

SEPTIEMBRE 1984 6 francos franceses (España: 150 pesetas)

El Correo de la unesco



**Historia
del Universo**



Foto © IPS, Paris

La hora de los pueblos

27 Espacio extraterrestre

Icaro sentado

En el quinto día de una histórica misión espacial de una semana que comenzó el 3 de febrero de 1984, se realizó el sueño de Icaro cuando un hombre se remontó solo en el espacio, a 280 kilómetros de la Tierra, sin necesidad siquiera de una cuerda salvavidas que le sujetara a la nave espacial que le condujo a tal altura. En ese vuelo primero, de doce minutos de duración, el astronauta se apoyó únicamente en una "mochila" especial, como en una suerte de sillón que hubiera perdido sus patas delanteras. Esta Manoeuvring Unit (MMU), como se la llama (y cuya traducción aproximada sería

Sistema de Propulsión Individual), está propulsada por chorros de nitrógeno comprimido gracias a unos controles instalados en los brazos del "sillón". El desarrollo de las MMU crea inmensas posibilidades para la realización de toda una serie de actividades nuevas en el espacio. Para comenzar, otra misión, utilizando las MMU, ha logrado ya reparar en el espacio un desperfecto del satélite de investigaciones científicas Solar Maximum, prolongado así el funcionamiento del aparato que comunica a la Tierra observaciones sobre el Sol.

LA "Historia del Universo" a la que está dedicado el presente número entraña al mismo tiempo una invitación y un desafío a nuestros lectores. Por una parte, les invitamos a acompañarnos en un viaje de exploración por el Universo, en un recorrido que va desde el corazón del átomo hasta los límites más remotos del espacio, desde los comienzos del tiempo hasta la eternidad. Por otra, les desafiamos a dar rienda suelta a su imaginación a medida que entremos en el reino de lo invisible, de lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño.

Isaac Newton, ese gigante de la ciencia, no fue la primera persona que vio caer una manzana al suelo. Pero sí fue el primero en dar el audaz salto imaginativo que le permitió advertir que la caída de una manzana y el movimiento de la luna en torno a la Tierra obedecían a la misma fuerza: la de la gravedad. Sin embargo, al preguntársele a ese respecto, Newton confesó que aunque sabía cómo actuaba la gravedad, no *comprendía* realmente su funcionamiento. De modo que aquellos lectores a quienes los descubrimientos de este viaje les parezcan difíciles de comprender en su totalidad se encuentran en muy buena compañía.

Gran parte de la ciencia se refiere a cosas o fenómenos que no podemos ver: la gravitación, las partículas subatómicas, las ondas luminosas, el núcleo de una estrella, las galaxias situadas en el espacio más remoto. Sin embargo, la curiosidad humana acerca del origen y del futuro del Universo nos arrastra indefectiblemente a explorar tales misterios.

Al tratar de establecer un balance de la situación en que nos encontramos actualmente en lo que respecta a esa búsqueda sin término, o sea de trazar un panorama de lo invisible, nos vemos obligados a emplear el lenguaje del mundo "visible" de todos los días. Al igual que los poetas debemos recurrir a la metáfora y a la tropología. Por tal razón invitamos a nuestros lectores a llevar consigo su imaginación en este viaje de descubrimiento.

Cuando era todavía un adolescente en la ciudad de Berna, otro gigante de la ciencia, Albert Einstein, se preguntó a sí mismo: "¿Cómo se vería el mundo si cabalgara yo en un rayo de luz?". De esta pregunta inocente pero imaginativa surgió toda la física moderna y la mejor explicación de que disponemos hasta hoy día sobre los orígenes del Universo.

Einstein buscaba explicaciones pero jamás dejó de maravillarse ante la prodigiosa música de las esferas. Y no veía conflicto alguno entre los descubrimientos de la ciencia y las profundas interpretaciones cosmológicas de las diversas religiones del mundo. Un día escribió que "lo que el mundo tiene de eternamente incomprensible es su comprensibilidad".

Venid pues con nosotros, mientras vamos tratando de colocar hitos en el camino hacia la comprensión de nuestro Universo, hacia un panorama infinito de profundo deleite.

Nuestra portada: La nebulosa austral de la Carena, una de las maravillas del firmamento.

Jefe de redacción: Edouard Glissant

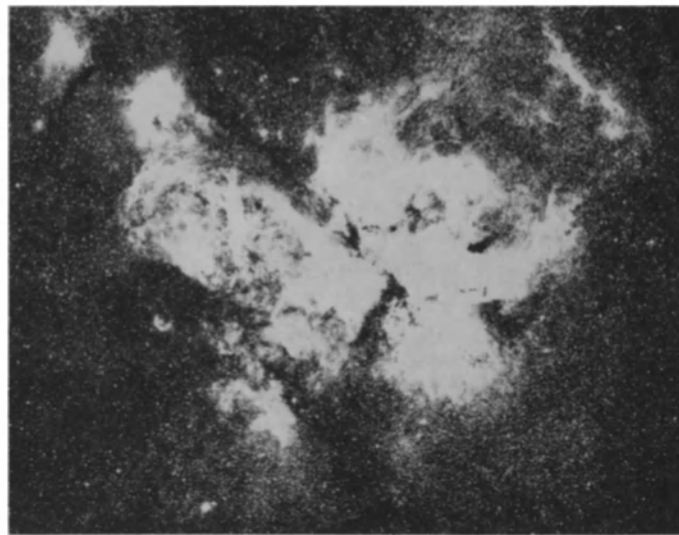


Foto © Royal Observatory, Edimburgo

- 5 El Big Bang**
La gran explosión que originó el Universo
por John Gribbin

- 8 Lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño**
por Dimitri Nanopoulos

- 13 El Big Bang, ¿una especulación teórica?**
por Jayant Narlikar

- 16 La desviación hacia el rojo y el efecto Doppler. La ley de Hubble**

- 17 Galaxias y cuántares**
por Nigel Henbest

- 19 El gran circo celeste**
por Nigel Henbest

- 20 Vida y muerte de una estrella**
- 21 Gigantes rojas y enanas blancas**
- 22 Supernovas, estrellas de neutrones, púlsares y agujeros negros**

- 23 La escala del cosmos**

- 25 La estructura del Universo**
por Yacov Borisovich Zeldovich

- 27 Los canales de Marte**

- 28 La formación de los elementos**

- 31 La vida, una fatalidad cósmica**
por Carl Sagan

- 36 Un telescopio en el espacio**
por Albert Ducrocq

- 38 Glosario**

- 2 La hora de los pueblos**
ESPACIO EXTRATERRESTRE: Icaro sentado

Revista mensual
publicada en 27 idiomas
por la Unesco,
Organización de las Naciones Unidas
para la Educación, la Ciencia
y la Cultura
7, Place de Fontenoy, 75700 París.

Español
Inglés
Francés
Ruso
Alemán
Arabe
Japonés

Italiano
Hindi
Tamul
Hebreo
Persa
Portugués
Neerlandés

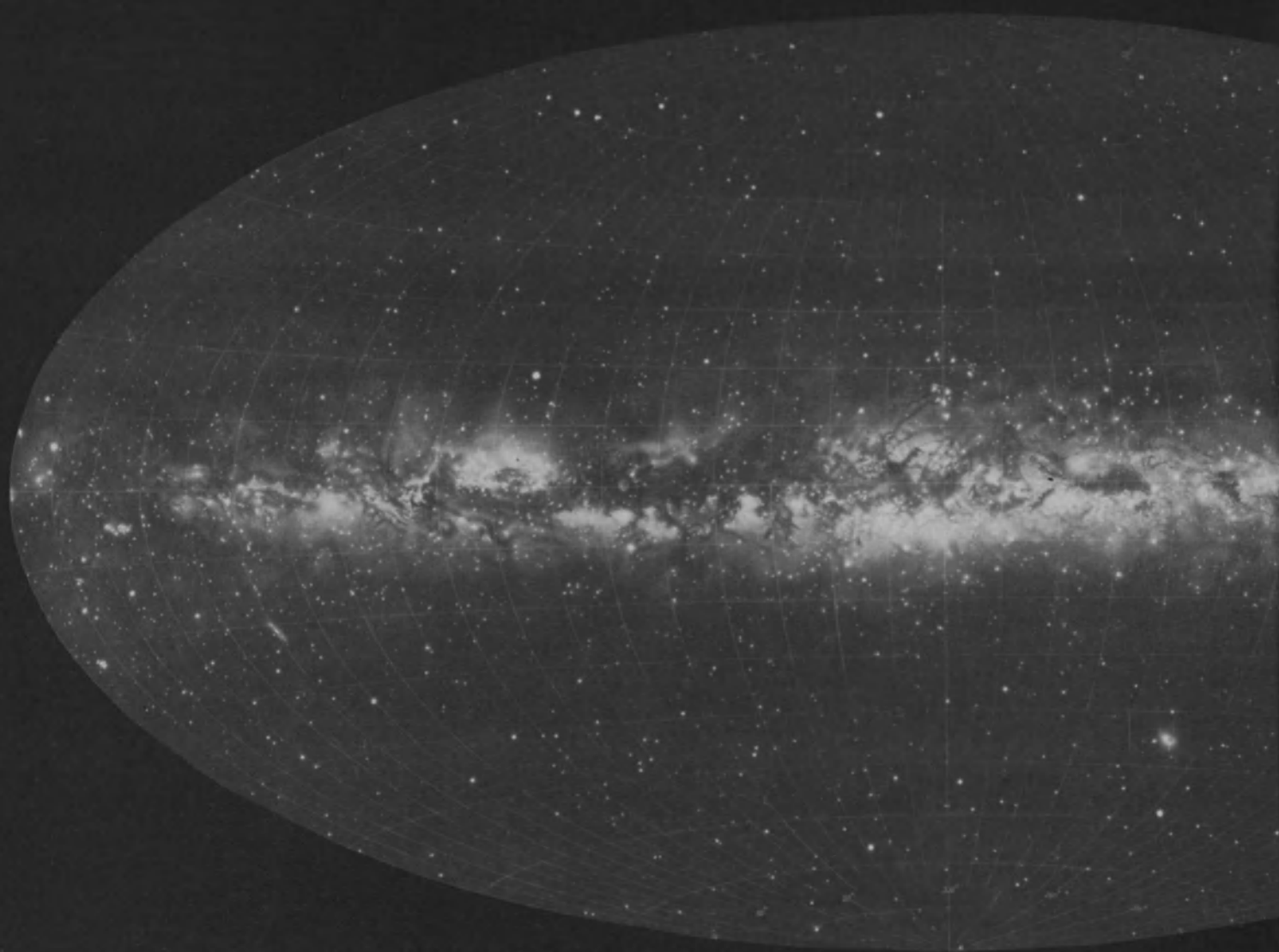
Turco
Urdu
Catalán
Malayo
Coreano
Swahili
Croata-servio

Esloveno
Macedonio
Servio-croata
Chino
Búlgaro
Griego

Se publica también trimestralmente
en braille, en español, inglés, francés
y coreano.

ISSN 0304-310 X
Nº 9 - 1984 - OPI - 84 - 3 - 414 S

La gran explosión que originó el Universo



El Big Bang

por John Gribbin

La Vía Láctea

Fotomontaje de nuestra galaxia, vista de canto, tal como aparece a los ojos de un observador de nuestro sistema solar.

¿Dónde venimos? La cuestión fundamental que campea en toda la ciencia es la relativa al origen último del Universo en que vivimos, y cabe afirmar que el mayor logro de la ciencia radica en que es capaz de dar respuesta a esa cuestión, aun no con total precisión pero sí ya con exactitud suficiente para satisfacer casi al más riguroso de los inquiridores.

La imagen que hoy tenemos del Universo es la de algo en expansión. Cúmulos de galaxias se van separando entre sí a medida que el espacio entre ellas se expande o dilata; ello no puede sino significar que hace mucho tiempo esas galaxias se hallaban más cercanas unas de otras. La conclusión a que se llega es que en un determinado momento, que puede calcularse *grosso modo* en 15.000 millones de años, toda la materia y la energía del Universo se concentraba en un punto matemático desde el cual estalló y se expandió para crear el Universo tal y como lo conocemos actualmente. A ese estallido se le ha dado el nombre de "Big Bang" (literalmente, "gran detonación" o "gran estampido").

El Universo del Big Bang se nos presenta hoy como algo que cambia y evoluciona. Y, sin embargo, hasta comienzos de los años 20 los astrónomos creían que el Universo era constante e inmutable. Se pensaba por entonces que las estrellas que forman la Vía Láctea eran el Universo y que, si bien determinadas estrellas podían nacer, vivir y extinguirse, la Vía Láctea en sí misma continuaba más o menos inalterable, exactamente igual que un bosque permanece prácticamente inalterable aunque determinados árboles nazcan, vivan y mueran. Con tal imagen de estabilidad acabó en el decenio de los 20 una combinación de progresos teóricos y de observaciones.

La teoría venía de Albert Einstein: era su Teoría General de la Relatividad, dada a conocer en 1917. La relatividad general describe la naturaleza del Universo, y el Universo en general está dominado por la gravitación. De acuerdo con las ecuaciones de Einstein, la gravitación es concebida como espacio curvo (o, más exactamente, espacio-tiempo) y la cantidad de materia que existe en el Universo determina el grado de curvatura del espacio. En la visión einsteiniana el espacio vacío, o espacio-tiempo, es algo dotado de una vida dinámica propia, curvándose, expandiéndose o contrayéndose de acuerdo con leyes muy concretas. Como todos sus contemporáneos, Einstein creía que el Universo era estático e inalterable. De ahí que le horrorizara descubrir que sus ecuaciones predecían que el espacio-tiempo tenía que estar en expansión —es decir que el Universo debía estar aumentando de tamaño— y "corrigió" esas ecuaciones introduciendo un nuevo término, una "constante cosmológica", para anular la expansión y restablecer la estabilidad. En años posteriores Einstein habló de ello como del mayor error científico que hubiera cometido en su vida.

