 8 grados; en *variables*, cuya diferencia está entre 16 y 20 grados; y en *excesivos*, en los que la diferencia a la cual nos contraemos excede de 30 grados. Los climas de París y de Londres son variables; y los de Pekín y de Nueva-York excesivos. Los climas de las islas son en general poco variables, por ser casi constante la temperatura del mar; y de aquí la división de los climas en *marinos* y *continentales*. El carácter de los primeros es que la diferencia de temperatura entre el verano y el invierno es siempre mucho menor que en los segundos. Últimamente, la temperatura más o menos elevada no es el único carácter que determina los climas; también concurren a este resultado la mayor o menor humedad del aire, la cantidad y frecuencia de las lluvias, el número de tempestades, la dirección e intensidad de los vientos, y por último, la naturaleza del terreno. Todas estas causas reunidas hacen que el estudio de los climas, o la *climatología*, sea todavía una ciencia poco conocida.

782. Distribución de la temperatura en la superficie del globo. -La temperatura del aire en la superficie del globo va decreciendo del ecuador a los polos; pero se halla expuesta a tantas causas perturbadoras y tan locales, que su decrecimiento al parecer no se halla sometido a ninguna ley general. Hoy por hoy sólo es dable comprobar, por medio de numerosas observaciones, la temperatura media, la máxima y la mínima de cada lugar. El cuadro siguiente ofrece un resumen de la distribución del calor en el hemisferio septentrional.

*Temperaturas medias a diversas latitudes.*

Abysinia.	31°,0	París.	10°,8
Calcuta.	28°,5	Londres.	10°,4

Jamaica.	26°,1	Bruselas.	10°,2
Senegal (San Luis).	24°,6	Estrasburgo.	9°,8
Río-Janeiro.	23°,1	Ginebra.	9°,7
El Cairo.	22°,4	Boston.	9°,3
Constantina.	17°,2	Estokolmo.	5°,6
Nápoles.	16°,7	Moscou.	3°,6
Méjico.	16°,6	San Petersburgo.	3°,5
Marsella.	14°,1	Monte Saint-Gothard.	-1°,0
Constantinopla.	13°,7	Mar de Groenlandia.	-7°,7
Pekín.	12°,7	Isla Mellville.	-18°,7

Las temperaturas anteriores son las medias. La temperatura más alta observada en la superficie del globo fue de 47°,4 en Esné, en Egipto, y la más baja, de -56°,7 en Fort-Reliance, en el norte de la América, lo cual da una diferencia de 104°,1 entre las más altas y las más bajas temperaturas observadas en los diferentes puntos del globo.

La temperatura más alta observada en París fue de 38°,4, el 8 de julio de 1793, y la más baja de -23°,5, el 26 de diciembre de 1798.

Como no han llegado los navegantes hasta los polos de la tierra, a causa de los hielos, no se conoce la temperatura de aquellos puntos. Se ha admitido *a priori* en nuestro hemisferio la existencia de un solo *polo glacial*, es decir, de un solo punto ofreciendo un máximum de frío. Pero las inflexiones que presentan las líneas isotermas en el hemisferio boreal, han evidenciado que en este hemisferio existen dos polos de frío, el uno en Asia, al norte del golfo Taymour, y el otro en América, al norte del estrecho Barrow ambos aproximadamente a 15 grados del polo boreal de la tierra. Se ha evaluado la temperatura media del primero de estos polos en -17 grados, y la del segundo en -19. En cuento al hemisferio austral no se poseen bastantes observaciones para saber si se encuentran allí uno o dos polos de frío, ni para determinar la posición.

783. Temperatura de los lagos, de los mares y de los manantiales. -La temperatura del mar entre los trópicos es generalmente casi la del aire, y en las regiones polares siempre es algo más alta que la de la atmósfera.

La temperatura del mar, en la zona tórrida, es constantemente de 26 a 27 grados en la superficie; disminuye cuando aumenta la profundidad, y en las regiones templadas y tropicales se mantiene a grandes profundidades entre 2°,5 y 3°,5. Se explica la baja temperatura de las capas inferiores por el efecto de corrientes submarinas que trasportan hacia el Ecuador el agua fría de los mares polares.

La temperatura de los lagos presenta variaciones mucho mayores que la de los mares; pues su superficie, que puede congelarse durante el invierno, se calienta en verano hasta 20 o 25 grados. El fondo, por el contrario, conserva sensiblemente una temperatura de 4 grados, que es la del máximum de densidad del agua (279).

Los manantiales, que proceden de las aguas pluviales infiltradas en la corteza del globo, a profundidades más o menos considerables, tienden necesariamente a ponerse en equilibrio de temperatura con las capas terrestres que atraviesan (400). Por lo tanto, cuando llegan a la superficie del suelo, su temperatura procede de la profundidad a que han llegado, y si ésta es la de la capa invariable, la temperatura de los manantiales es de 11 a 12 grados en nuestro país, donde tal es el calor de dicha capa, y al mismo tiempo la media anual. Con todo, si el manantial es poco copioso, su temperatura sube en verano y se enfría en invierno por la de las capas que atraviesa para llegar de la invariable a la superficie del suelo. Pero si los manantiales proceden de una profundidad mayor que la de la capa invariable, su temperatura puede ser mucho más elevada que la media del lugar, y toman entonces el nombre de *aguad termales*. He aquí la temperatura de algunas aguas termales.

En Francia:	Vichy.	40°
-	Mont Dore.	44°
-	Bourbonne.	50°
-	Dax (Landes).	60°
-	Chaudes-Aigues.	88°
En América:	Trincheras, cerca de Puerto-Cabello.	97°
En Islandia:	El Gran-Geyser, a 20 metros de profundidad.	124°
En España:	Alhama (Granada).	40°
-	Archena (Murcia).	52°
-	Caldas de Cunti (Pontevedra).	54°
-	Esparraguera: la Puda (Barcelona).	29°
-	Panticosa.	29°
-	Caldas de Mombuy (Barcelona).	70°

Las aguas termales adquieren, por su alta temperatura, la propiedad de disolver muchas sustancias minerales que encuentran a su paso, y se designan entonces con el nombre de *aguas minerales*. Las sustancias disueltas suelen ser, las más de las veces, los ácidos carbónico, sulfhídrico, sulfúrico, o sulfuros, hiposulfitos, sulfatos, carbonatos, cloruros ioduros.

La abundancia de lluvias o la sequía no modifica, en general, la temperatura de las aguas termales; pero sí lo efectúan los terremotos, pues se ha visto en ciertos casos que, a consecuencia de éstos, se elevaba unas veces, y otras descendía.

784. Distribución de las aguas en la superficie del globo. -La distribución de las aguas en la superficie del globo ejerce una gran influencia sobre los climas. Las aguas ofrecen una superficie mucho mayor que la de los continentes, y su distribución es muy desigual en los dos hemisferios. En efecto, valiendo la superficie del globo 5 100 000 miriámetros cuadrados, se ve que la de los mares y lagos es de 3 700 000, y la de los continentes e islas de 1 400 000; es decir, que la superficie de las aguas es casi tres veces mayor que la de las tierras. En el hemisferio austral, la superficie de los mares es mayor que en el boreal, en la razón de 13 a 9.

La profundidad de los mares es muy variable. La sonda llega al fondo, en general, a 300 o 400 metros; pero en alta mar desciende frecuentemente a 1200, y a veces no lo alcanza hasta 4000.

Según estos números, la masa total de las aguas en la superficie del globo no excede de una capa líquida de 1000 metros de altura capaz de cubrir toda la tierra.

FIN

▽△

## Apéndice

▽△

### Primera parte

Problemas de física, con solución, dados como temas de composición en la facultad de ciencias de París, desde 1853 a 1860

## Problemas sobre los pesos específicos

### I

En una vasija cilíndrica, cuyo diámetro interior vale  $0^m,1$ , y que se ahoya por su base sobre un plano horizontal, se vierten 12 kilogramos de mercurio, ¿a qué altura subirá el mercurio en el cilindro, siendo la densidad de aquél 13,596?

Si se representa por  $R$  el radio interior de la vasija, su fondo interno lo estará por  $p rR^2$ , y como, según el enunciado  $R=5$  centímetros, y  $p=3,141592\dots$ , el fondo de la vasija vale  $3,141592 \times 25 = 78 \text{cent.cuad.},54$ .

Por consiguiente, representando por  $A$  la altura a que llega el mercurio en la vasija, el volumen de este líquido es  $78 \text{cent.cuad.},54 \times A$ . Pero, según a fórmula  $P=VD$ <sup>(11)</sup>, se tiene también  $V=P/D=12000 \text{gr}/13,596=882 \text{cent.cúb.},612$ ; de modo que resulta  $78,54 \times A=882,612$ , de donde  $A=11 \text{c.},24$ .

### II.

Un rodillo cilíndrico de madera de roble tiene  $0^m,3$  de diámetro,  $2^m,5$  de longitud, y es de 1,17 su peso específico; desea conocerse el volumen y el peso del rodillo.

Sean  $R$  el radio del rodillo,  $L$  su longitud y  $V$  su volumen. En este caso tendremos

$$V=p rR^2 A=3,141592 \times 2 \text{dec.cuad.},25 \times 25 \text{d}=176 \text{dec.cúb.},71;$$

y representado por  $P$  su peso, tendremos, según la fórmula  $P=VD$ ,

$$P=176 \text{dec.cúb.},71 \times 1 \text{k},17=206 \text{k},76.$$

### III.

Una copa de forma cónica que cuenta interiormente  $0^m,06$  de diámetro en el borde, se ha llenado por completo de mercurio, de agua y de aceite, en proporción tal que la capa formada por cada uno de estos líquidos, tiene  $0^m,05$  de espesor. Se sabe que la densidad del mercurio es de 13,596, la del aceite 0,915 y la del agua 1. Calcúlese el peso del mercurio, del agua y del aceite, despreciando la influencia de la temperatura en la densidad de estos líquidos.

Según el enunciado, se tiene  $om=3c$  (fig. 591), y  $ok=ki=ia=5$ . Además, los triángulos  $oma$ ,  $kna$  e  $ipa$  son semejantes, y por lo mismo

$$ip=1/3om=1, \text{ y } kn=2/3om=2.$$

Ahora bien, encontrándose el mercurio en la parte inferior, y luego agua y el aceite (89), el volumen del cono  $abp$  ocupado por el mercurio, será igual a

$$\frac{1}{3} p^2 \times ai/3=5 \text{c.cúb.},236.$$

Los volúmenes del agua y del aceite son troncos de conos que se miden por medio de la fórmula ya conocida  $p(R^2+r^2+Rr) \times A/3$ , en la cual  $R$  y  $r$  son los radios de las bases del tronco, y  $A$  su altura. De consiguiente, el volumen de agua

$$bcnp=3,141592 \times 5/3 (4+1+2)=36 \text{c.cúb.},652.$$

$$\text{y el volumen de aceite } cdmn=3,14159 \times (9+4+6)=99 \text{c. cúb.},484.$$

Conocidos estos volúmenes, se tendrán los pesos pedidos por la fórmula  $P=VD$ , multiplicando cada volumen por la densidad correspondiente: resulta, pues, como peso del mercurio  $5,236 \times 13,596 = 71\text{gr},188$ ; el del agua  $36,652 \times 1 = 36\text{gr},652$ , y el del aceite  $99,484 \times 0,915 = 91\text{gr},027$ .

#### IV.

Un paralelepípedo de hielo cuyas dimensiones son 10m,50, 15m,75 y 20m,45, se introduce en el agua de mar. Siendo la densidad del hielo 0,930, y la del agua de mar 1,026, se desea conocer la altura del paralelepípedo sobre la superficie del mar.

Supongamos el paralelepípedo dispuesto según se ve en la [fig. 592](#), y sean sus tres aristas AD, AC y AD respectivamente iguales a 20m,45, 15m,75 y 10m,50. Como el volumen de un paralelepípedo es igual al producto de sus tres dimensiones, si se representa por V el volumen de toda la masa de hielo, se tendrá, en decímetros cúbicos,  $V=AB \times AC \times AD$ , y su peso será  $P=AB \times AC \times AD \times 0,930$ .

Si representamos igualmente por V' el volumen del hielo inmerso, y por P' el peso del agua del mar desalojada, tendremos:

$$V' = AB \times AC \times DE, \text{ y } P' = AB \times AC \times DE \times 1,026.$$

Pero según las condiciones de equilibrio de los cuerpos flotantes (98), el peso del agua desalojada es igual al peso de todo el cuerpo flotante, y por lo tanto tendremos  $P=P'$ , o suprimiendo los factores comunes,  $AD \times 0,930 = DE \times 1,026$ ;

de donde se deduce  $DE = AD \times 0,930 / 1,026 = 105d \times 0,930 / 1,026 = 95\text{dec.},17$ .

Por lo tanto, la altura del agua es  $105 - 95,17 = 9\text{dec.},83$ .

#### V.

La altura interior de un cilindro hueco es de 369 milímetros, y su diámetro de 246, se desea conocer el peso del alcohol que contendrá, siendo 0,863 la densidad de este líquido.

La fórmula  $P=VD$  da  $P=p R^2 AD = 15\text{kil.},136\text{gr},5$ .

#### VI.

Se fabrican con oro, cuya densidad es 19,362, hojas que tienen un diezmilésimo de milímetro de espesor. ¿Qué superficie se podrá cubrir con 10 gramos de oro?

Llamando  $x$  a la superficie pedida, en centímetros cuadrados, se tiene  $x \times 0,00001 \times 19,362 = 10\text{gr.}$ , de donde se deduce,  $x = 5\text{m. cuad.}, 16\text{d. cuad.}, 47\text{c. cuad.}$

#### VII.

Dado un cilindro de hierro cuyo peso es de 21 kilogramos y su altura es de 2m,50, siendo la densidad del hierro de 7,778, se quiere determinar el diámetro del cilindro.

Representando por R el radio del cilindro, su volumen es  $p R^2 A$ , y como su peso es P, resulta  $p R^2 AD = P$ , de donde  $R = \sqrt{P/p AD}$ ; reemplazando las letras por sus valores, se obtiene

$$R = \sqrt{21/611,6695} = \sqrt{0,0343} = 0\text{d},18.$$

#### VIII.

Dos vasijas de formas cónicas y del mismo peso cuentan interiormente 0m,25 de altura, y 0m,12 de diámetro en su borde superior. La una está llena de ácido sulfúrico cuya densidad es 1,84, y la otra de éter, que reconoce por peso específico 0,71. Con estos datos determínese la diferencia de los pesos de las dos vasijas cuando están llenas.