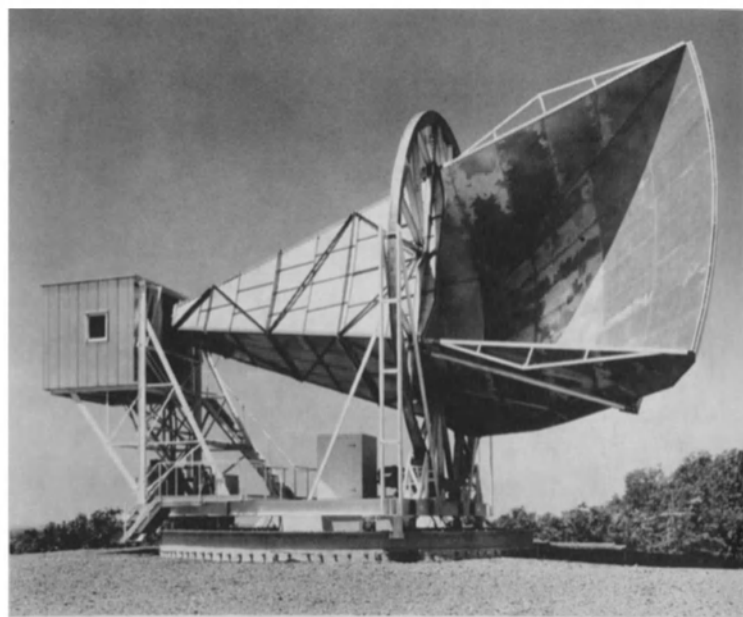
En los primeros años 20 las ecuaciones de Einstein que describían la naturaleza del Universo fueron perfeccionadas por el científico ruso Alexander Friedmann, que en 1922 presentó la serie hoy reconocida de soluciones a las ecuaciones. Los Modelos de Friedmann, como se los llama, ofrecen dos posibilidades fundamentales que siguen siendo hoy la base para nuestra comprensión del Universo. Ambas versiones parten de una singularidad —un estado de infinita densidad— que se va expandiendo para adoptar estados de menor densidad. Pero el espacio es curvo de conformidad con la cantidad de materia existente en el Universo, lo cual conduce a una doble alternativa. Si la materia existente no llega a una cantidad crítica, la expansión deberá continuar eternamente, de modo que los cúmulos de galaxias continuarán apartándose incesantemente entre sí. En tal caso el Universo es un Universo "abierto". Pero, si la materia existen- ▶

JOHN GRIBBIN, astrofísico y divulgador científico británico, ha sido miembro del departamento de Política de la Investigación Científica de la Universidad de Sussex, Inglaterra, y es actualmente asesor en cuestiones de física de la revista *New Scientist*. Es autor de numerosos libros sobre astronomía, geofísica y cambios climáticos, así como de dos novelas. En 1974 recibió el premio a la divulgación científica que acababa de crearse en Gran Bretaña. Entre sus obras de astrofísica cabe citar *White Holes (Agujeros blancos)*, 1977; *Timewarps (La urdimbre del tiempo)*, 1979; *Genesis: The Origins of Man and the Universe (Génesis: los orígenes del hombre y del Universo)*, 1981; y *Spacewarps (La urdimbre del espacio)*, 1983. El Dr. Gribbin ha colaborado en la preparación del presente número de *El Correo de la Unesco* como consultor científico.

El eco del Big Bang

Uno de los descubrimientos más extraordinarios de la época moderna se debió, como sucede a menudo, al azar. Arno Penzias y Robert Wilson, de los Bell Telephone Laboratories de los Estados Unidos, detectaron un extraño ruido radioeléctrico gracias a una gigantesca "trompeta acústica", que era en realidad una antena de bocina de radar de 7 metros, con la que trabajaban en la elaboración de un sistema de comunicaciones por satélite. El ruido parecía provenir por igual de todos los puntos del espacio y no variaba con el curso de los meses pese a que, con la rotación de la Tierra sobre su propio eje y en torno al Sol, la antena se orientaba hacia diferentes puntos del firmamento. Como no podía atribuirse el ruido a ninguna fuente terrestre ni del sistema solar ni de nuestra galaxia, Penzias y Wilson se preguntaron si no podría ser causado simplemente por algún defecto de las instalaciones o por las palomas que dormían en el cuello de la antena. Desarmaron y volvieron a armar el aparato y ahuyentaron a las palomas. Pero el sonido seguía allí, inexplicable, en el receptor de ondas cortas.

Fue entonces cuando Penzias y Wilson oyeron hablar de P.J.E. Peebles, físico de la Universidad de Princeton, quien afirmaba que si el Universo se había originado en un Big Bang se habría requerido una cantidad inmensa de radiación para impedir que las partículas se fusionaran en elementos pesados y que despidieran hidrógeno y oxígeno en cantidad suficiente para formar las estrellas y las galaxias tal como las conocemos hoy día. Peebles agregaba que al expandirse el Universo la radiación tuvo que enfriarse pero que siguió impregnándolo aunque de manera más débil, más "diluída", y que debía de ser posible detectarla a una temperatura superior en unos pocos grados al cero absoluto de la escala Kelvin. Con ello quedaba inmediatamente explicado el origen del ruido de baja frecuencia que venían escuchando nuestros radioastrónomos: la radiación cósmica que llenaba todo



el espacio era un eco distante del Big Bang.

La emoción de los astrónomos al descubrir un fenómeno que parecía confirmar de modo tan concluyente la teoría del Big Bang estuvo atemperada por el hecho irónico de que los radiotelescopios de los años 50 habrían podido detectar esa radiación ambiente de la que se venía hablando ya desde mediados de los años 40, sin que ningún radioastrónomo se interesara en buscarla. Penzias y Wilson recibieron en 1978 el Premio Nobel de Física por su descubrimiento.

► te supera la cantidad crítica, la gravedad resulta suficientemente fuerte para curvar el espacio hasta tal punto que la expansión se detiene primero y después se deteriora de modo que el Universo retorna de nuevo a un estado superdenso. A tal Universo de le califica de "cerrado".

Por la misma época en que aparecían estas nuevas concepciones teóricas, los astrónomos inventaban una serie de grandes telescopios que escudriñaban la naturaleza del Universo y demostraban así la estrechez de sus concepciones anteriores. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es decir la masa de todas las estrellas visibles en el cielo nocturno, aparecía ahora como un grupo de estrellas entre otros muchos existentes en el Universo. De la Vía Láctea forman parte miles de millones de estrellas, un inmenso rebaño de cuerpos celestes que forman un disco aplastado como una isla en el espacio; pero el Universo contiene otros muchos millones de galaxias como la nuestra, separadas entre sí por trechos perfectamente vacíos de espacio intergaláctico. Los descubrimientos capitales en relación con la naturaleza de esos objetos se consiguieron gracias a una serie de telescopios instalados en cimas montañosas de California: el reflector de 60 pulgadas de Mount Wilson, terminado en 1908; el de 100 pulgadas instalado en el mismo observatorio en 1917; el de 200 pulgadas de Mount Palomar construido en 1948. Edwin Hubble, que trabajó a partir de 1919 en el observatorio de Mount Wilson, comenzó demostrando que numerosas manchas de tenue luz visibles en el cielo podían descomponerse en enorme número de estrellas que formaban otras tantas galaxias más allá de la Vía Láctea. Pero después hizo un descubrimiento aun más espectacular, al comprobar que las galaxias remotas presentan en su espectro una desviación sistemática o *corrimiento hacia el rojo*, desviación que es proporcional a la distancia de cada galaxia respecto de nosotros.

Este corrimiento hacia el rojo entraña literalmente un desplazamiento de características en el espectro visible desde su posición normal hacia el extremo rojo del mismo. Ello se interpreta como un alargamiento de las ondas luminosas puesto que la luz

roja se sitúa en el extremo de ondas largas del espectro visible (la luz azul tiene unas longitudes de onda más cortas; una compresión de las longitudes de onda produciría una desviación hacia el azul). Tal fenómeno sólo puede tener una explicación plausible. La longitud de onda de la luz se alarga porque la remota galaxia se aleja de nosotros, exactamente igual que el sonido de la sirena de un coche de la policía o de una ambulancia se vuelve más grave si el vehículo se aleja a toda velocidad de nosotros. El descubrimiento hecho por Hubble en los años 20 de que la desviación hacia el rojo es proporcional a la distancia corresponde exactamente al efecto previsto por los modelos de Einstein-Friedmann, ese efecto del que Einstein trató de desembarazarse con su constante cosmológica. Ello no significa que nuestra galaxia se halle situada en un lugar especial en el centro del Universo, de modo que todos los demás objetos celestes se aparten de ella, ya que esas remotas galaxias nos "verán" a nosotros como apartándonos de ellas. El movimiento es relativo. Imaginemos un globo pintado de manchas de color en el momento de ser hinchado. Cada mancha "ve" a las demás alejándose a una velocidad proporcional a la separación respectiva entre una y otras, pero en realidad ninguna de las manchas se mueve por la goma de la envoltura del globo. La ley de Hubble venía a demostrar que el Universo está hecho de la misma manera: el espacio vacío, el espacio-tiempo de Einstein, se expande y, al expandirse, separa cada vez más a las galaxias, aunque estas mismas no se muevan por el espacio.

Los astrónomos llegaron a la plena comprensión intelectual de este fenómeno en los años 30 y durante tres decenios dedujeron de ello que el Universo debió de tener un comienzo concreto a partir del cual se inició la expansión universal. Pero hasta los años 60 no cobró mayor concreción e inmediatez este abstracto concepto intelectual. El Big Bang era un concepto abstracto, manifiestamente alejado del mundo tal cual es hoy. No podía verse ni sentirse ni tocarse, y no parece que los astrónomos estuvieran sólidamente convencidos de lo acertado de la idea. Pero he aquí que en 1964 Arno Penzias y Robert Wilson, que trabaja-

ban en los Bell Telephone Laboratories de Estados Unidos, descubrieron la prueba "tangible" del Big Bang.

Ambos habían utilizado una antena de radio y un sistema de amplificación muy sensibles para estudiar débiles señales de radio reflejadas por los satélites Echo. Se les ocurrió entonces emplear ese equipo tan sensible para investigar el tenue rumor radiofónico de la Vía Láctea y cuál no sería su sorpresa al detectar una débil pero uniforme señal que provenía de todos los puntos del espacio. El espacio —el Universo— parecía lleno de ondas de radio muy débiles, dotadas de una energía equivalente a 3 K (el cero en la escala Kelvin de temperaturas es $-273,15^{\circ}\text{C}$). Se trata de una señal muy débil según las normas ordinarias, pero si todo el espacio está lleno de ella la energía que representa en conjunto es enorme. ¿De dónde venía esa señal? P.J.E. Peebles, un teórico de la Universidad de Princeton, que trabajaba a escasos kilómetros de Penzias y Wilson, dio pronto con la respuesta. Esa débil radiación de fondo de 3 K debía de ser el eco del Big Bang mismo, el último vestigio de la bola de fuego de que nació el Universo.

La explicación es sencilla. Cuando el Universo surgió del Big Bang, estaba muy caliente y lleno tanto de energía como de materia. Al expandirse el espacio, se expandió también la radiación, de modo que el espacio ha estado siempre lleno de esa energía electromagnética. Pero, a medida que el espacio se ensanchaba, la energía se atenuaba progresivamente. Disminuía la densidad de la energía y lo mismo ocurría con su temperatura. Hoy la temperatura de la radiación de fondo es exactamente la que corresponde al grado de expansión que se ha producido desde el Big Bang, y no existe ninguna otra explicación sería del descubrimiento realizado por Penzias y Wilson. Tras ese descubrimiento, los astrónomos tuvieron que meterse bien en la cabeza que el Big Bang era algo real, y no una interesante sutileza de las ecuaciones matemáticas. Penzias y Wilson obtuvieron en 1978 el Premio Nobel por su descubrimiento, lo que puede dar una idea de las repercusiones que había tenido en los círculos científicos.

El descubrimiento de la radiación cósmica de fondo reavivó el interés por el Big Bang. ¿Cómo, se preguntaban los astrónomos, pudo una bola ígnea superdensa y supercaliente de energía expandirse y convertirse en el Universo que vemos en torno nuestro, en el que las estrellas se agrupan en galaxias que se alejan lentamente unas de otras en un océano di-

"Taquiografía" matemática

Cualquier discusión sobre el Universo y la física de las partículas supone manejar distancias y cantidades extremadamente grandes o pequeñas. De ahí que necesitemos una forma de "taquiografía" para expresar los números sobremedida elevados que en esta materia se emplean. Por ejemplo, diez veces diez veces diez —o sea mil— se expresa gráficamente con la cifra 10^3 , un millón se escribe 10^6 y 10^{14} significa cien billones. Un método similar se emplea para expresar distancias o cantidades infinitesimales. Por ejemplo, uno dividido por un millón —es decir una millonésima— se escribe 10^{-6} . El radio de un átomo tiene unos 10^{-8} de centímetro.

latable de espacio-tiempo? Desde hace mucho la expansión o dilatación universal es un hecho probado ; podemos tomar la temperatura del Big Bang mismo y sabemos que el origen del Universo fue una bola de fuego que existía hace 15.000 millones de años.

Eran estos unos descubrimientos sensacionales para las generaciones anteriores. Pero en los últimos diez años se han realizado progresos aun más espectaculares, gracias no a los astrónomos sino a los especialistas en física de las partículas cuyo trabajo con aceleradores gigantes como los de la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN) de Ginebra les ha permitido explorar el mundo de las grandes energías. A decir verdad, no podemos retornar al instante de la creación, cuando el Universo era infinitamente denso e infinitamente energético y ocupaba un punto matemático con volumen cero. Pero los teóricos pueden acercarse bastante a él. Según ellos, su comprensión del Big Bang ha llegado a un punto en que pueden explicar cómo un objeto diminuto, un Universo que contenía toda la energía de nuestro mundo acumulada en el volumen de un protón, estalló hasta convertirse en el Universo que hoy conocemos.

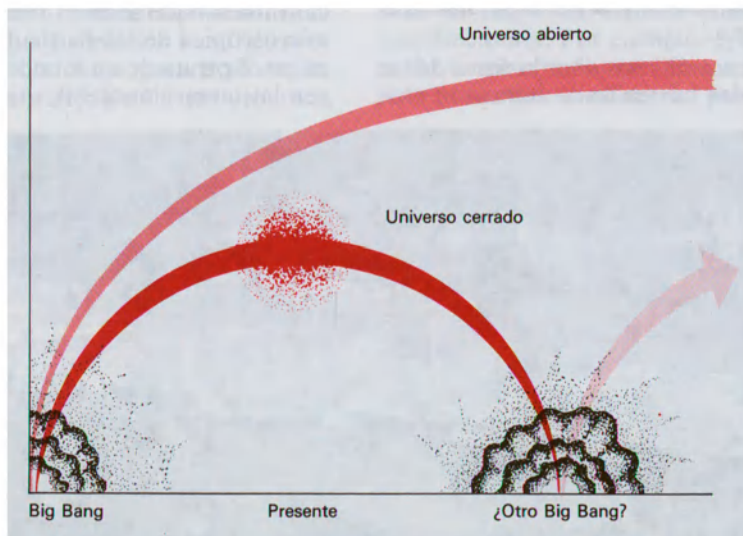
J. Gribbin

El destino del Universo

Si aceptamos, como la mayoría de los físicos de hoy (una teoría diferente se expone en el artículo de la pág. 13), que el Universo comenzó con el Big Bang y que sigue expandiéndose, ¿podemos deducir cómo terminará? Aparentemente existen dos posibilidades y resulta difícil escoger entre ellas. Todo

depende de la cantidad de materia que haya en el Universo. Así como nuestro sistema solar y todas las galaxias se mantienen unidos por la fuerza de la gravitación, así la masa total del Universo ejerce una atracción constante entre todos sus componentes. A medida que aquél se expande, impulsado

por la fuerza explosiva del Big Bang, esa atracción gravitatoria disminuye. Pero si hay en el Universo materia suficiente para que la gravitación supere a la expansión, ésta disminuirá gradualmente hasta cesar. Entonces todo el proceso se invertiría, como una película que se proyectara hacia atrás: el Universo se contraería cada vez con mayor rapidez mientras la fuerza de gravitación aumentaría hasta el punto de volver a contraerse en otra bola superdensa de fuego, sea para extinguirse definitivamente, sea para expandirse en otro Big Bang (Universo cerrado). Pero si la masa total del Universo es insuficiente para que la fuerza gravitatoria predomine, la expansión de este continuará para siempre (Universo abierto). Los especialistas en cosmología han tratado de calcular la masa universal total midiendo la cantidad de materia que existe en el espacio "visible". Pero, curiosamente, de sus cálculos se desprende que la masa total aproximada del Universo es de un orden tal que se sitúa en la zona crítica que media entre aquellas dos posibilidades. Cabe pues decir que el destino del Universo hace equilibrios en el filo de una navaja.



Lo infinitamente grande

Foto © Observatoire de Paris



Nebulosa espiral (M81) de la Osa Mayor.

HASTA hace poco los especialistas en física de las partículas se ocupaban esencialmente de la estructura de la materia y de las leyes fundamentales de la naturaleza, con distancias excesivamente pequeñas, del orden de 0,000000000001 de centímetro (10^{-13} cm) o menores aun. Por su parte, los astrónomos y los astrofísicos trataban de comprender la estructura a gran escala del Universo, lo que suponía pensar en términos de distancias medidas en años-luz (la distancia que la luz recorre en un año a 300.000 kilómetros por segundo). Cabe pues decir que las relaciones entre estas dos ramas activas de la física eran casi inexistentes.

Sin embargo, tal situación ha cambiado enteramente en los últimos años: con el desarrollo de la teoría del Big Bang sobre el origen del Universo (véase el artículo de la pág. 5) las primeras fracciones de segundo después del nacimiento de aquel se han convertido en el punto de intersección entre lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño*.

A fin de entender esta cuestión debemos recordar dos principios fundamentales de la física: primero, que las altas

* El profano tiende a representarse el Big Bang en términos de una masa de materia infinitamente densa (que los científicos llaman "singularidad"), situada en un vacío infinito, que estalla súbitamente. Sin embargo, Einstein ha demostrado que tanto el espacio como el tiempo (que él llama espacio-tiempo) y la materia son inseparables. Por tanto, el Big Bang creó no solamente materia sino también espacio-tiempo. No había nada "afuera", ni siquiera el espacio vacío, donde el Big Bang hubiera podido producirse.

temperaturas suponen grandes energías de las partículas y, segundo, que de acuerdo con el "principio de incertidumbre", formulado por el célebre físico alemán Werner Karl Heisenberg (1901-1976), se necesitan grandes energías para explorar distancias excesivamente cortas.

Según esta teoría, el Universo llegó a tener en sus comienzos (digamos 10^{-35} de segundo después de que se produjera el Big Bang) temperaturas de más de 10^{28} grados Kelvin. Esto significa que las partículas tenían entonces energía suficiente para actuar recíprocamente entre sí a distancias muy cortas, por ejemplo 10^{-29} de centímetro. El universo primitivo actuaba pues como un inmenso acelerador de partículas.

Hoy día se supone que los principales elementos constitutivos de la materia son los quarks y los leptones. Los átomos, a los que alguna vez se creyó indivisibles, están formados por protones y neutrones (unos y otros pertenecientes a la familia de los bariones) y por un miembro de la familia de los leptones, el electrón. Los protones y los neutrones están formados por quarks.

Estos constituyentes básicos de la materia actúan recíprocamente a través de por lo menos cuatro formas de interacción: la interacción gravitatoria que, por ejemplo, mantiene a la Tierra girando en torno al Sol; la interacción fuerte, que mantiene a los quarks dentro de los protones; la interacción electromagnética, que mantiene al electrón girando en torno al núcleo atómico; y la interacción débil, que provoca la desintegración del neutrón, conocida también con el nombre de desintegración beta.

En estos últimos años la física de las partículas ha realizado inmensos pro-

gresos hacia la simplificación y la profundización de la comprensión de tales fenómenos. En efecto, hoy día parece que el conjunto de interacciones fundamentales observadas pueden ser simplemente manifestaciones diversas de una sola interacción básica, lo que se explicaría mediante una teoría unificada.

Dado que vivimos en un Universo de grandes distancias (es decir de niveles de energía bajos) nos es difícil advertir a primera vista la simetría básica que existe entre esas interacciones, oculta por la diversidad misma de los fenómenos. Sin embargo, si examinamos distancias cada vez más cortas (o sea niveles de energía cada vez mayores) la diversidad de las interacciones disminuye y su simetría se vuelve manifiesta. La analogía entre el hielo, el agua y el vapor puede resultar útil al respecto. Cuando aumenta la temperatura y se pasa del hielo al agua, las partículas adquieren una creciente libertad de movimiento y la simetría del sistema aparece más clara aún cuando se pasa del agua al vapor.

La idea de la unificación no es nueva. El propio Einstein trató inútilmente durante los últimos treinta años de su vida de formular una teoría simple y definitiva que explicara la existencia de toda la materia, de toda la energía y de todas las interacciones presentes en el universo. Hasta su muerte, acaecida en 1955, Einstein siguió trabajando con miras a establecer una unidad entre las fuerzas de gravitación y las electromagnéticas.

El avance decisivo hacia la unificación iba a hacerse en el reino a escala microscópica de las partículas subatómicas. Se trata de un mundo en que rigen la interacción débil, que ocasiona

DIMITRI V. NANOPULOS, griego, es especialista en física teórica de las partículas y en cosmología y miembro de la División de Teoría de la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN), de Ginebra. Es coautor de *Grand Unification With and Without Supersymmetry and Cosmological Implications* (Gran unificación con y sin consecuencias supersimétricas y cosmológicas) que aparecerá en el presente año.

Foto Georg Gerster © Rapho, Paris



y lo infinitamente pequeño

por Dimitri V. Nanopoulos

ciertas formas de desintegración radiactiva, y la interacción fuerte, que aprisiona a los quarks dentro de los protones y los neutrones.

La primera etapa, o sea la unificación de las interacciones electromagnética y débil, se concibió teóricamente en los años 60 antes de que se comprobara experimentalmente el año pasado en el acelerador gigante de la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN), de Ginebra, con el descubrimiento de unas partículas llamadas simplemente W y Z, que transportan la interacción débil.

Debido a las similitudes que existen entre las fórmulas matemáticas que describen las interacciones fuerte y débil, los físicos elaboraron la hipótesis de que ambas habrían podido desprenderse de una misma fuerza que existía en la fase primitiva del Big Bang.

De ahí que el próximo paso hacia el programa de unificación consistiera en explicar cómo entraba en juego la interacción fuerte y tal es el objetivo que persiguen las actuales teorías llamadas de la "Gran Unificación" (TGU). La etapa final del programa de unificación incluirá la gravitación, pero ello no concierne al presente artículo.

De acuerdo con tales teorías la interacción fuerte y la interacción débil deberían unificarse a niveles de energía extremadamente altos, es decir de unos 10^{24} electrón-voltios. Pero aunque disponemos ahora de aceleradores de partículas que nos permiten explorar la interacción débil, parece imposible llegar a obtener un acelerador lo suficientemente potente como para explorar la interacción fuerte. De ahí que debamos

ingeniarnos para buscar pruebas indirectas de la Gran Unificación.

Algunas características de las TGU son de particular importancia en lo que a la primera etapa del Universo se refiere. Una de las consecuencias más extraordinarias es que ellas suponen la inestabilidad de la materia. Dado que antes del desarrollo de las TGU los protones, y por tanto el átomo, y por ende la materia, se consideraban como absolutamente estables, la interacción unificada entraña, según las TGU, la desintegración del protón, tal como la interacción débil provoca la desintegración del neutrón. Parecería pues que toda la materia del universo que conocemos está condenada a destruirse.

Sin embargo, mientras la vida media del neutrón libre es de unos quince minutos, la del protón excede de 10^{30} años, tiempo suficientemente largo para evitar un estallido de pánico en la humanidad si recordamos que la edad actual del Universo es de unos 10^{10} años. Así, por primera vez se ha dado a la "eternidad" una medida cuantitativa (del orden de 10^{30} años). Actualmente se están realizando experimentos destinados a verificar semejante consecuencia extraordinaria de las TGU.

¿Pero qué relación tienen estos intrincados detalles del mundo de las partículas subatómicas con la cosmología? Las pruebas experimentales de la teoría cosmológica del Big Bang son suficientes para convencernos de que ésta puede reflejar algo muy cercano a la realidad. De todos modos, tal teoría deja aun sin respuesta algunas cuestiones fundamentales. Por ejemplo: ¿por qué es el Universo tan homogéneo e isotrópico (o sea que es el mismo por todas



Un átomo de hidrógeno

partes y se expande uniformemente en todas direcciones)? ¿Por qué el Universo, pese a su edad más bien avanzada (10^{10} años), tiene una densidad de energía media tan alta? ¿Por qué parece haber mucha más materia que antimateria? ¿Cómo se produjeron las fluctuaciones de densidad que posteriormente actúan como gérmenes en la formación de las galaxias y de otras estructuras del Universo? Las teorías de la Gran Unificación aportan respuestas satisfactorias a algunas de tales preguntas.

En el primer instante ígneo del Big Bang el Universo era extremadamente caliente y denso y prevalecía esencialmente en él la interacción unificada única. Pero, a medida que se expandía se enfriaba y era cada vez menos denso y, debido a un proceso llamado de "ruptura de simetría", la interacción unificada única comenzó a fragmentarse.

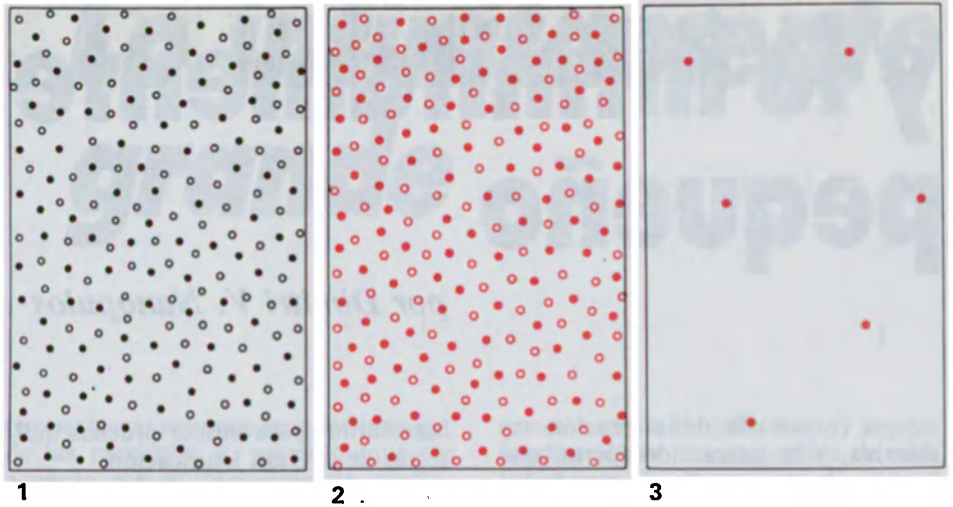
Hay razones para suponer que, tras el Big Bang, todos los tipos de partículas actuaban violentamente entre sí en un momento del llamado equilibrio térmico. Teniendo en cuenta la existencia de este "caldo" de partículas, y suponiendo que las teorías de la Gran Unificación describen correctamente las interacciones de aquellas, ¿podemos construir un modelo que corresponda al universo observable? La respuesta es prudentemente afirmativa. ▶

El principal instrumento que los físicos emplean para explorar el mundo de lo infinitamente pequeño es el acelerador de partículas o "desintegrador del átomo". Se trata de enormes maquinarias en las que se aceleran las partículas atómicas a velocidades fantásticas y se las hace chocar entre sí a fin de que los físicos puedan estudiar los residuos subatómicos. Fue en el acelerador de la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN) de Ginebra, considerado hasta el año pasado como el acelerador más poderoso del mundo—en el cual pueden producirse colisiones de haces de protones y de antiprotones dotados de una energía total de 540.000 millones de voltios—donde se descubrieron recientemente las partículas W y Z que transportan la "interacción débil". En la foto, vista aérea del acelerador lineal de partículas de Stanford, California, de 3.050 metros de largo.