Tenemos  $V = \frac{1}{3} \pi R^2 A = 3,1416 \times 36 \times 25 \text{c.} = 942 \text{cent.cúb.}, 48.$

Para el ácido sulfúrico se tiene  $P = 942,48 \times 1,84.$

Para el éter..... $P' = 942,48 \times 0,71,$

por lo tanto será la diferencia  $(P - P') = (1,84 - 0,71) 942,48 = 1 \text{kil.}, 065 \text{gr.}$

#### IX.

Dada una esfera hueca de cobre, de 0m,18 de radio, y que contiene una esfera de platino de 0m,05 de radio, de tal suerte que no exista ningún vacío entre las dos esferas, se pide el peso de la masa así formada, sabiendo que la densidad del platino es de 21,50, y la del cobre, 8,85.

Volumen del platino  $= \frac{4}{3} \pi r^3$ , volumen del cobre  $= \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3)$ ; peso del platino  $= 21,50 \times \frac{4}{3} \pi r^3$ , peso del cobre  $= 8,85 \times \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3)$ . Suma de los pesos  $= \frac{4}{3} \pi (21,50 r^3 + 8,85 R^3 - 8,85 r^3) = 4,1888 (12,65 \times 5^3 + 8,85 \times 18^3) = 222 \text{kil.}, 820 \text{gr.}, 91.$

#### X.

La gran pirámide de Egipto es de base cuadrada; el lado de la base es de 234m,8, y la altura era primitivamente de 146m,18 sobre el nivel del suelo; determínese el peso de esta pirámide, admitiendo que sea maciza, y que la piedra de que consta reconozca 2,75 por densidad.

Se tiene:

$$V = (234 \text{m.}, 8)^2 \times 146 \text{m.}, 18 / 3;$$

$$\text{y } P = (234 \text{m.}, 8)^2 \times 146,18 / 3 \times 2,75 \times 1000 \text{kil.} = 7 \ 387 \ 407 \ 475 \text{kil.}$$

#### XI.

Determínese el precio de un tubo de conducción, de hierro fundido, que tenga 0m,245 de diámetro interior, 0m,014 de grueso, y 2134m. de longitud. La densidad del hierro fundido es 7,207, y su precio 0fr,20 el kilogramo.

$$V = \pi A (R^2 - r^2) = 3,1416 \times 2134 \text{m} \times 0 \text{m.cuad.}, 003626 = 24 \text{m.cúb.}, 309 \text{dec.cúb.}, 336 \text{c.cúb.};$$

$$\text{peso} = 24 \text{m.cúb.}, 309336 \times 7,207 \times 1000 = 175197 \text{kil.}, 385 \text{gr.}; \text{ precio} = 35039 \text{fr.}, 48.$$

#### XII.

Un alambre cilíndrico de plata, de 0m,0015 de diámetro, pesa 3gr,2875: se desea cubrirlo con una capa de oro de 0m,0004 de espesor. Con estos datos determínese el peso del oro que se gastará, sabiendo que la densidad de la plata es 10,47, y la del oro 19,26.

Sean  $r$  el radio del cilindro de plata, y  $R$  el radio del mismo cilindro cubierto de oro. Tenemos

$$r = 0 \text{c.}, 075, R = 0 \text{c.}, 095, \text{ y } r^2 = 0 \text{cent.cúb.}, 005623, R^2 = 0 \text{cent.cúb.}, 009025.$$

$$\text{Volumen del cilindro de plata} = \pi r^2 A = 0,0176715 A.$$

$$\text{Peso del mismo} = 0,0176715 \times 10,47 \times A = 3 \text{gr.}, 2875; \text{ de donde } A = 17 \text{c.}, 768.$$



de donde se deduce que el peso del oro es  $40\text{cent.cúb.}, 5515 \times 19,26 = 780\text{gr.}, 059$ .

#### XVII.

Determinar los volúmenes de dos líquidos a cuyos pesos específicos son 1,3 y 0,7, sabiendo que si se mezclan, el volumen es igual a 3 litros, y la densidad a 0,9.

Sean  $v$  y  $v'$ , los dos volúmenes pedidos: en primer lugar,  $v+v'=3\text{lit.}$  [1], y por la fórmula  $P=VD$ , siendo el peso de cada líquido  $v \times 1,3$  y  $v' \times 0,7$ , se tiene  $1,3v + 0,7v' = 0,9 \times 3$  [2]. Resolviendo las ecuaciones [1] y [2], sale  $v=1$ ,  $v'=2$ .

#### XVIII.

Una lámina triangular de cobre, de  $0\text{m.}, 005$  de espesor y de  $1\text{m.}, 25$  de lado, está cubierta de una capa de plata de  $0\text{m.}, 00015$  de grueso. La densidad del cobre es 8,95, y la de la plata 10,47. Se pide el peso de la lámina así plateada.

Llamando  $S$  la superficie del triángulo,  $a$  su lado y  $V$  el volumen de la lámina, se tiene

$$\begin{aligned} S &= a^2/4 \sqrt{3} = (1\text{m.}, 25)^2 \times 1,7321 = 676\text{dec.}, 60\text{cent.}, 156; \\ V &= 676\text{dec.}, 60156 \times 0,05 = 33\text{dec.}, 830\text{cent.}, 078; \\ \text{Peso del cobre} &= 33,830078 \times 8,95 = 302\text{kil.}, 779\text{gr.}, 198; \\ \text{Volumen de la plata} &= 2 \times 676\text{dec.}, 60156 \times 0,0015 = 2\text{dec.}, 02980468; \\ \text{Peso de la plata} &= 2,02980468 \times 10,47 = 21\text{kil.}, 252\text{gr.}, 045; \\ \text{Peso total} &= 302\text{kil.}, 779\text{gr.}, 198 + 21\text{kil.}, 252\text{gr.}, 045 = 324\text{kil.}, 031\text{gr.}, 243. \end{aligned}$$

#### XIX.

Las nuevas décimas pesan 10gr., y están compuestas de una aleación de 0,95 de cobre, 0,04 de estaño, y 0,01 de zinc; la densidad del cobre es 8,85, la del estaño 7,29, y la del zinc 7,12: se pregunta cuántas de estas piezas serían necesarias para proporcionar el metal necesario a la fabricación de una esfera de igual aleación, de  $0\text{m.}, 25$  de diámetro a cero grados.

El volumen  $v$  de una pieza de 10 céntimos, es, según el enunciado y según la fórmula

$$V = P/D, v = 9,5/8,85 + 0,4/7,29 + 0,1/7,12 = 17491735/15311916.$$

Pero siendo el volumen de la esfera  $4\pi R^3/3$ , el número de piezas es 3

$$4\pi R^3/3: v = 4 \times 3,1416 \times 12\text{c.}, 5/3 \times 15311916/17491735 = 7161,7.$$

#### XX.

Una copa de forma cónica tiene la cavidad de un litro; en su borde superior cuenta de diámetro  $0\text{m.}, 25$ , está llena de agua y mercurio, siendo iguales las cantidades en peso de ambos líquidos, y la densidad del mercurio 13,598, se pregunta cuál será la altura de la capa formada por el agua.

Sea  $V$  el volumen total del cono,  $A$  su altura,  $R$  el radio de su base,  $v$  el volumen del agua,  $v'$  el del mercurio, y  $d$  la densidad de éste; se tiene

$$V = 1/3\pi R^2 A \quad [1], \quad v + v' = 1 \quad [2], \quad \text{y} \quad v = v' d \quad [3].$$

Haciendo en la ecuación [1]  $V=1$  y  $R=0,125$ , se obtiene  $A=0,06111$ ; y las ecuaciones [2] y [3] dan  $v'=0\text{lit.}, 068502$ , y  $v=0\text{lit.}, 931498$ .

Pero siendo semejantes los volúmenes  $V$  y  $v$ , resulta que son entre sí como los cubos de sus alturas, es decir, que  $V/v = A^3/a^3$ , de donde

$$a' = A^3 \sqrt[3]{v'} = 6c,111 \sqrt[3]{0,068512} = 2c,4994, \text{ y } a = A - a' = 3c,6116.$$

XXI.

Una de las ramas de un sifón está llena de mercurio hasta una altura de 0m,175, la otra lo está de otro líquido hasta la altura de 0m,42; ambas columnas se hacen equilibrio; se pide la densidad del otro líquido, con relación al mercurio y al agua.

Representando por  $d$  la densidad con relación al mercurio, y por  $d'$  la densidad relativamente al agua, se tiene  $1 \times 0,175 = 0,42 \times d$ , y  $13,6 \times 0,175 = 0,42 \times d'$ ; de donde  $d = 0,416$  y  $d' = 5,666$ .

XXII.

Para explotar una mina de sal gema, se ha abierto en un terreno salífero un agujero de sonda, en el cual se ha introducido un tubo de 100 metros de largo, el cual, no llenando exactamente el conducto, sobresale 1 metro del suelo; se introduce 0m,75 en una disolución salina, cuya densidad es 1,3, y se echa agua dulce en el intervalo que separa el tubo de las paredes del agujero practicado por la sonda. Pregúntase a qué altura subirá en el tubo la disolución.

Representemos el orificio de sonda por AB (fig. 593), por  $aO$  el tubo, y por  $mn$  el nivel de la disolución salina. Según el enunciado, CO, que es la porción sumergida del tubo, es igual a 0m,75, y la  $ab$ , fuera del agua, a 1 metro. De consiguiente, la porción  $aC$  tiene una longitud de 98m,25.

Ahora bien; admitamos que no se mezclen el agua dulce y la salada, y que la disolución salina, en el fondo del agujero de sonda, conserve siempre el nivel  $mn$ . Los dos compartimientos  $iB$  y  $aC$  forman dos vasos comunicantes, y se sabe que en éstos las alturas de las columnas líquidas están en razón inversa de sus densidades (90). Como es 1 la densidad del agua dulce contenida en la parte  $iB$ , y  $b$  la altura de la disolución salina en el tubo, se tendrá

$$\begin{aligned} 1/1,3 &= b/aC, \text{ pero } aC = 98m,25 \\ \text{luego } b &= 98,25/1,3 = 75m,58. \end{aligned}$$

XXIII.

Se tiene un vaso cilíndrico cuyo diámetro interior es 0m,25, en el cual se vierten 30 kilogramos de mercurio, cuya densidad es 13,6, y 2 kilogramos de alcohol, cuya densidad es 0,79, y se pregunta a qué altura del vaso se elevarán estos dos líquidos.

Llamemos  $R$  al radio interior del cilindro,  $x$  la altura  $e$  y  $y$  a la del mercurio.

Según la fórmula ya conocida  $P = VD$ , se tiene para el volumen del alcohol,  $P/D = 2/0,79$ , y para la del mercurio,  $P/D = 30/13,6$ ; pero ambos volúmenes están también representados por  $pR^2x$  y  $pR^2y$ ; se tiene, pues,  $pR^2x = 2/0,79$ , y  $pR^2y = 30/13,6$ ; de donde

$$x + y = 2/pR^2(1/0,79 + 15/13,6) = 0m,0965.$$

XXIV.

Un cilindro de hierro tiene 2m,55 de longitud, y pesa 41 kilogramos; ¿cuál es el diámetro de la sección perpendicular al eje del cilindro, sabiendo que la densidad del hierro es 7,788?

La sección es igual a  $V/A = P/AD = 41/7,788 \times 25,5$ ; pero es también igual a  $pD^2/4$ ; luego se tiene

$$pD^2/4 = 41/7,788 \times 25,5, \text{ de donde } D = 0m,0512.$$

XXV.

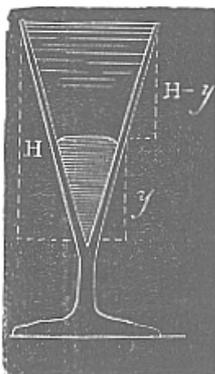


Fig. 594.

Una vasija de forma cónica tiene 0m,08 de diámetro en su base, y 0m,12 de altura; su eje está en la posición vertical, y en esta posición se llena la vasija de agua y mercurio en proporciones tales, que el peso del mercurio sea el triple de

el del agua. La temperatura es la de cero, la densidad del mercurio 13,598, y la del agua 1. Determinése el espesor de cada capa líquida.

Volumen total= $1/3\pi R^2H$ ; volumen del mercurio= $1/3\pi r^2y$ ; y volumen de agua= $1/3\pi(R^2H-r^2y)$  Luego el peso del mercurio es  $1/3\pi r^2yd$ , y el del agua  $1/3\pi(R^2H-r^2y)$ , lo cual da, según el enunciado,  $1/3r^2yd=R^2H-r^2y$ , de donde  $y=3R^2H/r^2(d+3)=R^2/r^2\times 3H/d+3$ . Pero  $R^2/r^2=H^2/y^2=144/y^2$ , luego  $y=144/y^2\times 36/16,598$ , de donde  $y=\sqrt[3]{144\times 36/16,598}=0m,0678$ , y  $H-y=0m,0522$ .

XXVI.

Un triángulo equilátero de acero, de 0m,15 de lado, gira sobre uno de sus lados y se introduce así completamente en un pedazo de mármol cuya densidad es 2,72. El eje de rotación es perpendicular a la superficie del mármol, y el triángulo penetra en éste por su vértice. Se desea saber la pérdida de peso que experimenta el pedrusco en esta operación.

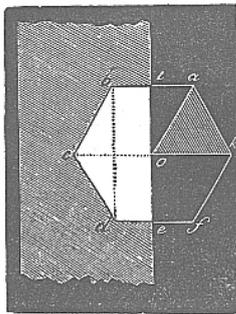


Fig. 595.

Habiendo entrado el triángulo en el mármol, como lo indica la figura 595, el volumen quitado es

$$V=\pi i^2 \times ab/2 + \pi i^2 \times ab/6 = 4/6 \pi i^2 \times ab.$$

$$\text{Pero } i^2 = b^2 - b^2/4 = 3/4 b^2;$$

así pues,  $V = \pi i^3/2 = 3,1416 \times (15)^3/2 = 5301c.cúb.,450$ .

Luego la pérdida de peso en el mármol es

$$5301c.cúb.,450 \times 2,72 = 14kil.,419gr,944.$$

XXVII.

Siendo de 20 kilogramos el esfuerzo que se aplica a una prensa hidráulica, y el brazo de palanca sobre la cual actúa aquél, 5 veces el brazo de la resistencia, y por último, la superficie del gran pistón, 70 veces la del émbolo de la bomba, determínese la presión trasmitida sobre el pistón que oprime el plato de la prensa.

Representando por F la presión ejercida por la palanca sobre el émbolo menor, se tiene en virtud del principio de las palancas (45),  $p \times 1 = F \times 5$  [1]; pero siendo P la presión trasmitida al gran pistón, la cual es proporcional a la superficie, se tendrá  $P = 70 p$  [2]. Sustituyendo en esta igualdad el valor de p, que nos procura la igualdad [1] se obtendrá  $P = 70 \times 5 \times F = 70 \times 5 \times 20kil. = 7000kil$ .

XXVIII.

Se tiene un cilindro de platino de 0m,02 de altura; se le añade un cilindro de hierro del mismo diámetro. ¿Qué altura hay que dar al cilindro de hierro para que su base superior enrrese con la superficie del mercurio, cuando se sumerjan ambos cilindros en este líquido; y si el diámetro de los cilindros fuera 0m,03, cuál sería el peso del mercurio desalojado? Se parte del supuesto de que la densidad del platino es 21,59, la del mercurio 13,596, y la del hierro 7,788.

1.º Llamemos D a la densidad del platino, D' a la del hierro, D'' a la del mercurio, a a la altura del cilindro de platino, y x a la del cilindro del hierro.

- |                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Peso del platino.            | $\pi r^2 a D$ ;       |
| Id. del hierro.              | $\pi r^2 x D'$ ;      |
| Id. del mercurio desalojado. | $\pi r^2 (a+x) D''$ . |

Se tiene, pues, suprimiendo el factor común  $\pi r^2$ ,  $aD + xD' = (a+x) D''$ , de donde

$$x = a(D - D'') / (D'' - D) = 2 \times 7,994 / 5,808 = 2c,75.$$

2.º Siendo el diámetro del cilindro 3c, se encuentra para el peso del mercurio desalojado

$$3,4416 \times 9(2+2,75)13,596/4=456\text{gr},497.$$

XXIX.

Se supone que un hombre levanta a la vez 125 balas de cañón del peso de 2 kilogramos: se pregunta cuál sería el número de balas que podría levantar, empleando igual esfuerzo muscular, si la tierra tuviese igual volumen que la luna, todos los demás datos siendo iguales. El radio de la tierra aceptado como unidad, se tomará el radio de la luna igual a 0,37234, y no se tendrá en cuenta el achatamiento de la tierra y de la luna por sus polos.

Llamemos R al radio de la tierra, y M a su masa;  $r$  y  $m$  el radio y masa de la luna, P al peso sostenido en la superficie de la tierra, siendo R el radio; P', el que se sostendría si, quedando la misma la masa de la tierra, fuese su radio  $r$ , y P'', el peso que sería sostenido siempre a la superficie de la tierra, si con el radio  $r$  tuviese la masa  $m$  de la luna.

Los dos pesos P y P', siendo, a masa igual, directamente proporcional a los cuadrados de sus distancias al centro de la tierra, se tiene  $P/P'=R^2/r^2$  [1]; por el contrario, estando los pesos P' y P'', bajo distancia igual, en razón inversa de las masas, se tiene  $P'/P''=m/M$ , o lo que es lo mismo, bajo igual densidad, tendremos  $P'/P''=r^2/R^3$  [2]. Multiplicando ordenadamente las igualdades [1] y [2], resulta  $P/P''=r/R$ ; de donde

$$P''=P \times R/r=250\text{k}./0,27234=918\text{kil}.;$$

luego el número de balas pedido es  $918/2=459$ .

▽△

### **Problemas sobre el principio de Arquímedes, respecto a la densidad de los gases y a la presión atmosférica**

XXX

Dado un cuerpo A, que pesa en el aire 7gr,55, en el agua 5gr,17, y en otro líquido B, 6gr,35, deducir las densidades del cuerpo A y del líquido B.

Según el enunciado, el peso del cuerpo A pierde en el agua  $7\text{gr},55-5\text{gr},17=2\text{gr},38$ , que es el peso del agua desalojada. En el líquido B pierde  $7\text{gr},55-6\text{gr},35=1\text{gr},20$ , que es el peso del líquido B bajo el mismo volumen que el del cuerpo y del agua. Por consiguiente, el peso específico de A es  $755/238=3,173$ , y el de B= $120/238=0,504$ .

XXXI.

Un trozo de metal pesa en el aire 7gr,234; en el agua 4gr,523; en un líquido A, 5gr,417; en otro líquido B, 3gr,215: sentados estos datos desea conocerse la densidad del metal y de cada uno de los líquidos A y B, con relación al agua.

Densidad del metal, 2,66; densidad del líquido A, 0,670, y densidad del líquido B, 1,482.

XXII.

Se tiene un globo aerostático esférico de 4 metros de diámetro, y se le llena de hidrógeno impuro, que pesa 100 gramos el metro cúbico. El tafetán barnizado que constituye la cubierta pesa 250 gramos cada metro cuadrado. Se pide cuánto hidrógeno se necesitará para llenarle, qué peso podrá equilibrar, sabiendo que cada metro cúbico de aire pesa 1300 gramos.

Se sabe, en geometría, que el volumen de una esfera cuyo radio es  $R$ , está representado por  $\frac{4}{3}\pi R^3$ , y la superficie por  $4\pi R^2$ . De consiguiente, siendo  $V$  el volumen del globo lleno, y  $S$  su superficie, se tiene

$$v = \frac{4}{3}\pi R^3 = 4 \times 3,1416 \times 8/3 = 33 \text{ m.cúb.}, 510;$$

$$\text{y } S = 4\pi R^2 = 4 \times 3,1416 \times 4 = 50 \text{ m.cuad.}, 2655.$$

Por lo tanto, el peso del hidrógeno contenido en el globo es, según el enunciado, 100 gramos  $\times 33,510 = 3 \text{ kil.}, 351$ ; y el de la cubierta 250 gramos  $\times 50,2655 = 12 \text{ kil.}, 566$ . El peso total del globo, incluso el del hidrógeno y el de la cubierta, es pues,

$$3 \text{ kil.}, 351 + 12 \text{ kil.}, 566 = 15 \text{ kil.}, 917.$$

Pero el peso del aire desalojado por el globo, y por lo mismo el empuje de abajo hacia arriba (172), es, según el enunciado,  $1 \text{ kil.}, 300 \times 33,510 = 43 \text{ kil.}, 563$ . Y por último, el globo puede equilibrar un peso de  $43 \text{ kil.}, 563 - 15 \text{ kil.}, 917 = 27 \text{ kil.}, 646$ .

### XXXIII.

Un pedazo de madera, cuya densidad es 0,729, tiene la forma de un cono. Se le hace flotar en el agua de manera que su eje quede vertical, ya sumergiéndolo por el vértice, ya por la base. Determinése cuál es la altura de la parte sumergida en el agua, en cada uno de los casos supuestos.

1.º Llamemos  $V$  al volumen total del cono,  $v$  la parte sumergida,  $A$  y  $a$  las alturas de los dos conos,  $D$  la densidad de la madera, y  $d$  la del agua.

Siendo de igual peso los volúmenes  $V$  y  $v$ , están en razón inversa de sus densidades; y se tiene, por consiguiente,  $V/v = d/D$ , o bien  $A^3/a^3 = d/D$ ; de donde  $a^3 = A^3 D/d$  siendo  $d=1$ , y haciendo  $A$  también=1, resulta  $a^3 = \sqrt[3]{D} = \sqrt[3]{0,729} = 0,9$  de  $A$ .

2.º En la segunda posición del cono, se tiene

$$V/V-v = d/D, \text{ o bien } A^3/A^3 - a^3 = d/D; \text{ de donde } a^3 = A^3(d-D)/d = 1-D,$$

haciendo  $A=1$  y  $d=1$ . Luego se tiene  $a^3 = \sqrt[3]{1-0,729} = 0,647$  de  $A$ .

### XXXIV.

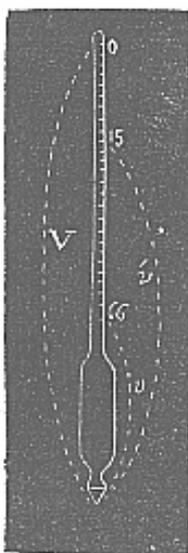


Fig. 596.

Un areómetro de Baumé para ácidos, tiene una varilla bien cilíndrica; se introduce hasta la 66.ª división en el ácido sulfúrico, cuya densidad es 1,8. Bajo este supuesto, se pregunta: 1.º ¿cuál será la densidad del agua salada que sirve para la graduación del instrumento? 2.º ¿cuál es la relación entre el volumen de una división y el del instrumento hasta el cero?

1.º Llamemos  $V$  al volumen del instrumento hasta el cero de la escala,  $v$  el volumen hasta 66% y  $v'$  el volumen hasta 15%, se tiene  $V/v = 1,8/1$ , o bien  $v + 66/v = 1,8$ , de donde  $v = 82,5$ , y  $V = 148,5$ ; de la igualdad  $V - v' = 15$  resulta  $v' = 133,5$ . Luego la densidad del agua salada nos viene dada por la igualdad  $V/v' = d/1$ ; de donde  $d = 148,5/133,5 = 1,112$ .

2.º La relación del volumen de una división al volumen del areómetro hasta la división cero es  $1/148,5$ .

### XXXV.

Un globo pesa 254gr,735 cuando está vacío, y 5kil.,422gr,738 cuando está lleno de aire a la temperatura de 4 grados. Se sabe que a esta temperatura el peso del

aire es al del agua como 129 es a 100000. Se pide la capacidad del globo. El mismo globo, lleno de otro gas a 4 grados, pesa 651 gr,175, estando la presión a 0m,76; ¿cuál sería su peso si la presión fuese de 1m,25?

1.º El peso del aire del globo=5kil.,422gr,738-254gr,735=5kil.,168gr,003. Representando por P el peso del agua a 4º que puede contener el globo, resulta  $P/5\text{kil.}168003=100000/129$ , de donde  $P=4006\text{kil.},204$ . Siendo 1 litro el volumen de 1 kilogramo de agua a 4º, la capacidad del globo es de 4006lit.,204.

2.º El peso del gas contenido en el globo a la presión de 0m,76 es 651gr,175-254gr,735=396,440; el peso del mismo volumen, a la presión de 0m,01 es 396m,440/76, y a la de 1m,23

$$396,440 \times 123/76 = 641\text{gr},607.$$

XXXVI.

Un globo vacío pesa 150gr,475; lleno de aire, 160gr,158, y de otro gas, 162gr,235. 1.º Siendo invariable la presión, se pide la densidad de este gas con relación al aire. 2.º ¿Qué corrección tendría que hacerse si la presión hubiese sido de 0m,75 durante la pesada del aire, y de 0m,77 durante la del gas.

1.º Peso del aire=160gr,158-150gr,475=9gr,683; peso del gas=162gr,235-150,475=11gr,760; de donde la densidad del gas con relación al aire (284), es  $11,760/9,683=1,2145$ .

2.º La corrección que hay que hacer es reducir el peso del aire y el del gas a la presión de 0m,76. Para esto, siendo el peso del aire 9gr,683 a la presión 0m,75, es  $9\text{gr.},683/75$  a la presión de 1c, y  $9\text{gr.},683 \times 76/75$  a la de 0m,76. Se encontrará, de la misma manera que el del peso de gas a esta presión es  $11,767 \times 76/75$  Luego la densidad buscada es

$$11,760 \times 76/77 : 9,683 \times 76/75 = 11,760 \times 75/9,683 \times 77 = 1,183.$$

XXXVII.

Una esfera de platino pesa en el aire 84gr.; en el mercurio sólo 22gr,6. ¿Cuál es la densidad del platino?

Pérdida del peso en el mercurio=84gr-22gr,6=61gr,4; de donde la densidad del platino con relación al mercurio es igual a  $84/61,4$ , y la del mismo con relación al agua a  $84 \times 13,6/61,4=18,55$ , siendo 13,6 la densidad del mercurio.

XXXVIII.

Se ha pesado a la misma temperatura un pedazo de metal sucesivamente en el aire, en el agua y en un líquido A; se ha encontrado para su peso en el aire 5gr,219; en el agua, 4gr.,132, y en el líquido 5 009. Se pide la densidad del metal y la del líquido A con relación al agua.

Densidad del metal=4,801; densidad del líquido=0,193.

Está funcionando el émbolo de una máquina neumática; la capacidad del recipiente es de 7lit.,53, y se encuentra lleno de aire a la presión de 0m,76 y a la temperatura de 0º. Se pide: 1.º el peso del aire cuando la presión esté reducida a 0m,021; 2.º el del aire extraído por el émbolo, y 3.º el del que quedaría en la campana a la temperatura de 15º.

1.º A 0º y 0m,76 de presión, 7lit.,53 de aire pesan  $1\text{gr},3 \times 7,53 = 9\text{gr},789$ .

A 0º y 0m,201 de presión, el mismo volumen pesará  $9\text{gr},789 \times 21/760 = 0\text{gr},270$ .

2.º El peso del aire extraído=9gr,789-0gr,270=9gr,519.

3.º El peso del aire que queda, a 15º, sería  $0\text{gr},270/1+0,00366 \times 15 = 0\text{gr},256$  (284, prob. VI).

## XXXIX.

Se da un globo cuyo radio es de 1 metro, lleno las tres cuartas partes de hidrógeno; se pide el peso que podría levantar, sabiendo que la densidad del hidrógeno es 0,069, y que un litro de aire pesa 1gr,3. El aire y el hidrógeno están a la presión de 0m,76 y a la temperatura de 0 grado.

Volumen del globo= $4pR^3/3$ , cuyos  $3/4=4pR^3/3 \times 3/4=pR^3=3m.cúb.,1416$ . Pesando 1 metro cúbico de aire de 1kil.,300gr. el peso del aire desalojado por el globo es  $1kil.,300 \times 3,1416=4kil.,084gr$ . En cuanto al peso del hidrógeno que llena el globo, es  $4kil.,084 \times 0,069=0kil.,281$ . De consiguiente, el peso que el globo puede levantar, incluso su propio peso, es  $4kil.,084-0kil.,241=3kil.,803gr$ .

## XL.

Calcular la fuerza ascensional de un globo esférico de tafetán, que al hallarse vacío pesa 36kil.,620, y que está lleno de hidrógeno impuro, sabiendo que el tafetán barnizado pesa 0kil.,250gr. el metro cuadrado, 1kil.,300gr. el metro cúbico de aire, y 0kil.,100gr. el de hidrógeno.

La superficie del globo= $63k,620/0k,250=254m.cuad.,48$ . Siendo la superficie del globo la de una esfera, es igual a  $4pR^2$ ; tenemos, pues,  $4pR^2=254m.cuad.,48$  de donde

$$R=1/2 \sqrt{254,48/3,1416}=1/2 \sqrt{81,0033}=4m,50.$$

De consiguiente, llamando V al volumen de la esfera, resulta

$$V=4pR^3/3=4 \times 3,1416 \times (4,5)^3/3=381m.cúb.,7044.$$

El peso del aire desalojado es, pues,  $1kil.,3 \times 381,7044=496kil.,216gr$ .