La asimetría cósmica

Los componentes fundamentales de la materia se presentan en parejas iguales. Por cada partícula encontramos una antipartícula de masa idéntica pero con una carga eléctrica diferente. Esta simetría entre partículas, que responde por igual a las exigencias de la teoría de la relatividad y a las de la física cuántica, ha sido ampliamente verificada en el ámbito experimental. Las colisiones de alta energía provocadas en los aceleradores de partículas parecen producir siempre partículas y antipartículas (materia y antimateria) en cantidades iguales. Sin embargo, no es posible encontrar antimateria fuera del laboratorio. Nuestro mundo está compuesto de átomos formados por protones, neutrones y electrones pero jamás por sus antipartículas. Los recientes descubrimientos de la cosmología y de la física de las partículas, que han dado origen a las Teorías de la Gran Unificación (véase la pág. 9) ofrecen una explicación acerca de cómo se produjo esta asimetría entre la materia y la antimateria.



Arriba, el diagrama 1 representa al Universo 10^{-35} de segundo después del Big Bang. En esta etapa existe una simetría entre las "partículas X" superpesadas (puntos negros), producidas por colisiones de energía ultraelevada, y sus antipartículas (círculos negros). El diagrama 2 representa al Universo entre 10^{-34} y 10^{-4} de segundo después del Big Bang. Aquí las "partículas X" se han desintegrado en otras de menor masa de modo que se produce un dese-

quilibrio mínimo entre protones (puntos rojos) y antiprotones (círculos rojos). El diagrama 3 representa al Universo desde 10^{-3} de segundo después del Big Bang hasta hoy. Cada encuentro de un protón con un antiprotón ha conducido a la aniquilación de ambos y sólo ha quedado en el Universo un exceso de protones (uno por mil millones). A este minúsculo desequilibrio debemos la existencia de las galaxias, estrellas, planetas y criaturas del Universo.

▶ A medida que el Universo se expandía y enfriaba llegó a la fase que los físicos llaman de transición TGU en la que las interacciones fuerte y débil se separan y la Gran Unificación ya no es manifiesta. Esto sucedió cuando la edad del Universo era de 10^{-35} de segundo y su temperatura de 10^{28} grados Kelvin.

Se trata de un período de una importancia cosmológica fundamental puesto que durante esa fase de transición —un período de superenfriamiento— el Universo creció exponencialmente de manera breve y explosiva y se expandió a un ritmo mucho más rápido que en cualquiera otra de sus fases. La ventaja de este "esquema de inflación", como suele llamarse, es que explica cómo, en ese período súbito y breve de expansión extremadamente rápida, las diferentes partes del Universo, que estaban demasiado apartadas entre sí como para entrar en contacto causal, llegaron a alcanzar temperaturas análogas. La extraordinaria uniformidad de nuestro gran Universo se debe a que se ha dilatado a partir de una mínima "simiente" uniforme. De esta manera, el modelo inflacionario resuelve el problema de la alta densidad de energía media del Universo y nos indica la forma correcta, cualitativa y cuantitativamente, de las alteraciones de la densidad de energía necesarias para la formación de las galaxias.

El modelo inflacionario nos da también la respuesta a otro problema crucial, a saber: ¿cómo se explica que se haya producido más materia que antimateria en el Big Bang?

Las teorías de la Gran Unificación lo explican mediante la existencia, a las temperaturas sobremanera elevadas de las primerísimas fases del Big Bang, de "partículas X" superpesadas que se fueron desintegrando en partículas de menor masa y que así pudieron producir una mezcla desigual de materia (bariones) y de antimateria (antibariones). En un momento preciso, 10^{-35} de segundo después del Big Bang, la temperatura descendió a un nivel en el que ya no podían formarse más partículas X y se estableció para siempre en el Universo en expansión una ligera asimetría (un barión no apareado por mil millones de pares barión/antibarión). Este pequeño excedente de materia sobre la antimateria fue suficiente para dar origen a todas las estrellas de todas las galaxias y a todos los átomos de nuestros propios cuerpos. Resulta interesante observar que las mismas interacciones que intervinieron en la creación del mundo (asimetría materia-antimateria) son las que lo conducen a su extinción (la desintegración de los protones y, por ende, la inestabilidad de la materia). Tal es el destino del Universo: su autodestrucción. Finalmente tras la fase de transición de la Gran Unificación el Universo comenzó a expandirse y a enfriarse a un ritmo menos rápido y más convencional.

Es en este punto de las investigaciones actuales donde los especialistas en física de las partículas se retiran y dejan a los astrofísicos la tarea de contarnos cómo se fueron formando los elementos pesados, las estrellas, los planetas y

las galaxias. Sin embargo, retrocediendo cada vez más hacia el instante del Big Bang y explorando más profundamente el mundo de lo infinitamente pequeño, los físicos de las partículas proporcionan a los astrofísicos una base para una explicación lógica y coherente de la estructura del Universo. Jamás en la historia de la física la simbiosis entre lo infinitamente pequeño (el microcosmo) y lo infinitamente grande (el macrocosmo) ha sido más feliz ni más fecunda.

D.V. Nanopulos

Página en color

Casi todas las culturas han tratado de explicar los diversos grados de complejidad del origen del Universo. Muchas de ellas lo conciben como la introducción del orden en el caos primitivo mientras que otras se lo representan como la incubación espontánea del "huevo cósmico". Arriba: tres pinturas tántricas provenientes de Kangra, Estado de Himachal Pradesh, en el noroeste de la India. A la izquierda, una representación de la sílaba sagrada AUM, considerada como el mayor de todos los mantras (frases sagradas dotadas de poder místico). La sílaba está compuesta por los tres sonidos que vibraron al comienzo de la Creación. Ellos representan los tres mundos (la Tierra, la atmósfera y el cielo), tres divinidades hindúes (Brahma, Visnú y Siva) y tres textos sagrados de los vedas (Rg, Yajur y Sama), encarnando así la esencia del Universo entero. Al centro, la fuerza de la serpiente Anantanag simboliza la energía cósmica original que crea, sostiene y destruye la estructura total del Universo. A la derecha, el Sol cósmico que con la fuerza de sus rayos da origen al mundo de los fenómenos. Abajo: detalle de un antiguo papiro egipcio (de la dinastía XXI, 1085-945 a.C.) que representa la figura reclinada de Geb, dios de la Tierra, bajo la bóveda celeste simbolizada por el cuerpo arqueado de Nut, diosa del Cielo.





L. J. J.

EL BIG BANG, ¿una especulación teórica?

por Jayant Narlikar

¿QUE sabemos acerca del origen del Universo? Si hoy se hiciera una encuesta en torno a este punto, una gran mayoría de los astrónomos sostendrían la idea de que el Universo nació de una gigantesca explosión que se produjo hace unos 10 o 15 mil millones de años.

Según esta concepción, a la que se conoce generalmente con el nombre de teoría del "Big Bang" (la gran detonación o explosión), en el momento de nacer el Universo era infinitamente denso e infinitamente caliente, pero a medida que se expandió en todas direcciones se fue enfriando y perdiendo densidad. Poco después del Big Bang se formaron con sus restos los elementos fundamentales que más tarde se convertirían en las grandes unidades astronómicas que hoy conocemos con los nombres de estrellas, galaxias, enjambres de galaxias, etc.

Aunque el Universo sigue aun expandiéndose como resultado de esa gran explosión inicial y todas las galaxias continúan alejándose unas de otras, la cósmica brutalidad del primitivo Big Bang ha desaparecido y el Universo ya no es ni muy caliente ni muy denso. Su temperatura general se calcula en unos 270 grados centígrados *bajo cero*, estimándose que un volumen medio de un millón de kilómetros cúbicos contiene solamente más o menos un kilogramo de materia visible.

JAYANT NARLIKAR, indio, es profesor de cosmología en el Instituto Tata de Investigaciones Fundamentales de Bombay y actualmente es colaborador invitado del Observatorio Nacional de Kitts Peak, en Tucson, Arizona, EUA.

Página en color

Los kungs del desierto de Kalaharí, de Botswana, llaman a la Vía Láctea, que en aquella latitud suele estar sobre su cabeza, "el espinazo de la noche". Creen los kungs que la galaxia sostiene en alto la noche, como si el cielo fuera un gran animal en cuyo interior vivimos. En esta metáfora se ha inspirado el pintor Jon Lomberg para su cuadro El espinazo de la noche que se reproduce en la página anterior.

La cosmología es aquella rama de la ciencia que se ocupa de estudiar la estructura en gran escala del Universo, su origen y su evolución. Como otras partes de la astronomía (o de la ciencia en general), la cosmología tiene sus puntos controvertidos y, por lo que la historia nos enseña, no siempre ha prevalecido la opinión de la mayoría. Y es que en última instancia las especulaciones, por populares que lleguen a ser, terminan por ceder el paso a los duros hechos.

La idea del Big Bang, tal como acabamos de exponerla, nació a lo largo de los años a partir de una serie de especulaciones bastante plausibles basadas en un número relativamente pequeño de hechos comprobados. Pero ¿nos cabe la seguridad de que con el Big Bang hemos encontrado al fin la respuesta a la cuestión última que el hombre viene haciéndose desde tiempos inmemoriales? ¿Hemos alcanzado el nivel de complejidad y de sutileza necesario para comprender el origen del Universo?

En este punto las opiniones de los hombres de ciencia difieren. Hay quienes creen que, estando ya a la vista la unificación de todas las fuerzas esenciales de la naturaleza, no está lejos el "fin de la física". Para ellos el problema cosmológico se está aproximando a su solución. Por mi parte, comparto el juicio más pesimista (¿y más realista?) del astrónomo británico Fred Hoyle que en 1970 escribía:

"Pienso que es muy poco verosímil que una criatura que se desarrolla en este planeta como es el ser humano posea un cerebro plenamente capaz de comprender la física en su totalidad. Creo que ello es intrínsecamente improbable, pero, aunque no lo fuera, no me cabe duda alguna de que es tremendamente improbable que hayamos alcanzado tal situación en el año 1970".

Con tales reservas podemos preguntarnos si la idea hoy tan popular del Big Bang es la única explicación plausible del origen y la evolución del Universo.

El descubrimiento de que éste se halla en proceso de expansión lo hizo en

1929 el astrónomo norteamericano Edwin Hubble (1889-1953). Las observaciones originales de Hubble se han vuelto a efectuar posteriormente con mayor exactitud y a mayores distancias, confirmando la idea de que el espacio en el que se hallan enclavadas las galaxias está en expansión. El ritmo de expansión del Universo en una época dada se mide mediante la constante H_0 , más generalmente, constante de Hubble.

Dado que el Universo se está expandiendo actualmente necesitamos una teoría dinámica que nos explique cómo se comportó en el pasado y cómo se comportará en el futuro. La teoría general de la relatividad de Einstein es el modelo más sencillo y más apropiado de que hoy disponemos para tal fin. Los modelos de Universo basados en esa teoría nos conducen a la noción del Big Bang como origen del mismo. De acuerdo con esos modelos, a medida que nuestra investigación retroceda en el tiempo al estudiar la historia del Universo, descubriremos que la densidad de éste y el índice de expansión de Hubble resultan cada vez mayores, de tal modo que en un determinado momento hace un lapso finito de tiempo esas cantidades eran infinitas. Ese es justamente el momento del Big Bang.

En general los físicos se muestran suspicaces respecto de la validez de sus coordenadas teóricas cuando éstas les conducen a infinitudes de este tipo. La teoría de Einstein complica aun más la situación al vincular la densidad y el movimiento de la materia con las propiedades geométricas del espacio y del tiempo. Así pues, en el momento del Big Bang es imposible definir esas propiedades. Esta nulidad total de las descripciones físicas y matemáticas ha hecho que se hable del Big Bang como de una época "singular".

Ahora bien, el surgimiento de esta singularidad es más reflejo de lo incompleto de nuestros conocimientos que descripción de una realidad física.

La época singular se identifica con el origen del Universo. En esa época se ▶

Edad del Universo del Big Bang. Mínimo 6.600

Edad del Universo del Big Bang. Máximo 13.300

Edad de la Tierra 4.600

Edad de las galaxias 15.000

Edad de los cúmulos globulares 18.000

Edades en millones de años

► quiebra la ley de la conservación de la materia y de la energía ya que toda la materia (y la radiación) presente en el Universo tuvo que ser creada en tal momento.

Los cosmólogos definen la edad del Universo como el tiempo transcurrido desde esa época. Tal edad se ha calculado utilizando la recíproca de la constante de Hubble, dicho de otro modo, calculando las cantidades "hacia atrás" para averiguar lo que tardaría el Universo tal como es actualmente en *contraerse* para volver de nuevo a la época del Big Bang.