El peso del hidrógeno es  $0kil.,1 \times 381,7044=38kil.,1704$ , cuya fuerza ascensional es  $196kil.,216-38kil.,170-63kil.,620=392kil.,426gr$ .

## XLI.

Una columna de agua de 1m,55 de altura y otra de un líquido distinto de 3m,17 se equilibran en las ramas de un sifón, siendo 4 grados la temperatura de ambos líquidos; se pide la densidad del segundo con relación al agua, y la altura a que subiría si su temperatura llegase a 25 grados, permaneciendo a 4 grados la del agua, y siendo 1/6000 el coeficiente de dilatación absoluta del líquido.

1.º Las alturas de las columnas líquidas que se equilibran están en razón inversa de las densidades (90), y por lo mismo se tiene  $1m,55 \times 1=3,17 \times d$ , de donde  $d=0,4889$ , a 4.º

2.º Representando por  $a$  la altura del mismo líquido a 25 grados, por  $d$  su densidad a 4 grados y por  $d'$  su densidad a 25 grados, se tiene  $3m,17 \times d=a \times d'$  [1], luego  $d'=d/1+1/6000 \times 25$  (281, prob. IV). Introduciendo este valor en la igualdad [1], resulta  $3m,17=a/1+25/6000$ , de donde  $a=3m,183$ .

## XLII.

Siendo 1 la densidad del aire, 0,069 la del hidrógeno, y 1,524 la del ácido carbónico, a 0º grados y a la presión de 0m,76, un cuerpo en el ácido carbónico pierde 1gr,15 de su peso: determínese la pérdida en el aire y en el hidrógeno.

Se pide también: 1.º si la relación de las pérdidas de peso queda la misma a la temperatura de 200 grados, no variando la presión; 2.º si esta relación queda la misma, a la presión de 30 atmósferas, siendo de 0 grados la temperatura.

Un litro de aire, a 0° y a la presión de 0m,76, pesa 1gr,3 y uno de ácido carbónico, cuya densidad es 1,524, pesará  $1\text{gr},3 \times 1,524 = 1\text{gr},9812$ . Se tendrá, pues, el volumen de ácido carbónico que corresponde a 1gr,15, dividiendo 1gr,15 por 1gr,9812, lo cual da por cociente 0lit.,5804. Siendo este volumen el del cuerpo, desaloja éste 0lit.,5804 de aire, y de consiguiente, su pérdida de peso en el aire (172) es  $1\text{gr},3 \times 0,5804 = 0\text{gr},75452$ . En cuanto a su pérdida de peso en el hidrógeno es  $0\text{gr},75452 \times 0,069 = 0\text{gr},052061$ . La relación de las pérdidas de peso en el ácido carbónico y en el hidrógeno no permanece rigurosamente la misma cuando cambia la temperatura o la presión, porque no son igualmente dilatables, ni igualmente compresibles estos dos gases (282 y 162).

#### XLIII.

El volumen del aire de la probeta de una máquina de compresión es de 137 partes. Por el juego de la máquina se reduce a 25, y el mercurio sube en la probeta a 0m,45: se pide la relación entre la cantidad primitiva de aire del recipiente y la que existe después del experimento.

Estando el aire de la probeta a la presión de 1 atmósfera cuando su volumen es 137, si se representa por F su tensión cuando el volumen se ha reducido de 137 a 25, se tiene, según la ley de Mariotte,  $F \times 25 = 137 \times 1$ , de donde  $F = 5\text{atm.},48$ . En cuanto a la altura del mercurio en la probeta, ella equivale, en atmósferas, a  $45/76 = 0\text{atm.},59$ . Equilibrando la tensión del aire en el recipiente la presión del aire en la probeta, más la columna de mercurio que en ésta sube, es preciso que dicha tensión valga  $5\text{atm.},48 + 0\text{atm.},59 = 6\text{atm.},07$ . Vuelta 6,07 veces mayor la presión del aire en el recipiente, le sucede otro tanto a la masa del aire, y por lo mismo, la relación que se pedía es  $1/6,07$ .

#### XLIV.

Un cuerpo pierde de su peso en el aire 7 gramos: ¿cuánto perdería en el ácido carbónico y en el hidrógeno, sabiendo que sus densidades son respectivamente 1,524 y 0,069?

Perdiendo el cuerpo 7 gramos de su peso en el aire, pierde, en un gas dos tres veces más denso, dos, tres veces más; luego en el ácido carbónico pierde  $7\text{gr} \times 1,524 = 10\text{gr},688$ , y en el hidrógeno  $7\text{gr} \times 0,069 = 0\text{gr},483$ .

#### XLV.

En un recipiente de 3 litros se hacen entrar: 1.º 2 litros de hidrógeno a la presión de 5 atmósferas; 2.º 4 litros de ácido carbónico a la presión de 4 atmósferas; 3.º 3 litros de nitrógeno a la presión de  $\frac{1}{2}$  atmósfera. Se pide la presión final de la mezcla, suponiendo constante la temperatura durante la experiencia.

La presión =  $5 \times \frac{2}{3} + 4 \times \frac{4}{3} + 3 \times \frac{1}{2} \times 3 = 9\text{atm.} + \frac{1}{6}$ .

#### XLVI.

La campana de una máquina neumática contiene 3lit.,17 de aire; un barómetro que comunica con la parte superior de la campana, marca cero cuando ésta se encuentra en comunicación con la atmósfera. Se ajusta la campana, y se hace funcionar la máquina: el mercurio se eleva entonces en el barómetro 0m,65. Un segundo barómetro, colocado cerca de la máquina, ha marcado 0m,76 durante todo el experimento. Dígase cuál es el peso del aire extraído, y del que ha quedado en la campana, suponiendo cero la temperatura.

A 0° y a la presión de 0m,76, el peso del aire contenido en la campana es

$$1\text{gr},3 \times 3,17 = 4\text{gr},121.$$

A 0° y a la presión  $76 - 65 = 11$ , el peso del aire que queda todavía en la campana es

$$1\text{gr},3 \times 3,17 \times \frac{11}{76} = 0\text{gr},596.$$

Luego el peso del aire extraído de la campana ([fig. 597](#)), es  $4\text{gr},121 - 0\text{gr},596 = 3\text{gr},525$ .

#### XLVII.

El volumen de aire, en la probeta de una máquina de compresión, es igual a 152 partes. Por el juego de la máquina, este volumen se reduce a 37 partes, y se ha elevado el mercurio en el tubo manométrico, a  $0\text{m},48$ . Véase en qué relación se ha aumentado la cantidad de aire en el recipiente de la máquina.

En la [figura 598](#) se tiene  $AB=152$  partes,  $AC=37$ , y  $BC=0\text{m},48$ . Ahora bien, la presión del aire en AC es, pues, según la ley de Mariotte,  $152/37=4\text{atm.}$ ,  $108=3\text{m},122$ , puesto que una atmósfera está representada por  $0\text{m},76$ . La presión en el recipiente M, donde se comprime el aire, es, por consiguiente,  $3\text{m},122+0\text{m},48=3\text{m},602$ . Pero como la masa del aire ha aumentado como la presión, la que actualmente existe en el recipiente es  $3\text{m},602/0,76=4,7$ .

Es decir, que ella se ha hecho 4 y  $7/10$  veces mayor.

#### XLVIII.

Sabiendo que la capacidad del cuerpo de bomba de una máquina neumática es  $1/3$  de la capacidad del recipiente, calcular después de cuántos golpes del émbolo se habrá reducido la presión interior a  $1/200$  de lo que era primitivamente.

Representemos por 1 la presión atmosférica, y por 1 el volumen del recipiente. Después de la ascensión del émbolo, este volumen será  $1+1/3$ , y por consiguiente, la presión del aire será debajo del recipiente  $1/1+1/3$ , puesto que está en razón inversa del volumen. Del mismo modo, al segundo golpe del émbolo, será la presión  $1/1+1/3$ , de la que era al terminar el primero; es decir,  $1/1+1/3$  de  $1/1+1/3$ , o bien  $1/(1+1/3)^2$ .

Del mismo modo se encontrará que, después de  $n$  golpes del émbolo, la presión es  $1/(1+1/3)^n$ .

Se tiene, pues,

$$1/(1+1/3)^n = 1/200, \text{ de donde } (1+1/3)^n = 200; \text{ o } (4/3)^n = 200.$$

Tomando los logaritmos, resultan  $n = \log.200 / \log.4 - \log.3 = 18,4$ .

#### XLIX.

Un manómetro de aire comprimido está dividido en 110 partes de igual capacidad; cuando la presión exterior es de  $0\text{m},76$ , el mercurio, en el interior del tubo y de la cubeta, permanece en el cero de la escala, se lleva el manómetro debajo del recipiente de una máquina de compresión, y se ve un que el mercurio se eleva hasta la 80.<sup>a</sup> división; midiendo entonces la altura del mercurio en el tubo, se la encuentra de  $0\text{m},45$ ; se pide cuál es la presión en la máquina.

Sea P la presión del aire en AB ([fig. 599](#)); la porción de la escala correspondiente a AB siendo 30, se tiene  $P/76=110/30$ , de donde  $P=2\text{m},787$ . Añadiéndole la altura de  $0\text{m},450$  del mercurio en el tubo, la presión total es  $3\text{m},237$ .

Para reducirla en atmósferas, no hay más que dividir  $3\text{m},237$  por  $0\text{m},76$ , lo cual da  $4\text{atm.}+1/4$ .

▽△

### Problemas sobre los coeficientes de dilatación

L

Observadas dos alturas barométricas, A y B, la una a -10 grados, y la otra a +15; se pide la corrección que deberá hacerse para reducir las dos a lo que hubieran sido a la temperatura de cero, sabiendo que el coeficiente de dilatación cúbica del mercurio es  $1/5550$ . Suponemos que A vale 737 milímetros, y B 763.

Esta cuestión se resuelve por medio de la fórmula  $A-a(1+Dt)$  (278), tomando  $t$  con el signo + para la temperatura sobre cero, y con el - para las inferiores al cero. De esta última fórmula se obtiene  $a=A/1+Dt$ . Ésta da para el barómetro A,

$$a=737 \times 5550 / 5550 - 10 = 738 \text{ mm}, 3, \text{ y para el B, } a=763 \times 5550 / 5550 + 15 = 760 \text{ mm}, 9.$$

LI.

Se tiene una barra de 3 metros de un metal, cuyo coeficiente de dilatación es  $1/754$ ; otra de 5 metros, de un metal diferente que se dilata respecto a un mismo número de grados, tanto como la primera. Averígüese su coeficiente de dilatación.

Sea K el coeficiente de dilatación de esta segunda barra, su prolongación total por cada grado será  $5 \times K$  (267), y el de la primera barra  $3 \times 1/754$ ; se tiene

$$5 \times K = 3 \times 1/754, \text{ de donde } K = 3/3770.$$

LII.

Se eleva a 64 grados la temperatura de un cuadrado de palastro de 3 metros de lado, desde cero, y se pide a cuánto ascenderá su superficie, sabiendo que el coeficiente de dilatación del hierro es 0,0000122.

Representando por  $l$  el lado dado a cero, por  $l'$  el mismo lado a  $t$  grados, y por  $k$  el coeficiente de dilatación del hierro, se tiene la fórmula conocida (267).

$$l' = l(1 + kt),$$

por medio de la cual se encuentra el lado  $l'$  a 64 grados, haciendo en ella  $l=3$ ,  $t=64$ , y  $k=0,0000122$ , de modo que resulta

$$l' = 3(1 + 0,0000122 \times 64) = 3 \text{ m}, 0023424.$$

Ahora bien, siendo igual la superficie de un cuadrado al producto de un lado por sí mismo, la superficie en cuestión es  $(3 \text{ m}, 0023424)^2 = 9 \text{ m. cuad.}, 01 \text{ d. cuad.}, 41 \text{ c. cuad.}$

LIII.

Se quiere fabricar con acero y latón un péndulo compensador, cuya longitud constante sea de 0m,50. Se sabe que el coeficiente de dilatación del acero que se usa es de 0,000010788, y el del latón 0,000018782. Con estos datos deséase conocer la disposición que ha de darse dicho péndulo y las longitudes que requieren las dos barras para que haya la debida compensación.

Para satisfacer las condiciones de este problema, es preciso: 1.º que la varilla del péndulo se componga de un sistema de barras de latón y de acero, dispuestas de modo que su dilatación se origine en sentido contrario; 2.º que las longitudes respectivas del latón y del acero estén en razón inversa de sus coeficientes de dilatación (270). Se satisfacen estas condiciones disponiendo el péndulo conforme ya sabemos (fig. 189).

Representando por  $x$  la longitud total de las barras de acero, y por  $y$  la de las de latón, se tendrá, según la ecuación [1] del párrafo 270,  $x-y=50c$  [1].

Además, debiendo encontrarse en razón inversa de los coeficientes las longitudes  $x$  e  $y$ , resulta  $x/y=18782/10788$  [2].

Resolviendo las ecuaciones [1] y [2], se encuentra  $x=1m,1747$ , e  $y=0m,6747$ .

#### LIV.

Una vasija esférica de un radio interior igual a  $2/3$  de metro, a  $0$  grados, se ha fabricado con una materia cuyo coeficiente de dilatación lineal vale  $1/2500$  determínense los kilogramos de mercurio que dicha vasija contiene: 1.º a  $0$  grados, y 2.º a  $25$  grados.

Sean  $R$  el radio de la vasija,  $V$  su volumen a cero,  $V'$  su volumen a  $t$ , y  $K$  su coeficiente de dilatación lineal; el radio, a  $t$ , será  $R(1+Kt)$  (267), y se tendrá

$$V=4\pi R^3/3, \text{ y } V'=4\pi R^3(1+Kt)^3/3; \text{ de donde } V'=4\pi R^3(1+3Kt+3K^2t^2+K^3t^3)/3.$$

Siendo  $K=1/2500$ , los términos que contienen  $K^2$  y  $K^3$ . Son bastante pequeños para despreciarlos, y así sale  $V'=4\pi R^3(1+3Kt)/3$ .

Reemplazando  $R$ ,  $K$  y  $t$  por sus valores, se tiene

$$V=1241lit.,11 \text{ y } V'=1278lit.,333.$$

La densidad del mercurio a  $0^\circ$  es  $13,596$ , y la del mismo cuerpo a  $25^\circ$  es  $13,596/1+1/5550 \times 25=13,535$  (268). Por lo tanto, el peso del mercurio a  $0^\circ$  es  $1241lit.,11 \times 13,596=16863kil.,996$ , y el peso a  $25^\circ$  es  $1278,333 \times 13,535=17302kil.,237gr$ .

#### LV.

Una vasija esférica de  $0m,25$  de diámetro está llena de gas hidrógeno a la temperatura de  $35$  grados y a la presión de  $0m,78$ . Dígase cuál será el peso del gas y su volumen si la temperatura baja a  $-5$  grados y la presión atmosférica a  $0m,74$ .