Aunque las observaciones astronómicas no nos pueden proporcionar hoy día con exactitud el valor de la constante de Hubble, el modelo de Universo que actualmente goza del favor de los cosmólogos y de los físicos de las partículas que trabajan en colaboración nos da un *límite superior* para el tiempo transcurrido desde el Big Bang que se sitúa entre veinte mil millones y diez mil millones de años.

Estos cálculos se basan en un modelo idealizado de Universo vacío. Sin embargo, la presencia de la materia tiende a hacer más lenta la expansión del Universo modelo y a reducir su edad. Si en el Universo real existe bastante materia

para hacer más lenta su expansión hasta alcanzar una fase momentánea de inmovilidad seguida de un movimiento de contracción (como predice la versión más generalmente aceptada de la teoría del Big Bang), en tal caso su edad actual no puede ser superior a los dos tercios de la cifra teórica calculada para el tiempo transcurrido desde la explosión originaria. Dicho de otro modo, la edad del Universo debe de situarse entre los 13,3 y los 6,6 miles de millones de años.

Por grande que sea esta edad en términos humanos, no lo es tanto en escala astronómica. La edad de la Tierra es de 4,6 miles de millones de años. La de la Vía Láctea, nuestra galaxia, se calcula en 10-15 mil millones de años. Las de determinados cúmulos de estrellas, llamados cúmulos globulares, son todavía mayores, de 17 a 18 mil millones de años. Parece pues que si toda la materia se creó en el momento del Big Bang, es sencillamente imposible insertar el nacimiento de esos sistemas astronómicos dentro del lapso de tiempo estimado para aquel.

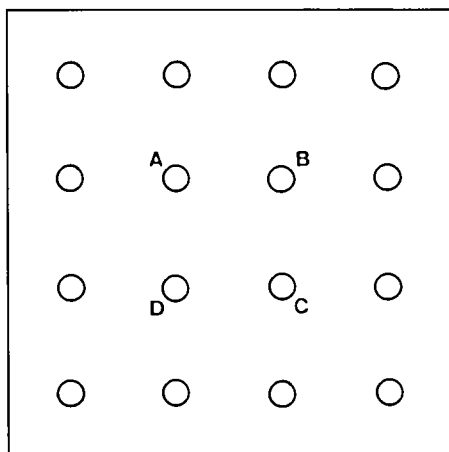
Está claro que estos problemas se plantean como resultado del llamado "origen" del Universo. Pero ¿existen modelos de éste *sin* un origen, modelos

Debido a las dudas que existen actualmente sobre el valor matemático de la Constante de Hubble, se calcula que según la teoría del Big Bang la edad del Universo oscila entre 6.600 millones y 13.300 millones de años. Entre estas dos cifras puede situarse la edad de la Tierra pero no la de las galaxias más antiguas ni la de los cúmulos globulares.

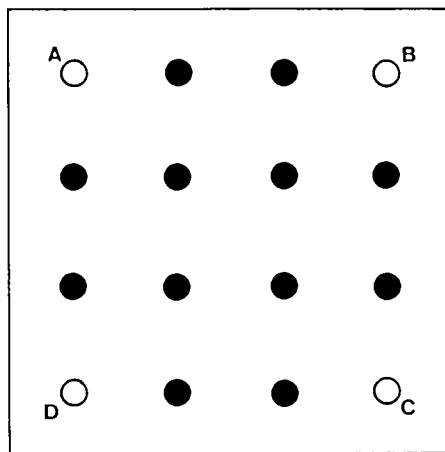
en los cuales el Universo es infinitamente viejo? Para elaborar tales modelos tenemos que ir más allá del sistema, más conservador, de la relatividad general de Einstein.

En 1948 Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle propusieron un nuevo modelo de este tipo al que se dio el nombre de modelo del "Estado Estacionario" y que describía un Universo que está expandiéndose continuamente, sin principio ni fin. Como su nombre indica, la densidad de la materia en dicho modelo se mantiene en una cifra *constante*. Pero ¿cómo puede expandirse un sistema y, sin embargo, conservar la misma densidad? Ello se consigue en el modelo del Estado Estacionario mediante la inyección o introducción ininterrumpida de nueva materia. Es posible dar una formulación matemática del proceso de creación *sin* quebrantar la ley de la conservación de la materia y de la energía.

Pese a sus muchos aspectos interesantes, el modelo del Estado Estacionario sufrió un rudo golpe en su credibilidad con el descubrimiento de un fondo de radiaciones de microondas por Arno Penzias y Robert Wilson. No obstante, ese golpe no parece hoy tan formidable como lo era a fines de los años 60. En realidad, como me propongo mostrar

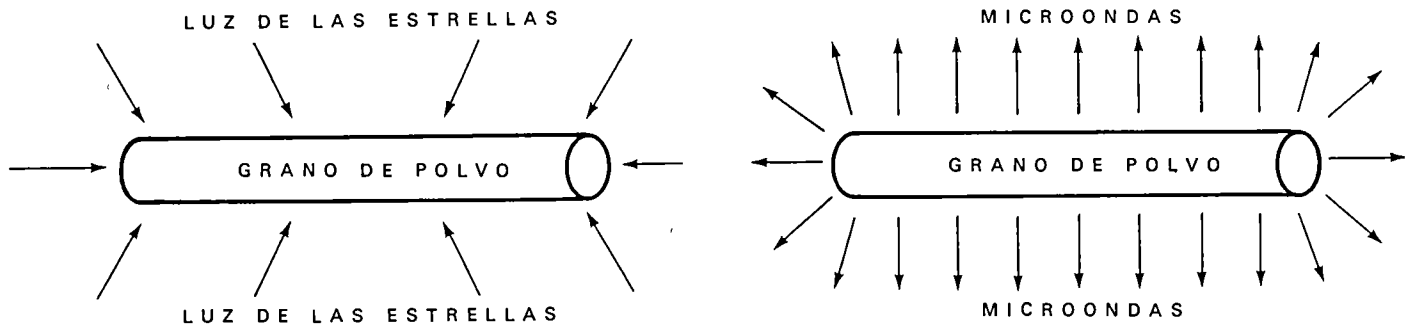


Epoca remota



Epoca más reciente

En el Universo en expansión constante las galaxias (como las señaladas aquí con las letras A, B, C y D) cambian de lugar según se las observe en una época o en otra. Las nuevas galaxias (representadas aquí por los círculos negros) se han ido formando para llenar el vacío creado por la expansión, de modo que el Universo considerado en su conjunto no cambia con el tiempo.



En el espacio intergaláctico pueden formarse delgados granos de grafito de aproximadamente un milímetro de largo. Tales granos pueden absorber la luz de las estrellas y volver a irradiarla en forma de microondas. El "eco" de las microondas puede muy bien ser una forma reciclada de radiación.

más adelante, la interpretación de esta radiación como un resto o vestigio del Big Bang ha tropezado con algunas dificultades inesperadas.

El descubrimiento de Penzias y Wilson fue saludado como la más sólida demostración de que el Universo nació de un Big Bang *caliente*. Las razones en que se basaba tal creencia eran: 1) la radiación observada se distribuye muy uniformemente y no presenta pues la irregularidad y la fragmentación que sería de esperar si procediera de un gran número de fuentes aisladas; y 2) la radiación resultaba tener un espectro muy semejante al del idealizado cuerpo negro. (Un cuerpo negro es un espacio o lugar cerrado que contiene objetos que emiten y absorben radiación continuamente, pero sin que la menor radiación escape de ese lugar cerrado ni penetre en él desde el exterior. La teoría nos indica que un sistema como ese se ajusta a una pauta concreta con una intensidad de radiación dada en longitudes de onda dadas).

Ambas características se consideraban propias de los modelos del Universo basados en el Big Bang. En consecuencia, vino a reconocerse a la radiación como el vestigio de la primera época caliente de la historia del Universo. Pero tal interpretación, ya lo hemos dicho, topaba con algunas dificultades.

Una de ellas radica en que el espectro observado no es *exactamente* el que cabe esperar de un cuerpo negro. Hay ciertas divergencias respecto del espectro de éste que no podemos ignorar. Esto es algo que ya en 1980 señalaron D.P. Woody y P.L. Richards, y la dificultad ha persistido desde entonces.

La segunda dificultad reside en la extraordinaria uniformidad del fondo mismo, lo que se manifiesta de dos maneras. La primera cuestión atañe a la uniformidad en pequeña escala. Si, como se postula, la radiación es el vestigio de una primera fase caliente, debería mostrar alguna huella de los cambios

que el Universo ha experimentado *después* de esa fase. Como señalamos al principio, un cambio importante que se produjo en la composición del Universo fue la formación de las galaxias. Con ello, en la distribución de la materia del Universo se produjeron agrupamientos y cúmulos, lo que tuvo de algún modo que reflejarse en la radiación de fondo. Que la huella de esos agrupamientos y acumulaciones no se haya manifestado tras repetidas investigaciones es algo que debe preocupar a los cosmólogos partidarios del Big Bang.

El segundo punto en que la uniformidad de la distribución de la materia se vuelve problemática es el relativo al *efecto del horizonte*. Cuando escudriñamos el Universo hasta grandes distancias, lo vemos tal como era en el pasado: simplemente porque la luz, gracias a la cual vemos los objetos remotos, viaja a una velocidad limitada. Así, si el Universo tiene una edad de diez mil millones de años, podemos ver objetos situados hasta una distancia de diez mil millones de años-luz (un año-luz es la distancia recorrida por la luz en un año). Sin embargo, el fondo de radiación se formó cuando el Universo tenía apenas 300.000 años de edad. En ese momento las regiones separadas por más de 300.000 años-luz no habrían podido estar en contacto entre sí ya que su medio más rápido de comunicación (el rayo luminoso) no habría podido salvar la distancia entre ellas. Por otro lado, la uniformidad actual en gran escala del fondo de radiación entraña que esas regiones tan apartadas unas de otras tenían una estructura y un comportamiento muy similares. No habiendo como no había contacto físico, ¿cómo se llegó a esa similitud?

Mientras que los cosmólogos del Big Bang se engolfan en sus especulaciones teóricas sobre la primitiva historia del Universo para explicarse esas misteriosas propiedades del fondo de microondas, yo no puedo dejar de pensar que la

solución quizá se sitúe en una dirección completamente opuesta y que, después de todo, el fondo de microondas no sea tal vez un vestigio.

A decir verdad, el Universo está lleno de fondos de radiación en todas las longitudes de onda, desde las ondas radiofónicas hasta los rayos X y los rayos gamma. Sabemos que, con la excepción del fondo de microondas, todas las radiaciones son de origen relativamente recientes y, por tanto, no pueden tener conexión ninguna con la época posterior al Big Bang. ¿Por qué singularizar el caso de las microondas?

En torno a 1970 Fred Hoyle, Chandra Wickramasinghe, V.C. Reddish y otros (incluido quien esto escribe) sostuvieron que la radiación de microondas podía ser una forma reciclada de otra radiación que provendría principalmente de las estrellas. El reciclaje de la radiación podría ser obra de los granos de polvo del espacio intergaláctico, aunque su volumen sea muy modesto. Recientemente N.C. Rana ha formulado con detalle la manera como se produciría ese proceso. A decir verdad, si puede encontrarse en esta dirección una explicación plausible del fondo de microondas, la argumentación en favor del Big Bang y de la cosmología de él derivada se debilita considerablemente y cobra nueva fuerza la teoría del Estado Estacionario.

Esta es *una* de las posibles alternativas originales a la teoría del Big Bang, y si me he referido a ella es para poner de relieve que el problema cosmológico está lejos de haber sido resuelto. Y así como a principios de este siglo el perfeccionamiento de los telescopios permitió al hombre ensanchar su visión del Universo en una dirección inesperada, mi esperanza es que las técnicas de observación de los años futuros coadyuvarán a amplificar y profundizar espectacularmente la visión de los cosmólogos.

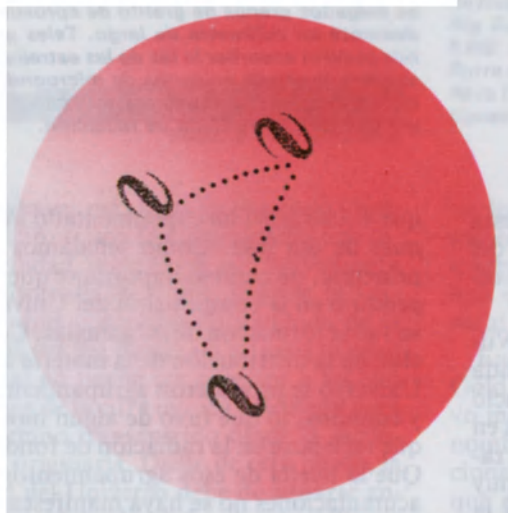
La desviación hacia el rojo y el efecto Doppler

Al igual que Monsieur Jourdain, el personaje central de *El burgués gentilhomme* de Molière, que se sorprendió al enterarse de que había estado hablando en prosa durante toda su vida, cualquier persona que se encuentre en el andén de una estación ferroviaria en el momento en que un tren expreso pasa pitando sin detenerse se sorprenderá al enterarse de que estaba familiarizada con el "efecto Doppler", una de las claves de la cosmología moderna.

Cuando el maquinista hace sonar el pito al acercarse a la estación percibe un sonido de tono constante. Pero para la persona que se encuentra en el andén el pitido aumenta de altura o tono a medida que el tren se acerca y disminuye hacia los tonos graves cuando se aleja. Esto se debe a que el sonido se produce por una sucesión de ondas en el aire: cuando una fuente sonora se aproxima las ondas se contraen y el tono sube; cuando se aleja, las ondas se alargan y el tono baja.