El volumen de la vasija  $=4\pi R^3/3=4 \times 3,1416 \times 0m,125^3=8lit.,18125$ . Ahora  $1lit.$  de aire a  $0^\circ$  y a la presión de  $0m,76$  pesa  $1gr,3$ , y de consiguiente,  $1lit.$  de hidrógeno, a las mismas temperaturas y presión, pesa  $1gr,3$  multiplicado por la densidad del hidrógeno, es decir,  $1gr,3 \times 0,0692$ . A la presión de  $0m,78$ , el peso de un litro de hidrógeno es, pues,  $1gr,3 \times 0,0692 \times 78/76$ ; y por fin, a esta última presión y a  $35^\circ$ , su peso es  $1gr,3 \times 0,0692 \times 78/76(1+0,003668 \times 35)$  (281, prob. VI); y el del hidrógeno de la vasija  $1gr,3 \times 0,692 \times 78 \times 8lit.,181/76(1+0,003668 \times 35)=0gr,6686$ .

Para pasar del volumen a  $35^\circ$  al a  $-5^\circ$ , se usará la fórmula  $V'=V(1-at)/(1+at)$  (281, problema III), dando a  $t'$ , el signo -, de modo que el volumen a  $-5^\circ$  y a la presión de  $0m,74$ , es

$$8lit.,181(1-0,003668 \times 5) \times 78 / (1+0,003668 \times 35) 74.$$

#### LVI.

Una barra formada de un metal cuyo coeficiente de dilatación lineal es  $1/754$  cuenta dos metros de longitud; determínese la que debería darse a una barra de otro metal, cuyo coeficiente de dilatación es  $1/1150$ , a fin de que su dilatación total, para un grado, sea igual a la de la primera.

Representando por  $l$  la longitud buscada, se tiene  $l \times 1/1150 = 2 \times 1/754$ , de donde  $l=3m,050$ .

#### LVII.

Una barra de  $7m$ , formada de un metal cuyo coeficiente de dilatación es  $1/735$ , se dilata tanto como otra barra de  $9m$  de un metal distinto: desea conocerse el coeficiente de dilatación de este último metal.

Sea  $K$  el coeficiente de dilatación que se busca, y tendremos:

$$K \times 9 = 7 \times 1/735, \text{ de donde } K = 1/945.$$

LVIII.

El peso de la atmósfera hace subir el mercurio a 0m,76 en el barómetro, a la temperatura de 0 grados; pero desea conocerse: 1.º la altura del mercurio si la temperatura llega a 25º, siendo 1/5550 el coeficiente de dilatación de este líquido; 2.º la altura, a 0º, del alcohol, cuya densidad es 0,79, sabiendo que la densidad del mercurio es 13,6.

1.º Representando por A la altura del barómetro a 25º y por a la misma a cero, la fórmula  $A = a(1 + t/5550)$  (278) da  $A = 76(1 + 25/5550) = 76c,34$ .

2.º Estando en razón inversa de su densidad las alturas de mercurio y de alcohol que equilibran la presión atmosférica, si se representa por a' la columna de alcohol, resulta

$$a' \times 0,79 = 76 \times 13,6, \text{ de donde } a' = 76 \times 13,6 / 0,79 = 13m,0835.$$

LIX.

Supongamos que se haya introducido un barómetro en un ancho tubo, cerrado después por medio de la lámpara, y que al efectuarse esta operación, sea la temperatura del tubo de 13º y la altura del barómetro 76. Con estos datos determínese con una aproximación de 0,0001, a qué altura se elevará el mercurio en el barómetro, cuando sea la temperatura del aire de 30º.

Contrayéndonos únicamente en un principio a la dilatación del mercurio en el tubo barométrico al pasar de 13 a 30º, tendremos  $a = 76(1 + 30/5550) / 1 + 13/5550 = 76 \times 5580 / 5563$ ; pero como en el tubo cerrado, la fuerza elástica del aire aumenta en la relación de 1+13 a 1+30 a, la altura barométrica debe aumentar en la misma relación, y tendremos por último,

$$a = 76 \times 5580(1 + 30 a) / 5563(1 + 13 a) = 80cent.,762.$$

LX.

Un globo de vidrio a 0º y de una capacidad de 5 litros, lleno de ácido carbónico a 0º y a la presión 76, se calienta a 100, después de haberlo abierto para procurar la salida al gas. Siendo en este caso la presión de 75, determínese el peso del ácido carbónico salido del globo.

El coeficiente de dilatación del ácido carbónico es 0,00367; la dilatación cúbica del vidrio 1/38700; un litro de aire a 0º y a la presión 76 pesa 1gr,293, y finalmente, la densidad del ácido carbónico, es 1,5.

A 100º y a la presión 75, el volumen del ácido carbónico vendrá a ser

$$5(1 + 0,00367 \times 100) / 76 / 75 = 6lit.,926.$$

A la misma temperatura el volumen del globo es  $5(1 + (100/38700)) = 5lit.,013$ ; por consiguiente, el volumen del gas que ha salido del globo será de  $6,926 - 5,013 = 1lit.,913$ .

Para obtener el peso de este gas, sabiendo que los 5 litros de ácido carbónico a 0º y a 76 pesan  $1gr.,293 \times 5 \times 1,5 = 9gr,697$ , y que por consiguiente, los 6lit.,926 a 100 y a 75 deben tener un peso de tanto, se planteará la proporción  $x/9gr.,697 = 1lit.,916/6,926$ , de la cual se obtiene

$$x = 2gr.,678.$$

LXI.

Es sabido que en un termómetro de mercurio cada división es 1/6480 de la capacidad del receptáculo hasta el cero de la graduación: sentado esto, si se vacía dicho instrumento y se le introduce hasta el cero en el hielo fundido, lleno de un líquido cuyo coeficiente de dilatación sea 1/2000 determínese hasta qué división se elevará el líquido en cuestión a los 20º, sabiendo que el coeficiente de la dilatación cúbica del mercurio es 1/38700.

El coeficiente de dilatación aparente del mercurio en el vidrio siendo  $1/6480$ , es el del líquido propuesto  $1/2000-1/38700$ ; y como las alturas  $a$  y la de  $20$ , que alcanzan respectivamente el líquido y el mercurio en el termómetro, son evidentemente proporcionales a las dilataciones aparentes, se tendrá:

$$a/20=367/774000:1/6480, \text{ de donde se deduce}$$

$$a= 61,45.$$

LXII.

Una vejiga de paredes flexibles contiene 4 litros de aire a  $30^\circ$  y a la presión  $76$ : permaneciendo constante la presión de la atmósfera, determínese cuál será el volumen del aire, si se desciende la vejiga a la profundidad de 100 metros en un lago cuya temperatura sea de  $4^\circ$ .

Sabemos que una columna de agua de  $10\text{m},33$  a  $4^\circ$  representa una atmósfera ( $151$ ), y por lo tanto la columna de agua de 100 metros se convertirá en atmósferas, dividiendo 100 por  $10\text{m},33$ , operación que nos da por cociente  $9\text{m},68$ . La vejiga en el fondo del agua, se encuentra expuesta por los datos, a una presión de  $10\text{atm},68$ , y el problema puede formularse como sigue: ¿teniendo 4 litros de aire a  $30^\circ$  y a  $1\text{atm}$ . de presión, cual será el volumen a  $4^\circ$  y a  $10\text{atm},68$ ?

$$\text{Tendremos (281) } V=4(1+0,00367 \times 4)/1+0,00367 \times 30 \times 1/10,68=0\text{lit},342.$$

LXIII.

En un globo de vidrio cuya capacidad a  $0^\circ$  es de  $250\text{c},\text{cúbicos}$ , se introduce cierta cantidad de aire seco, capaz de ocupar  $25\text{c},\text{cúbicos}$  a  $0^\circ$ , y a la presión  $76$ . Cerrado el globo y calentado a  $100^\circ$ , determínese la presión interior.

Sabemos que el coeficiente de dilatación del aire es  $0,00367$ , y la dilatación cúbica del vidrio  $1/38700$ . A  $100^\circ$  la capacidad del globo es,  $250(1+100/38700)=250,388/387$ . A  $100^\circ$  y a la presión  $76$ , sería el volumen de aire libre  $25(1+0,00367 \times 100)=25 \times 1,367$ , siendo así que su volumen real es  $250 \times 388/387$  a una presión desconocida  $x$ .

Así pues, al volumen  $25 \times 1,367$  corresponde la presión  $76$

al volumen  $1 - 76 \times 25 \times 1,367$

y al volumen  $250 \times 388/387 - 76 \times 25 \times 1,367 \times 387=10\text{c},36$ .

LXIV.

Un areómetro de Fahrenheit pesa  $80\text{gr}$ , y cuando se carga con  $45\text{gr}$ . enrasa en un líquido cuya temperatura es de  $20^\circ$  y cuya densidad a la misma temperatura es  $1,5$ . Determínese el volumen a  $0^\circ$  de la parte sumergida del instrumento que nos ocupa.

El peso del líquido desalojado es  $80\text{gr}+45\text{gr}=125\text{gr}$ , y su volumen a  $20^\circ$ , es  $P/D=125/1,5$ .

Tal es, por lo tanto, a esta temperatura, el volumen de la parte sumergida, y (267) el volumen a  $0^\circ$  será  $125/1,5 \times 1/1+0,00002584 \times 20=83\text{cent},\text{cúb},290$ , siendo el coeficiente de la dilatación cúbica del vidrio  $0,00002584$ .

LXV.

Un cuerpo pesado en el aire a  $0^\circ$  y a la presión  $76$ , pierde  $6\text{gr},327$  de su peso: se desea conocer: 1.º el volumen del cuerpo; 2.º su pérdida de peso a  $15^\circ$  y a la presión  $1\text{m},25$ .

Sabemos que la densidad del aire relativamente a la del agua es de  $1/770$ ; que su coeficiente de dilatación es  $0,00366$ , y que se desprecia la dilatación del cuerpo.

1.º El peso de un decímetro cúbico de agua pesa 1000gr, el mismo volumen de aire a 0º y a 76, pesa  $1000/770=100/77$ . Así pues, el volumen de aire desalojado, y por consiguiente el volumen del cuerpo es de  $6\text{gr},327:100/77=6,327\times 77/100=4\text{dec.cúb.},872$ .

2.º Para determinar la pérdida del peso a 15º y a la presión 125º, es preciso investigar el peso de 4lit.,872 de aire a dicha temperatura y a la presión fijada, cuyo peso será  $100/77\times 4,872\times 125/(1+0,00386\times 15)76=9\text{gr},87$ : tal será la pérdida del peso que se buscaba.

#### LXVI.

Un tubo cilíndrico de vidrio, cerrado por su parte inferior y lustrado con mercurio, se sumerge los 3/4 de su longitud en el agua a 4º; dígase la cantidad de la cual se sumergirá en el agua a 20º. -Sabemos que de 4 a 20º, se dilata el agua de 0,00179 de su volumen, y que el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio es  $1/37700$ .

Siendo la densidad del agua a 4º de 1, a 20º se encontrará en razón inversa del volumen que haya adquirido el agua, es decir, de  $1/1,00179$ , y hallándose la parte sumergida del tubo en razón inversa de la densidad, tendremos

$$x/(3/4)=1/(1/1,00179), \text{ de donde se deduce } x=0,7513.$$

#### LXVII.

¿Cuál es a 10º,8 la pérdida de peso que experimenta en el aire un cuerpo cuyo volumen a dicha temperatura es de 5182m.cúb., y cuál sería a 25º,13 la pérdida del mismo cuerpo, sabiendo que su coeficiente de dilatación lineal es  $1/2400$ ?

A 10º,8 la pérdida de peso es de  $1\text{gr},293\times 1000\times 6182/1+0,00367\times 10,8=6445\text{kil.},1$ .

A 25º,13 el volumen del cuerpo es  $5182(1+3\times 25,13/2400)/1+3\times 10,8/2400$ ; y por consiguiente, será su pérdida de peso

$$1\text{gr.},293\times 1000\times 5182(1+3\times 25,13/2400)/(1+0,00907\times 25,13)(1+3\times 10,8/2400)=6242\text{kil.},9.$$

#### LXVIII.

Un globo vacío pesa 137gr,435; lleno de aire, 145gr,237; de otro gas, 152gr,118. Se pide: 1.º la densidad del gas con relación al aire, no variando la presión ni la temperatura; 2.º la misma densidad en el caso en que la presión hubiese sido de 0m,75 durante la pesada del aire, y de 0m,77 durante la del otro gas; 3.º la corrección que debería hacerse si la temperatura hubiese sido de 8 grados cuando se pesaba el aire, y de 11º mientras se hacía lo mismo con el otro gas.

1.º  $145,237-137,435=7\text{gr},802$ ;  $152,118-137,435=14\text{gr},683$ ; densidad del gas=

$$14,683/7,802=1,8800.$$

2.º El peso del aire a 0c,75 de presión es 7gr,802; a la de 76c es  $7,802\times 76/75$ ; el del gas, a la presión 76, es  $14,683\times 76/77$ ; luego, la densidad del gas, en el segundo caso, es

$$14,683\times 75/7,802\times 77=1,8337.$$

3.º Sería preciso reducir el peso de los dos gases a cero, multiplicando el peso del aire por  $1+0,00366\times 8$ , y el del gas por  $1+0,00366\times 11$ .

#### LXIX.

Siendo la dilatación lineal del hierro 0,0000122 de su longitud a cero, por cada grado de calor, ¿cuál sería a 60 grados la superficie de un disco circular de palastro que, a cero, tiene 2m,75 de diámetro?

$$S = pR^2(1+kt)^2 = 3,1416 \times (1m,375)^2 (1+0,0000122 \times 60)^2 = 5m.cuad., 94d.cuad., 83c.cuad.$$

LXX.

Dada una barra de plomo que se dilata tanto como una de acero de tres metros de longitud, y sabiendo que el coeficiente de dilatación del plomo es  $1/351$ , y el del acero  $1/327$ ; determínese la longitud de la barra de plomo.

$$l = 3m,220.$$

LXXI.

A qué temperatura pesa un litro de aire seco 1 gramo, bajo la presión de  $0m,77$  siendo el coeficiente de dilatación del aire  $0,00366$ , y el peso de un litro de aire seco,  $0^\circ$  y a la presión de  $0m,76$ ,  $1gr,293$ .

Se tiene  $1,293 \times 77 / (1 + 0,00366 \times t) 76 = 1gr.$ , de donde  $t = 86^\circ$ .

LXXII.

Siendo el peso específico del mercurio a  $0^\circ$ ,  $13,59$ , se desea saber cuál será a  $85^\circ$  el volumen de  $30kil.$  de este metal. Se tomará para coeficiente de dilatación del mercurio  $1/5550$ .