El "efecto Doppler" debe su nombre al del físico austriaco del siglo XIX Christian Doppler, quien descubrió que el fenómeno observado con las ondas sonoras se produce también con las ondas de luz. Cuando un manantial luminoso se aproxima al receptor se produce una variación de la frecuencia, es decir del color. Si la fuente de luz se acerca, las ondas se contraen produciendo un corrimiento de las rayas del espectro hacia el azul (alta frecuencia); si la fuente se aleja, las ondas luminosas se alargan produciendo una desviación de las rayas hacia el extremo rojo del espectro (baja frecuencia).

Fue a comienzos de nuestro siglo cuando el corrimiento hacia el rojo ad-



quirió su verdadera importancia debido a la aplicación del espectroscopio a la astronomía. Los astrónomos comenzaron a estudiar el espectro de las nebulosas. Algunas de estas, como la nebulosa espiral de Andrómeda, mostraban corrimientos hacia el azul, lo que, de conformidad con el "efecto Doppler", indicaba que se estaban desplazando hacia nosotros. Otras nebulosas mostraban corrimientos hacia el rojo, o sea que se alejaban cada vez más. □



El alejamiento de las galaxias entre sí puede compararse al que se observa entre las manchas de un globo de goma cuando se lo infla. En el dibujo, duplicación sucesiva del tamaño del "globo Universo". Los puntos, que representan aquí las galaxias, se alejan unos de otros a una velocidad proporcional a sus distancias.

Dibujo El Correo de la Unesco

La ley de Hubble



Edwin Hubble (1889-1953).

La aplicación del espectroscopio a la astronomía coincidió con la entrada en escena del astrónomo norteamericano Edwin Hubble (1889-1953). Mientras trabajaba en el Observatorio de Mount Wilson, Hubble demostró que muchas supuestas nebulosas eran, en realidad, verdaderas galaxias; elaboró una clasificación de éstas que se utiliza aun hoy día (véase el diagrama) y comenzó a medir las distancias que nos separan de las más cercanas.

Hubble descubrió pronto que las galaxias se hallaban distribuidas de manera más o menos uniforme en el firmamento y que todas ellas, excepto las más cercanas a la nuestra, mostraban un corrimiento hacia el rojo en su espectro. En 1929 anunció que su descubrimiento demostraba que las velocidades de recesión de las galaxias eran proporcionales a sus distancias. Tal fenómeno, prueba evidente de que el Universo se encuentra en expansión,

ha llegado a conocerse con el nombre de "ley de Hubble".

Los progresos alcanzados desde 1929 en la medición de las distancias de las galaxias más cercanas han contribuido a establecer una relación más precisa entre la velocidad de recesión y la distancia, a lo que se ha llamado la "constante de Hubble". Su coeficiente se calcula entre 50 y 100 kilómetros por segundo por megaparsec (3,26 millones de años-luz). En otras palabras, por cada 75 kilómetros de velocidad de recesión, una galaxia se encuentra aproximadamente a una distancia de 3,26 millones de años-luz de nosotros. La constante de Hubble nos explica con qué rapidez se expande el Universo, lo que a su vez nos permite calcular cuándo ocurrió el Big Bang. Sobre esta base podemos estimar que la edad del Universo oscila entre 15.000 millones y 20.000 millones de años. □

Galaxias y quásares

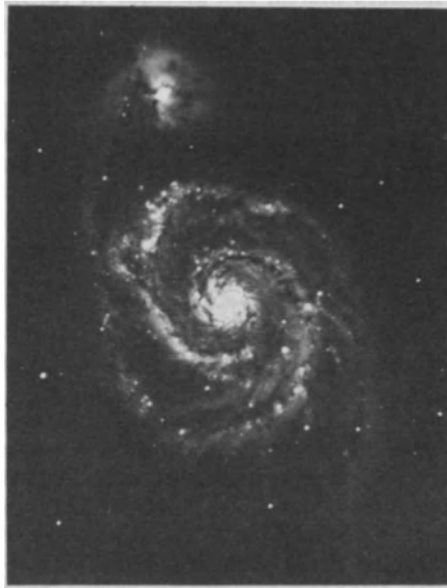
por Nigel Henbest

SEGÚN la leyenda griega, la nacarada cinta que conocemos con el nombre de Vía Láctea y que atraviesa de un extremo a otro el firmamento es leche derramada de los pechos de la diosa Juno. Pero, desde que Galileo pudo escudriñarla con su telescopio, sabemos que en realidad se compone de estrellas. Ella es justamente nuestra "isla de estrellas" y el Sol no es sino una más entre los 100.000 millones de estrellas que forman la celeste Vía, que en español se conoce también con el poético y simbólico nombre de Camino de Santiago. Se trata de la galaxia de la Vía Láctea, a la que a menudo se da por antonomasia el nombre de la Galaxia.

Más allá de la Galaxia, miles de millones de otras galaxias se extienden hasta los límites del Universo observable. Tras decenios de minuciosa observación hoy podemos afirmar que una sencillez básica preside el sistema de las galaxias. Así, se clasifican en tres tipos principales: espirales, irregulares y elípticas. Gracias a las últimas técnicas astronómicas con radio, rayos X y rayos infrarrojos se ha podido comprobar que hay galaxias mucho más violentas y agitadas que las del tipo medio como la Vía Láctea; pero es de recordar que, por muy curiosas que resulten, esas galaxias constituyen una minoría.

Nuestra galaxia es un ejemplo típico de galaxia espiral. El nombre les viene de la bella forma en espiral con dos brazos visible en las fotografías, pero tal apariencia resulta en realidad engañosa. Los brillantes brazos espirales no son más que una zona de la galaxia. Por

NIGEL HENBEST es un divulgador científico británico, consejero en materia de astronomía de la revista *New Scientist*. Antes de dedicarse por entero a la divulgación de la ciencia era radioastrónomo del Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge. El último de sus libros, *The New Astronomy (La nueva astronomía)*, 1983, ha sido escrito en colaboración con Michael Marten.



La galaxia espiral M51, llamada "del Remolino".

lo pronto, hay pruebas suficientes de que la mayor parte de la materia galáctica no se presenta en forma de estrellas, gas y polvo que podamos detectar sino que consiste en cierta materia invisible que llena un inmenso espacio dentro de la galaxia y en torno a ella. La presencia de esta materia oscura sólo se pone de manifiesto por su influencia gravitatoria.

Las estrellas más viejas de una galaxia espiral ocupan un vasto volumen esférico de espacio en torno a la galaxia y se concentran cada vez más hacia su centro. Las regiones exteriores de este halo de estrellas son difíciles de detectar, pero las interiores presentan una especie de protuberancia de color anaranjado en el centro de la espiral.

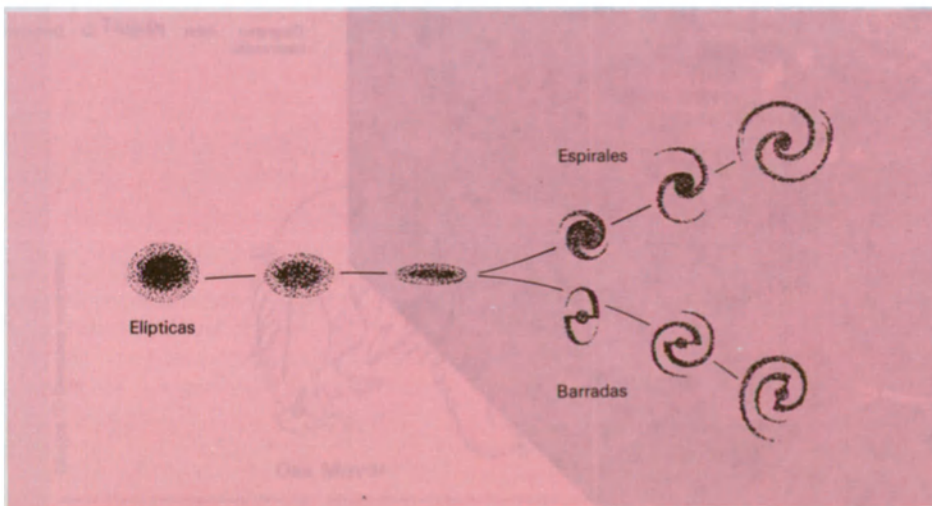
Los brazos de la espiral constituyen las zonas más prominentes de un delgado disco de estrellas que se extiende a partir de la protuberancia central como las anchas alas de un sombrero. Además de estrellas, el disco galáctico contiene tenue gas interestelar, mezclado con diminutas partículas sólidas de polvo interestelar. El gas y el polvo representan aproximadamente el diez por ciento de la masa de las estrellas del disco galáctico y en gran parte se amasan en densas nubes moleculares en las que tiene lugar el proceso de nacimiento de las estrellas.

En gran número de galaxias la forma espiral es el resultado de un sistema gravitatorio. Cuando otra galaxia pasa por las inmediaciones, origina una onda o rizo en el disco de estrellas que se propaga en torno a éste como una "onda de densidad" de forma espiral.

Allí donde la espiral es menos patente, ello puede deberse a una cadena de estrellas en explosión que comprimen el gas interestelar cercano. Dicho de otro modo, la espiral indica una región en la que la materia se halla más concentrada y en la que están en proceso de nacimiento una gran cantidad de brillantes y energéticas estrellas.

La compañera de la Vía Láctea, la Galaxia de Andrómeda, es una de las mayores galaxias espirales que conocemos: su peso es el de 400.000 millones de soles (excluida la materia oscura). La masa de la más pequeña de las galaxias espirales es unos 1.000 millones de veces la solar. Las galaxias de menor tamaño no son capaces de mantener un disco regular y unos brazos de espiral estables. *Grosso modo* tienen las mismas proporciones que las estrellas, el gas y el polvo, pero su aspecto desordenado ha hecho que los astrónomos las clasifiquen como "galaxias irregulares". Las más pequeñas de ellas apenas son mayores que los cúmulos de estrellas y polvo que acompañan a los brazos de una galaxia espiral.

La tercera gran categoría de galaxias son las elípticas, simples bolas o balones de estrellas, de forma esférica o ▶



Edwin Hubble propuso en 1926 una clasificación de las galaxias que se emplea aun hoy día. Según ella las galaxias se dividen en elípticas, espirales, espirales barradas e irregulares. Las galaxias elípticas, de forma oval, pueden ser hasta tres veces mayores que nuestra galaxia. Las galaxias espirales, como la nuestra, tienen brazos que parten del núcleo y forman semicírculos. Las espirales barradas tienen un núcleo en forma de barra con dos brazos curvos en sus extremos. Las galaxias irregulares, que no figuran en el diagrama, son generalmente cúmulos más pequeños de estrellas sin forma particular.

Foto © Observatoire de Haute-Provence du CNRS

Diagrama El Correo de la Unesco

► elíptica. Aunque pueden estar rodeadas de materia oscura, contienen sólo una cantidad insignificante de gas y de polvo. Por consiguiente, no existen en ellas regiones o zonas con estrellas en formación ni tampoco estrellas jóvenes. Las estrellas de la galaxia elíptica datan de la época en que se formó la galaxia misma. Por su tamaño, las galaxias elípticas van desde las mayores galaxias conocidas, con un billón de estrellas, hasta los más tenues conjuntos estelares con menos de un millón de estrellas.

Las galaxias son, valga la expresión, criaturas más bien gregarias. La mayoría viven en grupos en los que las galaxias se hallan unidas a las vecinas por la gravitación y se mantienen juntas mientras por efecto de la expansión del Universo los demás grupos de galaxias se alejan de ellas.

La Vía Láctea forma parte de un grupo de unas 20 galaxias al que se da el nombre de Grupo Local. Son también miembros de éste la Galaxia de Andrómeda, una espiral gigante, la Nube Menor de Magallanes, galaxia irregular, la Nube Mayor de Magallanes, que está en el límite entre las galaxias espirales y las irregulares, y otras muchas galaxias irregulares y elípticas.

El Grupo Local es característico de muchos grupos y enjambres de galaxias por la diversidad de sus tipos. Pero los

grandes enjambres con una densa concentración de galaxias hacia el centro tienden a ser diferentes. Sus galaxias se distribuyen en un cúmulo más regular, y los telescopios de rayos X muestran que a menudo poseen un núcleo de gases muy calientes que se sitúa en torno al centro del enjambre. Las galaxias de esos enjambres son casi siempre elípticas o bien presentan la curiosa forma llamada lenticular. Estas, como su nombre indica, son galaxias en forma de lente compuestas sólo de estrellas; se trata probablemente de galaxias espirales que perdieron su gas y su polvo interestelares al penetrar en el núcleo de gases calientes del enjambre. La alta condensación de las galaxias en esos nutridos enjambres significa que las colisiones galácticas deben ser en ellos cosa corriente, y el hecho es que el centro del enjambre contiene una masiva galaxia elíptica que representa probablemente los restos acumulados de galaxias que colisionaron entre sí en el centro del enjambre.