El volumen a cero es  $P/D = 30/13,59$ , y por lo tanto, el volumen a  $85^\circ$  será

$$30/13,59(1 + 1/5550 \times 85) = 2lit.,241.$$

LXXIII.

La relación entre el peso específico del cobre a cero, y el del agua a  $4^\circ$ , es  $8,88$ . El coeficiente de dilatación cúbica del cobre es  $1/58200$ , y la fracción que representa la dilatación total del agua entre  $4^\circ$  y  $15^\circ$  es  $1/1360$ . Bajo este supuesto, se pregunta cuál será, a  $15^\circ$ , la relación de los pesos específicos de estos dos cuerpos.

Siendo 1 el peso del agua a  $4^\circ$ , a  $15^\circ$  será  $1/1 + 1/1360$  (268, prob. IV).

A cero el cobre pesa  $8,88$ , a  $15^\circ$  pesará  $8,88/1 + 15/58200$ . Luego el peso específico del cobre a  $15^\circ$  será

$$8,88/1 + 15/58200 : 1/1 + 1/1360 = 8,88 \times 58200 / 58215 \times 1371 / 1360 = 8,94.$$

LXXIV.

Se tienen dos termómetros de mercurio contruidos con el mismo cristal; el uno tiene una esfera cuyo diámetro interior es  $0m,0075$ , y un tubo cuyo diámetro interior es  $0m,0025$ ; el otro una esfera de  $0m,0062$  de diámetro, y un tubo de  $0m,0015$  de diámetro interior. Se desea saber cuál es la relación de longitud de un grado del primer termómetro y uno del segundo.

Sean A y B los dos termómetros dados, D y D' los diámetros de las esferas,  $d$  y  $d'$ , los diámetros de los tubos. Si se concibe un tercer termómetro, C que tenga igual reservatorio que B e igual tubo que A, y si representamos por  $l, l', l''$  las longitudes respectivas de un grado en los tres termómetros, se tienen las proporciones:

$$l/l'' = D^3/D'^3, \text{ y } l'/l' = d^2/d'^2;$$

multiplicándolas ordenadamente se tiene:

$$l/l'' = D^3 d^2 / D'^3 d'^2.$$

Sustituyendo las letras por sus valores, se tendrá

$$l/l' = 421875 \times 225 / 238328 \times 625 = 0,63.$$

▽△

### Problemas sobre los calóricos específicos

LXXV

En 25kil.,45 de agua a 12°,5, se introducen 6kil.,17 de un cuerpo a la temperatura de 80 grados; la mezcla mide 14°,17; se pide el calórico específico de este cuerpo.

Representando por  $c$  el calórico específico que se pide, sale (347)

$$6\text{kil.},17 (80-14,17)c = 25\text{kil.},45(14,17-12,5); \text{ de donde } c=0,104.$$

LXXVI.

La capacidad calorífica del oro es 0,0298, sirviendo de unidad la del agua dígase qué cantidad de este metal se necesita, a 45 grados, para hacer ascender de 12°,3 a 15°,7, la temperatura de 1kil.,000gr,58 de agua.

Sea  $x$  el peso que se busca en kilogramos. Según la fórmula conocida  $m(t'-t)c$  (346), el calor que el oro cede al enfriarse de 45 grados a 15°,7, es  $x(45-15,7)0,0298$ , y el que el agua absorbe al calentarse de 12°,3 a 15°,7, es 1kil.,00058 (15,7-12,3). Siendo necesariamente igual la cantidad de calor que el oro cede a la que el agua absorbe, tenemos

$$x(45-15,7)0,0298 = 1\text{kil.},00058(15,7-12,3); \text{ de donde } x=3\text{kil.},896.$$

LXXVII.

Se introduce en 2 litros de agua a 4 grados una esfera de platino de 0m,05 de radio a 95 grados; dígase cuál será la temperatura del agua, cuando se haya establecido el equilibrio. La capacidad calorífica del platino es 0,0324, su coeficiente de dilatación 0,000008842, y su densidad 22,07.

Sean  $V'$  el volumen de la esfera a 95 grados, y  $V$  el mismo a cero; tenemos

$$V' = V(1 + Kt), \text{ de donde } V = V' / (1 + Kt).$$

$$\text{Pero } V' = 4\pi R^3 / 3 = 4 \times 3,141592 \times 125 \text{cent.}^3,598.$$

$$\text{De donde } V = 523,598 / (1 + 0,000008842 \times 95) = 523 \text{cent.}^3,158.$$

El peso de la esfera de platino es, pues,  $P = 523 \text{cent.}^3,158 \times 22,07 = 11\text{kil.},546\text{gr.}$

De consiguiente, la masa de platino, al enfriarse de 95 a  $x$  grados, cede, según la fórmula  $m(t'-t)c$  (346), una cantidad de calor igual a  $11\text{kil.},546 \times (95-x) \times 0,0324$ , y los dos litros de agua, al calentarse de 4 a  $x$  grados, absorben  $2 \times (x-4)$ .

Tenemos, pues,  $2(x-4) = 11,546 \times 0,0324(95-x)$ ; de donde  $x = 18°,3$ .

LXXVIII.

Un globo esférico de 0m,14 de radio está lleno de mercurio a 70 grados; se vierte éste en agua a 4 grados, que llena hasta la mitad una vasija cilíndrica de 0m,40 de altura y 0m,20 de radio. Se sabe que la capacidad calorífica del mercurio es 0,0330. Determínese la temperatura de la mezcla, despreciando la de las paredes de la vasija.

Sean  $V$  el volumen del globo, y  $R$  su radio, se sabe, en geometría, que el volumen de la esfera es  $V = 4\pi R^3 / 3$ . Tendremos, pues, según los datos del problema,

$$4 \times 3,1416 \times 2 \text{d.cúb.}, 744/3 = 11 \text{d.cúb.}, 494.$$

Si se toma como densidad del mercurio 13,6, se tendrá su densidad a 70 grados por la fórmula  $d' = d/1 + Kt$  (268), la cual da  $d' = 13,6/1 + 70/5550 = 13,4306$ .

De consiguiente, el peso del mercurio del globo es

$$11 \text{d.cúb.}, 494 \times 13,4306 = 154 \text{kil.}, 371 \text{gr.}$$

El semi-volumen del cilindro es igual a  $\pi R^2 A/2 = 3,141592 \times 4 \times 4/2 = 25 \text{d.cúb.}, 133$ , y el peso del agua que contiene es 25kil.,133.

Ahora bien, si se representa por q la temperatura de la mezcla, el agua ha absorbido una cantidad de calor representada por 25kil.,133(q-4) y la cedida por el mercurio, por  $154,371 \times 0,033(70-q)$ , según las fórmulas del párrafo 346. Tenemos, pues, la ecuación  $154,371 \times 0,033(70-q) = 25,133(q-4)$ ; de donde  $q = 15,12$ .

#### LXXIX.

Calcular el poder calórico del estero de leña que pesa 400 kilogramos, y que se compone de una mezcla de madera de roble y de abeto, sabiendo que el metro cúbico de la primera pesa 450 kilogramos, y 325 el de la segunda; y que la cantidad de agua que sube de 0° a 100° por la combustión de un metro cúbico de leña, es 12150 kilogramos para el roble, y 8775 kilogramos para el abeto.

Sean x el volumen de roble que entra en el estero, e y el de abeto, tendremos  $x+y=1$  [1].

Pesando 450 kilogramos un metro cúbico de roble, el volumen x pesa 450 x; y el volumen y de abeto 325 y; de modo que  $450x+325y=400$  [2].

Resolviendo las ecuaciones [1] y [2], sale  $x=3/5$  e  $y=2/5$ .

Siendo el poder calórico de un metro cúbico de roble 12150, el del volumen x es  $12150 \times 3/5$ , y el de y es  $8775 \times 2/5$ ; de modo que el poder calórico que se pide es

$$12150 \times 3 + 8775 \times 2/5 = 10800.$$

#### LXXX.

Un vaso metálico que pesa 350 gramos, contiene 32kil.,50 de agua a 12°,5; el calórico específico del metal es 0,12, y el del agua 1; arrojando en el agua de dicho vaso 8kil.,25 de otro metal a 60°,5, se eleva la temperatura del agua a 15°,4, se desea conocer el calórico específico del último metal.

Tenemos, según la fórmula conocida (347),  $c = (m + m'c')(q-t)/M(T-q)$ , en la cual reemplazando se deduce  $c = (32 \text{kil.}, 5 + 0 \text{kil.}, 35 \times 0,12)(15,4 - 12,5)/8 \text{kil.}, 25(60,5 - 15,4) = 0,0787$ .

▽△

### Problemas sobre los calóricos latentes

#### LXXXI

¿Cuántos kilogramos de hielo a cero se necesitarían para hacer subir a 10° grados centígrados el agua de un pilón de borde circular y de fondo horizontal, cuya circunferencia superior fuese de 8m,30, la inferior de 6m,15, y la altura de 1m,76; estando el pilón lleno de agua hasta la mitad de su altura, y el agua del mismo a 30 grados?

Sean  $R$  el radio  $OB$  (fig. 600) de la base superior,  $r$  el  $CD$  de la interior,  $r'$  el medio  $IE$  y  $a$  la altura  $IC$  del líquido del pilón. Según el enunciado

$$R=8,30/2p=1m,3210, r=6,15/2p=0m,9788, IC=0m,78, \\ \text{y } r'=R+r/2=1m,1499.$$

Siendo el volumen  $V$  del líquido el de un tronco de cono, cuya altura es  $a$ , y los radios de las bases  $r$  y  $r'$ , tenemos, según un teorema de geometría muy conocido,  $V=pa/3(r^2+r^2+rr')$ ; y reemplazando las letras por sus valores

$$V=3,1416 \times 0,88/3[(1,1499)^2+(0,9788)^2+1,1499 \times 0,9788].$$

Efectuando los cálculos,  $V=3m.cúb.,138,583$ , volumen que representa un peso de agua de  $3138kil.,583gr$ .

Sea ahora  $x$  el peso de hielo necesario para enfriar dicha masa de agua de 30 a 10 grados. Como se ha visto (355) que al fundirse un kilogramo de hielo absorbe 79 unidades de calor,  $x$  kilogramos de hielo absorben  $79x$ , para dar  $x$  kilogramos de agua a cero. Según los datos de la cuestión, debe pasar esta última masa a  $10^\circ$  grados, y absorbe además una cantidad de calor igual a  $10x$  (346). Por otra parte, el calor que cede el agua es igual a  $3138kil.,583 \times (30-10)$ , o  $62771,6$ . Tenemos, pues, la igualdad

$$79x+10x=62771,6, \text{ de donde } x=705kil.,300.$$

LXXXII.

Investigar los kilogramos de vapor de agua que se necesitan para elevar un baño de 246 kilogramos de agua de 13 a 28 grados, sabiendo que el calor latente del vapor de agua es 540.

Sea  $x$  el peso del vapor que se busca, 1 kilogramo de vapor que se condensa para dar uno de agua a 100 grados, cede 540 unidades de calor; luego  $x$  kilogramos cederán  $540 \times x$ ; además, los  $x$  kilogramos de agua que se forman, al enfriarse en seguida de 100 a 28 grados, ceden a su vez un número de unidades representado por  $(100-28)x$  (346). Los 246 kilogramos de agua que constituyen el baño en que se condensa el vapor, al calentarse entonces de 13 a 28 grados, absorben una cantidad de calor igual a  $246(28-13)$ . Tenemos, pues, la ecuación  $540x+(100-28)x=246(28-13)$ , o  $(540+72)x=246 \times 15$ ; de donde  $x=6kil.,029gr$ .

LXXXIII.

Una cuba cilíndrica, de fondo plano y horizontal, tiene 1m,30 de diámetro y 0m,75 de altura interiormente: está medio llena de agua a 4 grados, y se calienta este líquido haciendo que llegue el vapor a 100 grados producido por 5kil.,250 de agua. Dígase la temperatura y el volumen a que llegará el baño así calentado.

Despreciaremos la temperatura de la vasija, y aceptaremos  $1/2200$  como coeficiente de dilatación del agua.

El volumen del agua  $=pR^2 \times A/2=3,1416 \times (0m,65)^2 \times 0m,75/2=497lit.,747$ . Siendo  $q$  la temperatura final, y 540 el calórico de vaporización del agua, resulta (357, prob. V).

$$5kil.,250 \times 540 + 5,250(100-q)=497,747(q-4); \text{ de donde } q=10^\circ,6.$$

El volumen total de agua, después de la condensación, sería, a 4 grados,

$$497lit.,747 + 5lit.,250 = 502,997. \\ \text{A } 0^\circ, \text{ el volumen es, pues, } 502,997/1 + 1/2200 \times 4, \text{ y a } 10^\circ,6, \text{ es} \\ 502,997 \times (1 + 10,6/2200)/1 + 4/2200 = 504lit.,503.$$

LXXXIV.

Suponiendo igual a 540 el calor latente del vapor de agua, determínese la temperatura a que subirán 20 litros de agua a 4 grados, condensando en ella 1 kilogramo de vapor a 100 grados y a la presión de 0m,76.

Sea  $q$  la temperatura final, el calor que cede 1 kilogramo será de 540, y el que emite el agua que resulta de la condensación, será  $100-q$ , y tendremos, pues,  $540+100-q=20(q-4)$ , de donde  $q=34^{\circ},28$ .

LXXXV.

¿Cuántos kilogramos de hielo a  $0^{\circ}$  son necesarios para la liquefacción y descenso a cero de 25 kilogramos de vapor desprendidos de un aparato en el cual el termómetro marca  $100^{\circ}$  y el barómetro 0m,76? Se tiene

$$79x=25 \times 540 + 25 \times 100, \text{ de donde, } x=202\text{kil.},532\text{gr.}$$

LXXXVI.

¿Cuánto vapor de agua, a  $100^{\circ}$ , se necesita para elevar de  $8^{\circ}$  a  $25^{\circ}$  el agua contenida en una cuba cilíndrica de fondo plano, de 1m,25 de radio, y que forme una capa de 0m,75 de altura?

El volumen del agua es  $\pi R^2 A = 3681\text{kil.},562$ . Si se representa por  $P$  el peso buscado, se tendrá

$$540P + (100-25)P = 3681\text{kil.},562(25-8), \text{ de donde } P=101\text{kil.},766.$$

LXXXVII.

Se han mezclado once kilogramos de hielo a  $0^{\circ}$  con  $P$  kilogramos de agua a  $45^{\circ}$ , la mezcla ha tomado la temperatura de  $12^{\circ}$ : se desea saber el peso  $P$ .