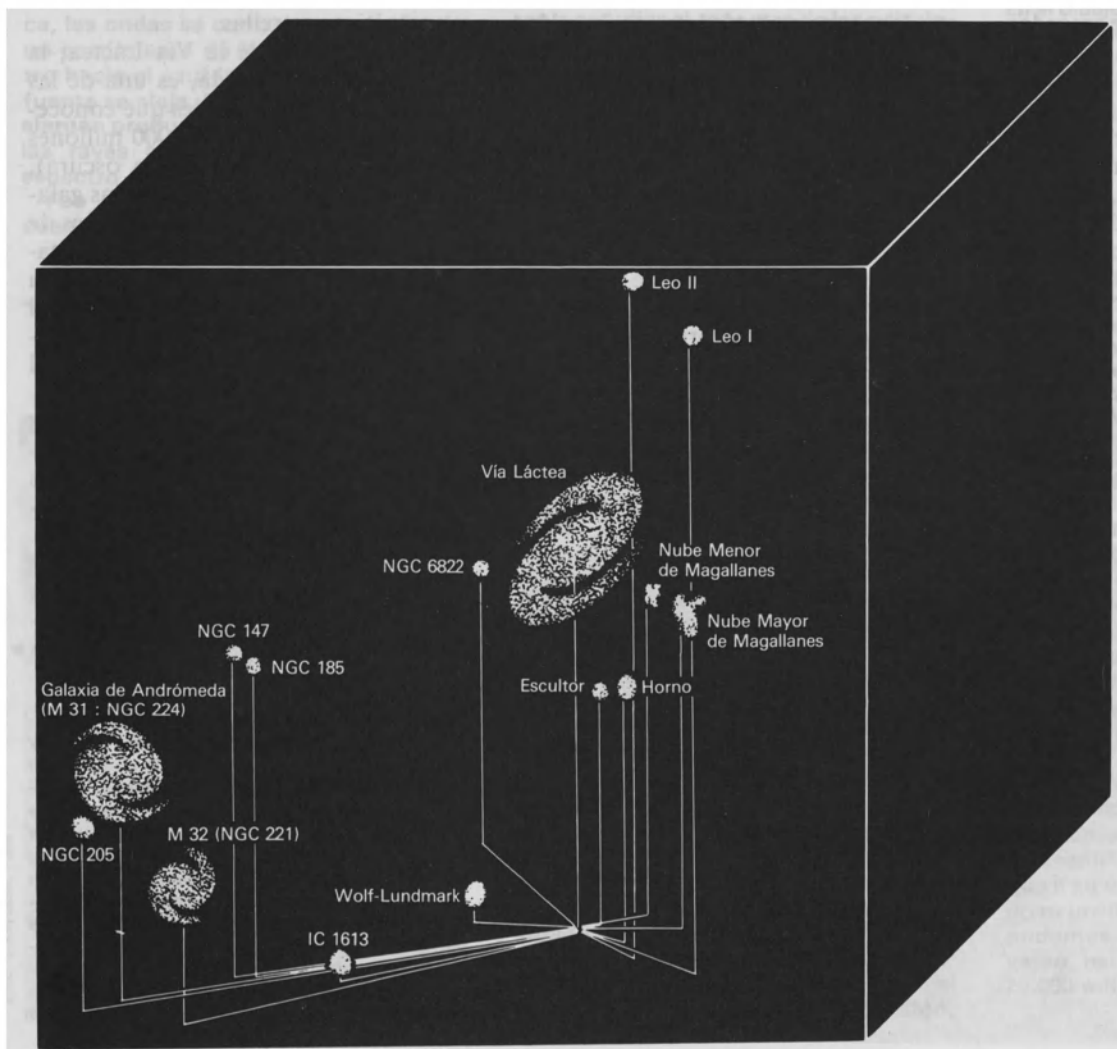
Los astrónomos ópticos ven una galaxia por la luz de sus estrellas. Esa luz permite una medida exacta de la masa galáctica (excepción hecha de la materia oscura) debido a que la materia se concentra esencialmente en las estrellas. Pero la luz estelar puede desviar la atención de los astrónomos de otros tipos de actividad en la galaxia. Feliz-

mente, el desarrollo de la radioastronomía y de la astronomía con rayos X y con rayos infrarrojos ha puesto en contacto a los astrónomos con galaxias que producen ingentes cantidades de esas radiaciones. Aunque esas galaxias representan una minoría, hoy nos están proporcionando nueva información sobre la actividad galáctica, igual que el estudio de las enfermedades puede hacernos comprender mejor un organismo sano. Por otro lado, resultan fascinantes en la medida en que algunas de esas galaxias activas, los llamados "quásares", son los objetos más poderosos que existen en el Universo.

Los astrónomos clasifican hoy las galaxias activas en dos grupos distintos. Las galaxias "por explosión" que son galaxias espirales o irregulares en las que una gran parte de su materia interestelar se convierte súbitamente en estrellas. Ocultan la luz de esas nuevas estrellas densas nubes de polvo que las rodean, pero con el tiempo su energía escapa de las nubes como radiación "calorífera", infrarroja.

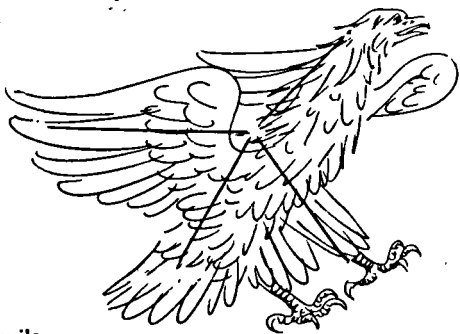
Pero las galaxias activas más poderosas son las pertenecientes a la segunda categoría, la de las que poseen una "estación de energía" central. Se trata de una pequeña zona de energía concentrada que se sitúa en el centro de una galaxia, probablemente no mayor que el sistema solar y que produce una can-

SIGUE EN LA PAG. 23

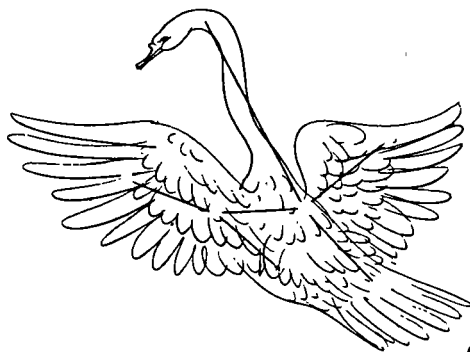


EL GRUPO LOCAL, un cúmulo de unas 20 galaxias conocidas —entre ellas la Vía Láctea y, en su seno, nuestro propio sistema solar— aparece representado en este cubo cada uno de cuyos cuadrados tiene unos 4 millones de años-luz. Sólo la Vía Láctea, la Galaxia de Andrómeda y las dos Nubes de Magallanes son visibles a simple vista.

Diagrama John Painter © Derechos reservados



Aguila



Cisne

EL GRAN CIRCO CELESTE

LAS estrellas presentan una asombrosa variedad. Algunas de ellas son miles de veces más luminosas que el Sol, mientras que otras brillan débilmente con una luz que equivale a una millonésima de la luz solar. Las estrellas más grandes, las gigantes rojas, son centenares de veces mayores que el Sol. Por el contrario, las enanas blancas son cien veces más pequeñas que él, las estrellas de neutrones son menores aun y los agujeros negros son tan densos que la estrella misma es invisible y sólo su campo gravitatorio denota su existencia.

Sin embargo, bajo esta diversidad, hay un esquema sobremas simple: se trata sólo de la masa y de la edad de las estrellas. Las más pesadas producen más energía, por lo que son generalmente más brillantes y de temperatura más alta que las de menor masa. Las diferencias de tamaño se deben a la edad. El Sol, por ejemplo, se transformará en una estrella gigante roja para terminar como una estrella enana blanca. Cuando miramos el cielo podemos ver estrellas de todas las edades, cabe decir todos los tipos posibles de estrellas. □

por Nigel Henbest



Tauro



Osa Menor



Osa Mayor



Leo

VIDA Y MUERTE

Nacimiento

Las estrellas nacen del gas interestelar, una mezcla ligera de hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de otros elementos que se encuentran entre las estrellas ya existentes de una galaxia. En su estado natural, ese gas está demasiado enrarecido como para formar los globos de gas denso de las estrellas. Sin embargo, el espacio interestelar es perturbado por diversos tipos de ondas de choque que comprimen el gas en nubes más densas y es así como ocurre el nacimiento de una estrella.

Los astrónomos creen al respecto que hay dos tipos principales de choques. El esquema en espiral de una galaxia como nuestra Vía Láctea es un sistema gravitatorio que gira a diferente velocidad a partir del gas de la galaxia, de manera que está acumulando constantemente gases en distintos sitios a medida que gira la espiral. Además, los gases que a gran velocidad se desprenden de una estrella en explosión, como una supernova, pueden atraer los gases ligeros y comprimirlos hasta formar nubes densas. Los astrónomos las llaman "nubes moleculares" debido a su gran cantidad de moléculas, tales como las de monóxido de carbono y las de alcohol.

En el centro de una "nube molecular" el gas es tan denso que su propia fuerza gravitatoria lo precipita hacia el interior. Es un gas turbulento, de modo que no se contrae en un solo punto central, sino que se divide en decenas de fragmentos de la nube. Luego cada uno de estos fragmentos se contrae independientemente y puede llegar a ser una estrella.

Tales fenómenos escapan a los instrumentos astronómicos ópticos debido a que las nubes están cargadas de partículas de un polvo interestelar que impiden el paso de la luz. Pero hoy día los radiotelescopios pueden captar las radiaciones de las moléculas de las nubes y los instrumentos de rayos infrarrojos, como el Satélite Astronómico Infrarrojo (IRAS) pueden detectar la temperatura de las protoestrellas. Dichos instrumentos nos revelan que cada fragmento que se condensa adopta la forma de un disco plano como resultado de su propia rotación y despiden gases a grandes velocidades desde cada uno de sus extremos. Estos flujos de gas pueden originar el nacimiento de otras estrellas en las zonas vecinas.

Este cúmulo recién constituido de algunas decenas de estrellas genera radiaciones y flujos de gases que luego dispersan la nube molecular alrededor de ellas. Tal proceso dura uno o dos millones de años —bien poco tiempo a escala astronómica. A veces las estrellas se encuentran tan cerca unas de otras que permanecen unidas por la gravitación como en un cúmulo, pero es más frecuente que permanezcan separadas. Cerca de un tercio de todas las estrellas terminan aisladas como el Sol; las restantes llevan consigo alguna compañera proveniente del cúmulo original y terminan como estrellas binarias. □

La secuencia principal

La compresión de una protoestrella eleva su temperatura interior a cerca de 10 millones de grados, punto en el que las reacciones nucleares empiezan a transformar el gas hidrógeno en helio. Esta reacción emite una energía que atraviesa la estrella y brilla a partir de su superficie. La fuente de energía contrarresta la gravitación centrípeta, de modo que el globo gaseoso deja de contraerse y permanece constante.

El equilibrio entre producción de energía y gravitación es tan estable que la estrella prácticamente no cambia en millones de años. Este período de "combustión de hidrógeno" es en realidad la fase más larga de la vida de una estrella. Tradicionalmente, los astrónomos han llamado a las estrellas que se encuentran en esta etapa "estrellas de la secuencia principal" debido a que sus propiedades corresponden a un esquema bien definido. Todas las estrellas de la secuencia principal de igual masa tienen una luminosidad y una temperatura superficial muy similares (siendo esta última la que determina su color aparente). La temperatura y la luminosidad de una estrella de este tipo están en relación directa con su masa. Por ejemplo, el Sol y Sirio son típicas estrellas de la secuencia principal, pero como Sirio pesa el doble del Sol es 20 veces más brillante y su temperatura superficial es de 10.000°C, mientras que la del Sol es de 5.500°C.

Finalmente, una estrella de la secuencia principal consumirá todo el hidrógeno de su región central, donde las temperaturas son suficientemente altas como para que se produzcan reacciones nucleares. Una estrella como el Sol alcanza este punto tras unos 10.000 millones de años: afortunadamente para nosotros se trata de un futuro todavía lejano, ya que el Sol tiene actualmente 5.000 millones de años. Las estrellas de gran masa y alta luminosidad consumen sus reservas centrales de combustible mucho más rápidamente y llegan al fin de su fase de secuencia principal en unos pocos millones de años. □



Diagrama El Correo de la Unesco

(1) La vida de una estrella comienza cuando ésta condensa el polvo y el gas dispersos en el espacio. (2) Cuando la gravitación empieza a actuar, la estrella embrionaria se contrae. (3) Al contraerse, la temperatura de la región cercana al centro se eleva hasta alcanzar el nivel necesario para que la fusión nuclear tenga lugar. (4) Ese cuerpo se ha convertido ya en una verdadera estrella que irradia inmensas cantidades de energía.

Gigantes rojas

Cuando el núcleo de una estrella ha perdido el hidrógeno y queda constituido por el helio producido por las reacciones, se contrae bajo el efecto de su propia gravitación. Entonces el hidrógeno que se encuentra en torno al núcleo empieza a "quemarse" formando una fina capa de helio. Para compensar la desintegración del núcleo, las capas exteriores se expanden hasta alcanzar un tamaño cien veces mayor. La radia-

DE UNA ESTRELLA

ción interna tiende pues que esparcirse a través de gases más superficiales, por lo que no puede calentar suficientemente la estrella. La temperatura baja a unos 3.000°C y el color blanco o amarillo de estrellas como Sirio o el Sol se vuelve rojizo. La estrella rojiza así expandida es ahora una gigante roja.