Se tiene

$$P(45-12) = 79 \times 11 + 12 \times 11, \text{ de donde } P=30\text{kil.},333\text{gr.}$$

LXXXVIII.

En cierta cantidad de agua a  $14^{\circ}$ , se han condensado 25 kilogramos de vapor de agua hirviendo a la presión ordinaria de la atmósfera, y habiéndose elevado la temperatura del agua a  $61^{\circ},4$ , calcúlese el peso de esta agua, despreciando el calor empleado en calentar la vasija. Se sabe, además, que el calorífico latente del vapor acuoso es 530.

$$P=302\text{kil.},446\text{gr.}$$

▽△

### Problemas sobre los vapores

LXXXIX

En una vasija vacía, de 2lit,02 de capacidad, se ha introducido primero 1 litro de aire seco a la presión de 0m,76, y luego agua en tal cantidad que quedan definitivamente 20 centímetros cúbicos en el estado líquido. Dígase cuál es la presión interior, suponiendo que la temperatura sea de  $30^{\circ}$  al hacer el experimento, y que la tensión máxima del vapor de agua, a esta temperatura, sea de 0m,031.

Reducida la capacidad del globo de los 20 centímetros de agua que en ella quedan en el estado líquido, sólo existen en realidad 2lit.,02-0lit.,020=2lit. Se ha doblado, pues, el volumen de aire, y de consiguiente, su tensión, que era 0m,76, no es más que 0m,38, según la ley de Mariotte. Agregando a esta presión la del vapor, que es de 0m,031, resulta 0m,411, para la presión interior.

XC.

Cierta cantidad de aire pesa 5gr,2, a la temperatura de 0° y presión de 0m,76. Se la calienta a 30° a la presión de 0m,77, permitiéndole que se sature de vapor de agua. Se pide el volumen que entonces ocupará. La tensión máxima del vapor a 30° es 0m,0315, y se tomará 1gr,3 como peso del litro de aire seco a la temperatura de 0° y a la presión de 0m,76.

Pesando 1gr,3, un litro de aire seco, el volumen que corresponde a 5gr,2, es  $5,2/1,3=4$  litros, a 0 grados y a la presión de 0m,76. A 30°, el volumen es, pues,  $4(1+0,00366 \times 30)$ ; volumen que, a la presión de 0m,77, sería  $4 \times (1+0,00366 \times 30) 76/77$ , estando seco el aire. Pero cuando se halla éste saturado de vapor, cuya tensión es 0m,0315, esta tensión, más la fuerza elástica del aire, son las que, en virtud de la segunda ley de las mezclas de los gases y de los vapores (323), equilibran la presión de 0m,77-0m,0315, y de consiguiente, el volumen que se pide es  $4 \times (1+0,00366 \times 30) 76/77-3,15=4\text{lit.},68$ .

#### XCI.

El peso de un litro de aire a 0° y presión de 0m,76, es 1,299, y la densidad del vapor de agua es 5/8 con relación al aire. Bajo este supuesto, se pide cuál es a 30° y a la presión de 0m,77, el peso de un metro cúbico de aire cuyo estado higrométrico es la tensión máxima del vapor a 30° siendo 0m,0315.

Observemos desde luego que siendo la tensión del vapor saturado 0m,0315, esta tensión no es más que los 3/4 de 0m,0315, cuando el vapor se encuentra en el estado higrométrico 3/4. Además, el aire cuyo peso se desea conocer, no se encuentra según la ley de las mezclas (323), a la presión 77, y sí a ésta menos la del vapor, es decir, a la presión

$$(0m,77-3/4, 0m,0315).$$

Por lo tanto, el problema se reduce a investigar el peso de un metro cúbico de aire seco a 30° y a la presión (0m,77-3/4, 0m,0315), después el de un metro cúbico de vapor a 30° y a la tensión 3/4, 0m,0315, y por último, en efectuar la suma de los dos pesos.

1.º A 30° y a la presión 0m,77-3/4, 0m,0315=0m,7464, un metro cúbico de aire seco pesa

$$1293\text{gr} \times 74,64 / (1+30 \text{ a}) 76 [1];$$

2.º A 30° y a la presión 3/4, 0m,0315, un metro cúbico de vapor pesa:

$$1293\text{gr} \times 3,15 \times 5 \times 3 / (1+30 \text{ a}) 76 \times 8 \times 4 [2].$$

Efectuando la suma de las fórmulas [1] y [2], se obtiene para el peso pedido,

$$1293\text{gr} / (1+30 \text{ a}) \times 76 \{ 74,64 + 3,15 \times 5 \times 3 / 8 \times 4 \} = 1169\text{gr},6.$$

Se tienen 3 litros de aire a 30° y a la presión 76, cuyo estado higrométrico es 3/4. Dígase en qué se transformará este volumen de aire, a la misma temperatura y a la misma presión, si se agita con el ácido sulfúrico concentrado, y cuál será el aumento de peso que adquirirá el ácido sulfúrico.

La tensión máxima del vapor a 30° es 0m,0315, y la densidad del vapor con relación al aire es 5/8.

La tensión máxima, siendo 3c,15, al estado higrométrico 3/4, será 3/4 de 3c,15=2c,36; de donde se deduce que los 3 litros de aire húmedo se encuentran a la presión 76-2,36=73,64. Por lo tanto, se trata de investigar en lo que se transformarán los 3 litros al pasar de la presión 73,64 a la de 76, lo cual nos da para el volumen que se busca:  $3 \times 73,64 / 76 = 2\text{lit},906$ .

Respecto al peso de los 3 litros de vapor a 30° y a la presión 2,36, es de

$$1\text{gr},293 \times 2,36 \times 5 \times 3 / (1+0,00367 \times 30) 76 \times 8 = 0\text{gr.},067.$$

▽△

## Apéndice

▽△

### Segunda parte

▽△

#### Problemas escogidos por el autor

I. -¿Cuál será en París la longitud del péndulo, para que cada oscilación dure siete segundos?

De la fórmula  $T = p \sqrt{l/g}$  (59), se deduce  $l = g \times T^2 / p^2 = 9,8088 \times 49 / (3,1416)^2 = 48\text{m},69$ .

II. -¿Cuál es la intensidad de la gravedad en el ecuador, donde la longitud del péndulo, que bate segundos es 0m,991?

La fórmula  $T = p \sqrt{l/g}$  da  $g = p^2 \times l / T^3 = (3,1416)^2 \times 0,991 = 9\text{m},7808$ .

III. -Siendo 7 el peso específico del zinc y 9 el del cobre, ¿qué cantidades de estos dos metales deberán tomarse para formar una aleación que pese 50 gramos, y cuyo peso específico sea 8,2 admitiendo que el volumen de la aleación sea exactamente igual a la suma de los volúmenes de los metales aleados?

Sean  $x$  e  $y$  los pesos de zinc y de cobre pedidos.

Tenemos primero  $x + y = 50$  [1]; y según la fórmula  $P = VD$ , que da  $V = P/D$ , los volúmenes de los dos metales y de su aleación son respectivamente  $x/7$ ,  $y/9$  y  $50/8,2$ ; de consiguiente

$$x/7 + y/9 = 50/8,2 \text{ [2].}$$

Resolviendo las ecuaciones [1] y [2], sale  $x = 17,07$ , e  $y = 32,93$ .

IV. -Un cono de hierro ASB (fig. 601) se introduce en mercurio por su vértice: determínese la relación de la altura del cono inmerso OS a la total CS, sabiendo que la densidad del hierro es  $d$ , y la del mercurio  $d'$ .

Sean  $a$  la altura total SC,  $a'$  la SO,  $R$  y  $r$  los radios CB y KO. El volumen del cono grande es  $pR^2a/3$ , y su peso  $pR^2ad/3$ , según la fórmula  $P = VD$ . De igual manera el volumen del cono sumergido es  $pr^2a'/3$ , y de consiguiente, el peso del mercurio desalojado por el cono de hierro es  $pr^2a'd'/3$ . Pero estos pesos deben ser iguales (98); de modo que, suprimiendo el factor común  $p/3$ , sale  $R^2ad = r^2a'd'$ ; de donde  $a'/a = R^2/r^2 \times d/d'$  [1].

Mas los triángulos BCS y KOS son semejantes, por lo que  $R/r = a/a'$ . Anotando este valor de  $R/r$  en la igualdad [1], resulta

$$a'/a = a^2/a' \times d/d'; \text{ de donde } a^2/a^3 = d/d';$$

y extrayendo la raíz cúbica de ambos miembros, resulta al fin  $a'/a = \sqrt[3]{d^3/\sqrt[3]{d}}$ ; es decir, que las alturas de los dos conos están en razón inversa de las raíces cúbicas de las densidades del cuerpo sumergido y del líquido, sea cual fuere el ángulo en el vértice del cono.

V. -Una regla de platino de 2 metros de longitud se encuentra dividida, por una de sus extremidades, en cuartos de milímetro; y otra regla de cobre de 1m,950 aplicada encima a cero, difiere de ella 0m,050, es decir, 200 divisiones de la regla de platino. Desea conocerse la temperatura común a las dos reglas, cuando sólo difieran 164 divisiones de la de platino, siendo el coeficiente de dilatación de éste 0,00008842, y el del cobre 0,00017182.

La longitud de la regla de platino, que tiene 8000 divisiones, a cero, es

$$8000(1+0,00008842 \times t) \text{ a } t \text{ grados (267).}$$

La regla de cobre, que vale 7800 divisiones, a cero, valdrá a  $t$  grados

$$7800(1+0,00017182 \times t).$$

En fin, las 164 divisiones aparentes, equivalen en realidad a

$$164(1+0,00008842 \times t).$$

Tenemos, pues,

$$8000(1+0,00008842 \times t) - 7800(1+0,00017182 \times t) = 164(1+0,00008842 \times t),$$

de donde  $t = 36/0,0647337 = 556^\circ$ .

VI. -Deseando comparar la intensidad de una lámpara Cárcel con la de una bujía, por medio del fotómetro de Rumford fig. 262, se ve que las sombras tienen igual intensidad en la pantalla, cuando de ella dista 2 metros la bujía, y 4m,74 la lámpara. ¿Cuál será la intensidad de ésta, tomando como unidad la de la bujía?

Siendo  $I$  la intensidad de la lámpara a la unidad de distancia, a la distancia de 4m,74, será  $I/(4,74)^2$  (422); de igual manera la de la bujía, que es 1 a la unidad de distancia, será  $1/4$  a la de dos metros. Pero a estas distancias son iguales las intensidades; luego

$$I/(4,74)^2 = 1/4, \text{ de donde } I = (4,74)^2/4 = 5,617.$$

VII. -Una lámpara y una bujía distan entre sí 3m,15, y siendo 1 la intensidad de la luz de la bujía a la unidad de distancia, la de la lámpara es 5,6: ¿a qué distancia de la lámpara, en la línea recta que une las dos luces, debe colocarse una pantalla para que esté igualmente iluminada por ambas, sabiendo que la intensidad de una luz está en razón inversa del cuadrado de la distancia?

Sea  $x$  la distancia a la cual la pantalla debe colocarse de la lámpara: su distancia de la bujía será 3m,15- $x$ . Ahora bien, la intensidad de la lámpara, que es 5,6 a la unidad de distancia, es  $5,6/x^2$  a la distancia de  $x$ ; y siendo 1 la de la bujía a la misma unidad de distancia, es  $1/(3,15-x)^2$  a la distancia 3,15- $x$ . Pero entonces las intensidades son iguales; luego

$$5,6/x^2 = 1/(3,15-x)^2, \text{ o } (3,15-x/x)^2 = 1/5,6 = 10/56 = 5/28,$$

y extrayendo la raíz,  $3,15-x/x = \pm \sqrt{5/28} = \pm 0,422$ ; de donde se deducen los dos valores  $x = 2m,21$  y  $x = 5m,45$ . El primero corresponde a un punto situado entre las dos luces; y el segundo da un punto en la prolongación de la recta que los une.

VIII. -Delante de un espejo esférico cóncavo de 0m,95 de radio, se coloca, a la distancia de 3m,4, un objeto BD (fig. 282), cuya altura es de 0m,12; determínese la distancia de la imagen al espejo y su tamaño.

Este problema se resuelve por la fórmula  $1/p + 1/p' = 2/R$ , dada en óptica (439), en la cual  $p$  representa la distancia del objeto al espejo,  $p'$ , la de la imagen, y  $R$  el radio de curvatura del espejo. Según el enunciado, tenemos, en centímetros,  $p=340$  y  $R=95$ ; sustituyendo estos 2 valores en la ecuación anterior, resulta  $1/340 + 1/p' = 2/95$ , y quitando los denominadores, se halla

$$95p' + 340 \times 95 = 2 \times 340p', \text{ o } 585p' = 32300, \text{ de donde } p' = 55c,2.$$

Para calcular el tamaño  $bd$  de la imagen, debe tenerse presente lo dicho en el párrafo 441, en el cual se ha visto que los triángulos  $BDC$  y  $Cdb$  (fig. 282) son semejantes, y por lo mismo  $bd/BD = Co/CK$ , de donde  $bd = BD \times Co/CK$ . Por hipótesis, se tiene,

$$BD = 12, CK = p - R = 3m,4 - 0,95 = 2m,45;$$

y según el valor de  $p'$ , resulta  $Co = CA - Ao = 95c - 55c,2 = 39c,8$ , así pues,

$$bd = 12 \times 39,8 / 245 = 1c,95.$$

IX. -Se forma una aleación de dos metales cuyos pesos específicos son  $D$  y  $D'$ : invéstiguese el de la aleación, sabiendo que el volumen de ésta ha sufrido una contracción igual a  $1/m$  de la suma de los volúmenes componentes, y siendo respectivamente  $P$  y  $P'$ , los pesos de los dos metales.

Según la fórmula  $P = VD$ , que da  $V = P/D$ , los volúmenes de los dos metales aleados son respectivamente  $P/D$  y  $P'/D'$ , y la  $m^{\text{ésima}}$  parte de la suma es  $1/m(P/D + P'/D')$ ; de consiguiente, el volumen de la mezcla es

$$P/D + P'/D' - 1/m \times (P/D + P'/D') = (P/D + P'/D')(m - 1/m).$$

Pero, representando por  $d$  el peso específico que se busca, el volumen de la aleación será

$$P + P'/d. \text{ Luego } P + P'/d = (P/D + P'/D')(m - 1/m);$$

de donde se deduce,

$$d = (P + P')DD'/m / (PD' + P'D)(m + 1) \text{ [A].}$$

Si en vez de una contracción de la aleación, surgiese una dilatación, se encontraría, por medio de un cálculo análogo,

$$d = (P + P')DD'/m / (PD' + P'D)(m + 1) \text{ [B].}$$

X. -Habiendo mezclado 18 kilogramos de ácido sulfúrico con 8 de agua, determínese el peso específico de la mezcla, sabiendo que el del agua es 1, el del ácido sulfúrico 1,84; y suponiendo que el volumen de la mezcla ha sufrido una contracción de  $1/32$ .

Con la fórmula [A] del problema anterior sale

$$d = (P + P')DD'/m / (PD' + P'D)(m - 1) = (8 + 18)1,84 \times 32 / 32,72 \times 31 = 1,50.$$

XI. -Se funden a la vez  $P$  kilogramos de un metal cuyo peso específico es  $D$ , con  $P'$ , kilogramos de otro metal que tiene por densidad  $D'$ : siendo  $d$  el peso específico de la aleación, dígame si ha habido contracción o dilatación, indicando el valor del  $1/m$  del coeficiente de ésta o de aquélla.

La fórmula [A] del problema IX, que corresponde a la contracción del volumen de la aleación, resuelta con relación a  $m$ , nos da  $m = (PD' + P'D)d / (PD' + P'D)d - (P + P')DD'$  [C].

La cantidad  $m$ , que es el denominador del quebrado de contracción, es necesariamente positiva, pues si no el coeficiente sería negativo, lo cual carecería de sentido: es preciso para que haya contracción, que se tenga  $(P'D + P'D')d > (P+P')DD'$ , o  $d > (P+P')DD' / (P'D + P'D')$ .

Dividiendo numerador y denominador por  $DD'$ , esta última fórmula adquiere la forma  $d > P+P' / P/P+P'/D'$ , y entonces se la puede interpretar fácilmente. En efecto, siendo  $P+P'$  el peso de la aleación, y  $P/D+P'/D'$  la suma de los volúmenes de los metales aleados, síguese de aquí que la expresión  $P+P' / P/D+P'/D'$  es precisamente el peso específico que tendría la aleación, si no hubiese contracción ni dilatación, según la fórmula  $D=P/V$ . Cuando hay contracción, aumenta el peso específico, de modo que ha de ser  $d > P+P' / P/D+P'/D'$ .

Dedúcese de aquí que, cuando hay dilatación, debe ser  $d < P+P' / P/D+P'/D'$ ; y tal es, en efecto, la condición a que conduce la fórmula [B] del problema IX, si se resuelve con relación a  $m$ .

Si  $d = (P+P')DD' / (P'D + P'D')$ , la fórmula [C] da  $m = \infty$ ; y de aquí la fracción  $1/m = 0$ ; es decir, que no hay contracción ni dilatación.

XII. -Conociendo el volumen de aire  $V$  contenido en el recipiente y en el conducto de una máquina neumática, el volumen  $v$  de uno de los cuerpos de bomba, y representando por  $M$  masa total del aire del recipiente y del conducto, determínese la masa de aire que quedará en la máquina después de  $n$  golpes simples del émbolo, y cuál será su tensión.

Cuando el émbolo sube desde la parte inferior del cuerpo de bomba a su vértice, el volumen del aire  $V$  se hace  $V+v$ , siendo siempre su masa  $M$ . Como la masa de aire sustraída es proporcional al volumen  $v$ , representándola por  $m$  se tiene  $m/M = v/V+v$ , de donde

$$m = Mv/V+v.$$

El aire que queda es, pues,  $M - Mv/V+v = MV/V+v = M'$ .

Se encuentra de la misma manera que la cantidad de aire que se extrae al segundo golpe del émbolo es

$$M'v/V+v = Mv/V+v \cdot V/V+v;$$

al tercero,

$$Mv/V+v \cdot V^2/(V+v)^2;$$

al  $n^{\text{ésimo}}$ ,

$$Mv/V+v \cdot V^{n-1}/(V+v)^{n-1}.$$

Todo el aire extraído después de  $n$  golpes, es por lo tanto,

$$Mv/V+v + V/V+v + V^2/(V+v)^2 + \dots + V^{n-1}/(V+v)^{n-1} \text{ [A].}$$

Como la parte que hay entre paréntesis no es más que una progresión geométrica decreciente, cuyo primer término es 1 y la razón  $V/V+v$ , si se hace uso de la fórmula  $S = a - lr/1-r$  que sirve en álgebra para calcular la suma de los términos de una progresión geométrica decreciente, cuyo primer término es  $a$ ,  $l$  el último y la razón  $r$ , se encuentra que la suma de los términos que hay dentro del paréntesis es  $V+v/v - V/v \cdot V^{n-1}/(V+v)^{n-1}$ .

La fórmula [A] se transforma, pues, en

$$Mv/V+v + V/v - V/v \cdot V^{n-1}/(V+v)^{n-1} = M - M \cdot V^n/(V+v)^{n-1},$$

cuyo segundo miembro representa la masa de aire extraída después de  $n$  golpes de émbolo: la que queda es, por lo mismo  $MV^n/(V+v)^n$ .

Para calcular cuál es entonces la tensión  $f$ , que supondremos fue primero de  $0m,76$ , basta observar, según la ley de Mariotte, que la tensión del aire debajo del recipiente es proporcional a su masa, de modo que  $f/0,76=MV^n/(V+v)^n$ :  $M$ , de donde  $f=76 \times V^n/(V+v)^n$ .

XIII. -¿Cuántos golpes u oscilaciones simples de émbolo,  $n$ , se requieren para reducir de la presión de  $0m,76$  a  $0m,002$ , el aire que se encuentra debajo del recipiente de la máquina neumática, valiendo  $10$  litros el volumen de éste, y  $1$  el de cada cuerpo de bomba?

Esta cuestión se resuelve fácilmente por medio de la fórmula  $f=0m,76 \times V^n/(V+v)^n$  del problema XVI, haciendo en ella  $t=0,002$ ,  $V=10$ , y  $v=1$ , lo cual da  $2/760=(10/11)^n$ , o  $(11/10)^n=380$ . Tomando los logaritmos de los dos miembros, resulta  $n \times l(11/10)=l.380$ ; de donde  $n=l.380/l.11.-l.10=62$ .

XIV. -Se tiene un cubo de plomo de  $4$  centímetros de lado que desea sostenerse en el agua suspendiéndolo de una esfera de corcho. ¿Qué diámetro debe tener ésta para que su empuje de abajo hacia arriba equilibre el peso del cubo de plomo, sabiéndose que el peso específico de este cuerpo es  $11,35$ , y el del corcho  $0,24$ ?

El volumen del cubo de plomo es  $64$  centímetros cúbicos, y de consiguiente, su peso en el aire es  $61 \times 11,35$ , y en el agua  $61 \times 11,35 - 64 = 662gr,40$ .

Si se representa por  $r$  el radio de la esfera de corcho, en centímetros, su volumen, en centímetros cúbicos, será  $4pr^3/3$ ; luego su peso en gramos será  $4pr^3 \times 0,24/3$ . Ahora bien, siendo evidentemente el peso del agua desalojada por la esfera de corcho, en gramos,  $4pr^3/3$ , resulta de aquí un empuje de abajo hacia arriba igual a

$$4pr^3/3 - 4pr^3 \times 0,24/3 = 4pr^3 \times 0,76/3.$$

Este empuje debe ser igual al peso del plomo; luego

$$4pr^3 \times 0,76/3 = 662gr,40.$$

de donde

$$r^3 = \sqrt[3]{1987,20/3,04 \times 3,1416} = 5c,92.$$

de suerte que el diámetro que se pide es de  $11c,84$ .

XV. -Se quiere construir una esfera hueca, de cobre, que, introducida en el agua a  $4^\circ$ , se hunda exactamente la mitad: ¿cuál debe ser la relación del espesor de la pared de la esfera a su radio exterior, siendo éste indeterminado, y valiendo la densidad del cobre  $8,788$ ?

Sea a  $4^\circ$ ,  $R$  el radio exterior y  $r$  el interior: el espesor de las paredes es  $R-r$ , y la relación pedida  $R-r/R$ .

Siendo el volumen exterior de la esfera  $4pR^3/3$ , y el interior  $4pr^3/3$ , el volumen de la pared es  $4pR^3/3 - 4pr^3/3 = 4p/3(R^3 - r^3)$ , y su peso  $= 4p/3(R^3 - r^3) \times 8,788$ . Por otra parte, siendo el del agua desalojada  $1/2 \cdot 4pR^3/3$ , debe resultar, suprimiendo el factor común,  $4p/3$ .

$$(R^3 - r^3) \times 8,788 = R^3/2, \text{ de donde } R^3 \times 16576 = r^3 \times 17576,$$

$$\text{de donde se deduce } R/r = 3 \sqrt[3]{17576/16576} = 1,02.$$

Esta última igualdad da sucesivamente

$$R/1,02 = r/1, \quad R-r/0,02 = R/1,02 \quad \text{y} \quad R-r/R = 2/102 = 1/51.$$

esto es, el espesor de la pared es del radio exterior.

XVI. -Un cilindro de madera de haya flota horizontalmente sobre el agua ([fig. 602](#)): se pide la relación del volumen inmerso con el que sobrenada; sabiendo que el peso específico del haya es 0,852, y el del agua 1.

Teniendo la misma altura  $a$ , los volúmenes cuya relación se busca, sean  $S$  y  $S'$  los segmentos del círculo que les sirven de base, el primero sumergido y el segundo fuera del agua.

El volumen sumergido es  $Sa$ , el otro  $S'a$ , y el total del cilindro  $(S+S')a$ . El peso del cilindro es, pues

$$(S+S')a \times 0,852,$$

y el del agua desalojada  $Sa$ ; luego, según la condición de equilibrio de los cuerpos flotantes, debemos obtener

$$(S+S')a \times 0,852 = Sa; \text{ de donde } S/S' = 1 - 0,852/0,852 = 0,173.$$

XVII. -Estando dividido un tubo capilar en 180 partes iguales, se encuentra que una columna de mercurio que ocupa 25 de dichas divisiones pesa 1gr,2 a cero grados. Queriendo hacer un termómetro con este tubo, se pide el radio interior del depósito esférico, que se le debe soldar para que sus 180 divisiones comprendan 150 grados centígrados.

Supuesto que 25 divisiones del tubo contienen 1gr,2 de mercurio, una sola división comprenderá  $1gr,2/25$ , y las 180 divisiones  $1,2 \times 180/25 = 8gr,64$ . Debiendo comprender estas 180 divisiones 150 grados, es claro que el peso del mercurio correspondiente a un solo grado es  $8gr,64/150$ . Pero como la dilatación correspondiente a un grado no es más que la dilatación aparente del mercurio en el vidrio (273), el peso  $8gr,64/150$  debe ser  $1/6480$  del peso del mercurio contenido en el depósito, peso igual a  $4pR^3 \times 13,596/3$ , siendo  $R$  el radio del depósito, y 13596 el peso específico del mercurio; luego

$$4pR^3 \times 13,596/3 \times 1/6480 = 8,64/150, \text{ de donde } R = 1c,8.$$

XVIII. -¿Cuál es el esfuerzo  $F$  necesario para sostener una campana llena de mercurio e introducida en el mismo líquido, teniendo 6 centímetros su diámetro interior, y su altura  $ab$  ([fig. 603](#)), sobre el nivel del baño, 18 centímetros, y sabiendo que la altura del barómetro es 0m,77?

En el exterior, sostiene esta campana, de arriba hacia abajo, una presión igual al peso de una columna de mercurio que tuviese por base su sección  $cd$ , y por altura la del barómetro; de consiguiente, esta presión es igual a

$$pR^2 \times 0,77 \times 13,596.$$

En el interior, sostiene, de abajo hacia arriba, una presión igual a la atmosférica, menos el peso de una columna de mercurio que tuviese por base su sección, y por altura  $ab$ ; es decir, que la presión de abajo hacia arriba es igual a

$$pR^2 \times (0,77 - 0,18) \times 13,596 = pR^2 \times 0,59 \times 13,596.$$

El esfuerzo necesario para sostener la campana será, pues, igual a la diferencia de estas dos presiones, o a

$$pR^2 (0,77 - 0,59) \times 13,596 = pR^2 \times 0,18 \times 13,596.$$

Haciendo  $R = 3$  centímetros, conforme al enunciado, y efectuando los cálculos en la expresión anterior, resulta  $F = 6kil.,919gr,5$ .

XIX. -Al arrojar una piedra en un pozo, el sonido que produce la piedra, al chocar con el agua tarda 3 segundos en percibirse después de soltada aquélla: se pide la profundidad del agua, sabiendo que el sonido recorre 337 metros por segundo.

Representemos por  $v$  la velocidad del sonido, por  $x$  la profundidad del pozo hasta el agua, y por  $T$  el tiempo que transcurre entre el principio del descenso y la percepción del sonido.

$$\text{De la fórmula } e=1/2gt^2 \text{ (55), se deduce } t=\sqrt{2e/g}=\sqrt{2x/g};$$

que es el tiempo que emplea en su descenso la piedra.

Para averiguar el tiempo que necesita el sonido para llegar al observador, nótese que, siendo  $v$  el espacio que recorre por segundo, necesitará para atravesar el espacio  $x$  tantos segundos como veces  $v$  contenga  $x$ , es decir,  $x/v$ .

$$\text{Por lo tanto, tendremos } \sqrt{2x/g}+x/v=T, \text{ o } \sqrt{2x/g}=T-x/v;$$

de donde

$$2x/g=T^2-2Tx/v+x^2/v^2.$$

Quitando los denominadores y trasponiendo, queda

$$gx^2-2v(v+gT)x+v^2gT^2=0.$$

Resolviendo,

$$x=v/ggT+v\pm\sqrt{v(2gT+v)}.$$

Reemplazando  $v$ ,  $g$  y  $T$  por sus valores, se encuentra

$$x=337/9,819,81\times 3+337\pm\sqrt{337(2\times 9,81\times 3+337)},$$

de donde resulta:

$$x=337/9,81(366,43\pm 365,24);$$

lo cual da las dos soluciones  $x=25134\text{m},9$  y  $x=40\text{m},8$ . La primera es inadmisibile, porque representa un espacio mayor que el que recorre el sonido en 3 segundos. Ésta es una *solución extraña*, debida a la elevación al cuadrado del radical  $\sqrt{2x/g}$  en la ecuación del problema. La profundidad del pozo es, pues, de 40m,8.

FIN DE LOS APÉNDICES.

2010 - Reservados todos los derechos

Permitido el uso sin fines comerciales

---

[Facilitado por la Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes](#)

Sútese como [voluntario](#) o [donante](#) , para promover el crecimiento y la difusión de la [Biblioteca Virtual Universal](#) [www.biblioteca.org.ar](http://www.biblioteca.org.ar)

Si se advierte algún tipo de error, o desea realizar alguna sugerencia le solicitamos visite el siguiente [enlace](#). [www.biblioteca.org.ar/comentario](http://www.biblioteca.org.ar/comentario)



**editorial del cardo**