Los gases exteriores de una gigante roja son de tan poca densidad que oscilan de dentro a fuera y viceversa haciendo que la luminosidad de la estrella varíe durante aproximadamente un año. Las estrellas de mayor masa se expanden y llegan a ser más grandes aun, caso en que se las denomina supergigantes. En algunas de estas, las capas exteriores oscilan durante un período bien definido cuya duración está relacionada con la masa de la estrella y por ende con su luminosidad. Estas cefeidas o estrellas de luz variable son sobremanera útiles para los astrónomos que se ocupan de medir distancias en el universo. □

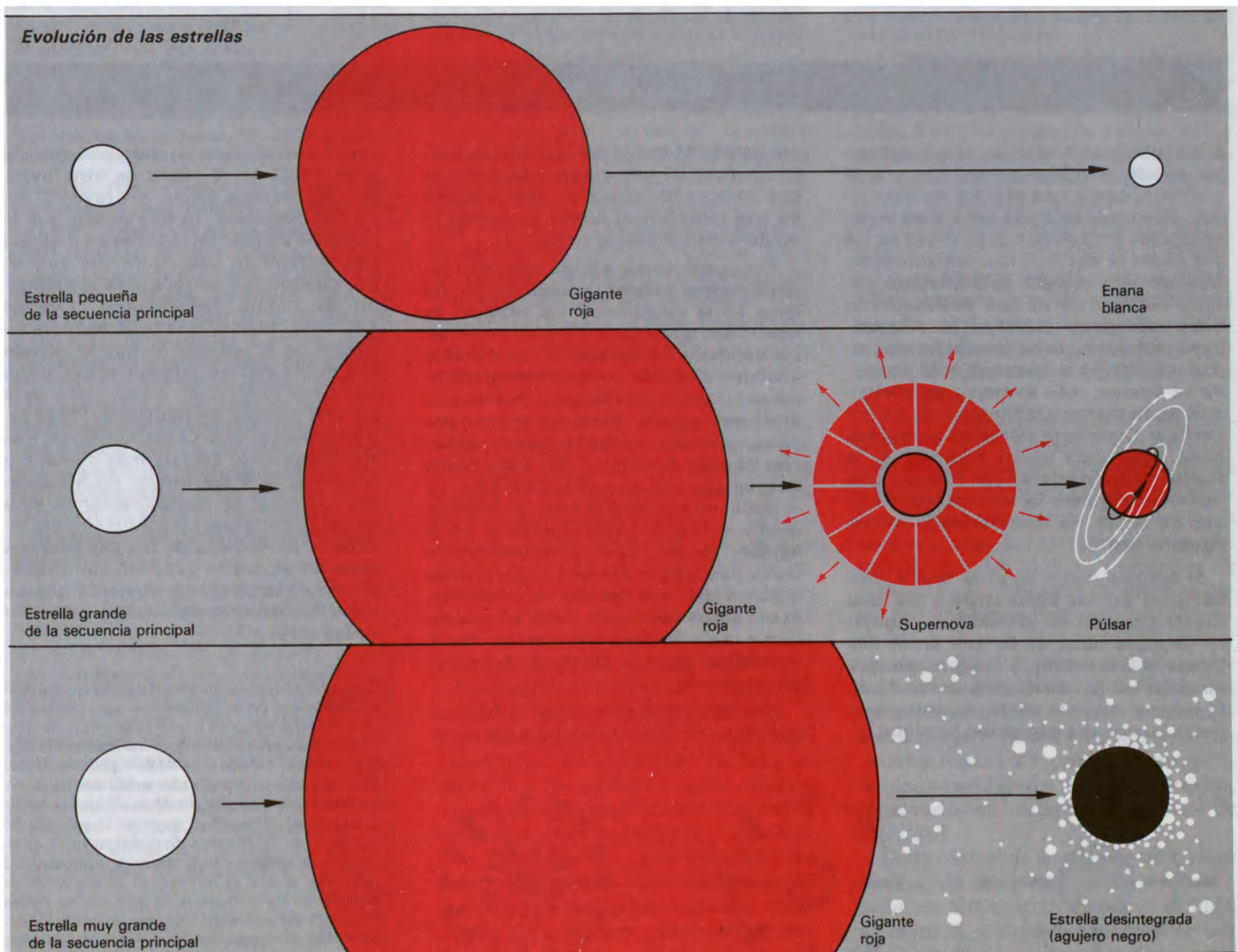
Enanas blancas

Tras haber vivido su fase de gigante roja, el destino final de una estrella depende de su masa. Si esta es similar a la del Sol, la estrella pierde las tenues capas exteriores de su cuerpo de gigante roja. Este gas se expande en el espacio como un anillo luminoso conocido por los astrónomos con el nombre de nebulosa planetaria. (Dicho sea de pasada, tal nombre no tiene ninguna relación directa con los planetas sino que simplemente los anillos de la nebulosa se asemejan a los de Urano o de Neptuno cuando se los observa con un pequeño telescopio).

El núcleo que queda de la estrella es un objeto muy denso y pequeño: una estrella enana blanca. Su masa es prácticamente la misma que la del Sol pero está comprimida en una esfera que apenas tiene el tamaño de la Tierra. Las enanas blancas están constituidas por

una materia que, como la de otras estrellas, consiste en núcleos atómicos y electrones —los componentes de los átomos desintegrados en el calor interno de la estrella. Pero mientras que otras estrellas son gaseosas, con presiones debidas a las altas velocidades de esos componentes, las enanas blancas son realmente sólidas porque su materia está tan comprimida que los electrones quedan estrechamente unidos entre sí, en un ejemplo de lo que los físicos denominan “materia degenerada”.

Una enana blanca no tiene fuente de energía ni reacciones nucleares internas. Empieza su vida a una temperatura extremadamente alta, con el calor residual de cuando constituía el núcleo de una estrella. Pero con el transcurso del tiempo irradia su calor en el espacio y finalmente termina fría, oscura y olvidada como un “agujero negro”. □



Supernovas, estrellas de neutrones, púlsares

Una estrella pesada aparece con un *bang* o explosión primitiva. Al final de su fase de estrella gigante roja (o cefeida) las reacciones nucleares cercanas al centro se vuelven inestables y la estrella estalla transformándose en supernova. En esta explosión colosal la supernova brilla brevemente con una luminosidad equivalente a la de mil millones de soles.

Cuando las capas gaseosas exteriores estallan, el núcleo se contrae hasta reducirse a unos 20 kilómetros de diámetro—apenas el tamaño de una gran ciudad. Durante la contracción los electrones se combinan con los protones para formar los neutrones hasta que el proceso termina cuando los protones se unen estrechamente entre sí. Este es otro ejemplo de “materia degenerada”, pero esta vez se trata de neutrones y no de electrones como en el caso de las enanas blancas. Una estrella de neutrones típica pesa un poco más que el Sol y su tamaño pequeño indica una densidad increíble: una pizca de materia de una estrella de neutrones podría pesar un millón de toneladas.

Con su rotación una estrella de neutrones emite una radiación como una

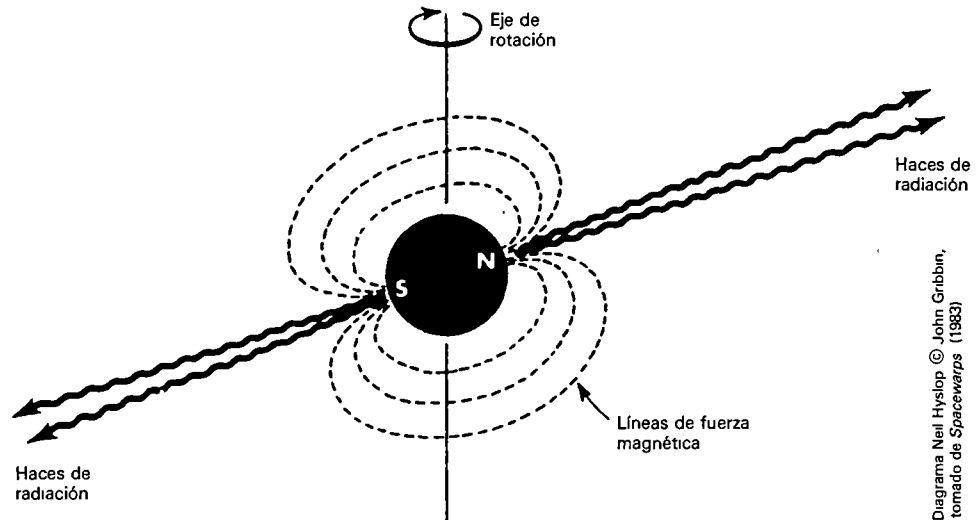


Diagrama Neil Hyslop © John Gribbin, tomado de *Spacewarps* (1983)

serie de relámpagos. Los radioastrónomos de Cambridge captaron por primera vez estos impulsos de radiación en 1967 y llamaron “púlsares” a sus fuentes. Los púlsares o estrellas de neutrones emiten normalmente destellos de rayos X o gamma y, en algunas ocasiones, rayos luminosos. Tales impulsos indican que las estrellas pequeñas giran a una increíble rapidez. El púlsar de la nebulosa del Cangrejo, res-

FAROS EN EL FIRMAMENTO. Las estrellas de neutrones emiten al girar haces de radiación que percibimos como destellos a intervalos regulares, tal como un marínero ve los rayos de luz de un faro distante.

tos de una supernova que explotó hace 900 años, gira 30 veces por segundo, mientras que la increíble rotación de un púlsar descubierto en 1982 es de ¡642 veces por segundo!

Agujeros negros

El centro de una estrella de gran masa no puede terminar como una enana blanca ni como una estrella de neutrones. Hay un peso límite natural en estas entidades compactas cuya masa es 1,4 y 3 veces la del Sol, respectivamente. Cuando una estrella sobremanera pesada estalla, su núcleo desintegrado debe sobrepasar esos límites. Al reducirse de tamaño nada puede detener su desintegración y mientras más pequeña se vuelve, más aumenta la intensidad de la fuerza gravitatoria de su superficie. Cuando el diámetro del núcleo tiene sólo unos pocos kilómetros, la fuerza gravitatoria es tan intensa que nada—ni siquiera la luz—puede escapar de él: se ha transformado en un agujero negro.

El agujero negro es pues una región de unos pocos kilómetros y de una fuerza gravitatoria irresistible. “Agujero” porque nada de lo que en él cae puede volver a salir, y “negro” porque ninguna luz puede desprenderse de él. El núcleo original se ha desintegrado hasta su mínima expresión en algún lu-

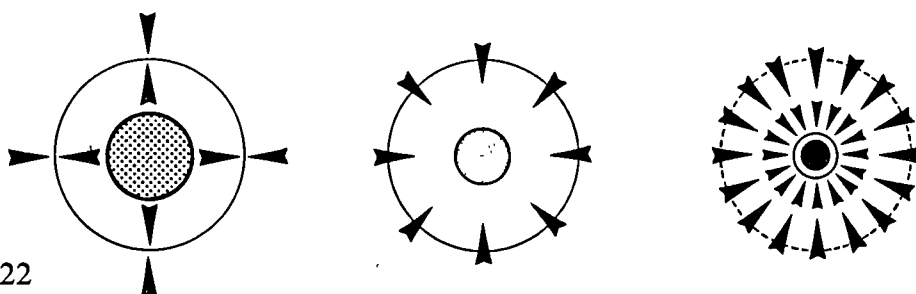
gar cerca del centro del agujero, pero literalmente no hay manera de saber lo que ha ocurrido con él porque ninguna de sus radiaciones puede atravesar el agujero negro que lo rodea.

Aunque la teoría afirma que los agujeros negros existen, encontrar uno de ellos en la obscuridad del espacio es más difícil que buscar un gato negro en un depósito de carbón en una noche oscura. Lo único que revela su presencia es la fuerza gravitatoria. Puesto que dos tercios de las estrellas forman parejas, muchos agujeros negros deberían de estar asociados con una estrella normal que gira en su propia órbita. La estrella normal podría estar suficientemente lejos para no ser absorbida por el agujero negro, pero suficientemente cerca para que el agujero negro atraiga algunos de sus gases superficiales. Estos gases confluyen hacia el agujero negro, calentándose en este proceso y emitiendo rayos X antes de desaparecer en aquél.

Los astrónomos de rayos X han encontrado efectivamente fuentes de ra-

diación en el cielo, cuando una estrella visible está en la órbita de otra invisible. En muchos casos, los rayos X llegan en impulsos, lo que indica que la pequeña estrella invisible es en realidad una estrella de neutrones. Sin embargo, cuando los astrónomos investigaron la fuente denominada “Cygnus X-1” descubrieron que la compañera invisible de la estrella es por lo menos seis veces más pesada que el Sol, o sea que tiene demasiada masa como para ser una estrella de neutrones. Más recientemente, dos casos similares han aparecido en la galaxia más cercana a nosotros, la Nube Mayor de Magallanes. Aunque la demostración a este respecto tiene que ser forzosamente indirecta, la mayoría de los astrónomos consideran que ha quedado comprobada ya la existencia de agujeros negros entre las estrellas de nuestra galaxia y de las otras.

Etapas de formación de un agujero negro. A la izquierda: en el periodo de estabilidad de una estrella de gran masa la presión de gravitación (representada por las flechas dirigidas hacia el interior) se halla equilibrada por la de la radiación y el calor emitidos desde el núcleo de la estrella (flechas dirigidas hacia el exterior). Al centro: cuando la estrella ha consumido su reserva de hidrógeno se rompe ese equilibrio y la estrella comienza a hundirse sobre sí misma. A la derecha: la estrella se ha comprimido finalmente hasta alcanzar un volumen mínimo de gran densidad y de tan gran poder de gravitación que ni siquiera la luz puede escapar de ella.



La escala del cosmos

Al tratarse de las distancias relativamente cortas que se encuentran dentro del sistema solar los astrónomos pueden utilizar el kilómetro como unidad de medida. Pero la distancia misma de la Tierra al Sol, o sea 150 millones de kilómetros, resulta en cierto modo demasiado grande para seguir empleando el kilómetro. De ahí que los astrónomos que se ocupan del sistema solar tomen frecuentemente esa distancia como "unidad astronómica". De tal manera, la distancia de Plutón —el planeta más alejado del Sol— se expresa fácilmente en 39 unidades astronómicas.

Otra medida de las distancias astronómicas es la que se basa en el tiempo que la luz tarda en recorrerlas. Así, la distancia de la Tierra al Sol es de 8 1/3 minutos-luz; el diámetro de la órbita de Plutón es de 11 horas-luz, dimensión que, aunque minúscula a escala de nuestra galaxia, es similar a la de un generador de energía de un quásar.

Próxima Centauro, la estrella más cercana a la Tierra, se halla 7.000 veces más lejos que Plutón, o sea a 4,2 años-luz; las estrellas más brillantes, por ejemplo Sirio a 8,6 años-luz y Arturo a 36. Deneb, en la constelación del Cisne, figura entre las estrellas de primera magnitud más distantes, a 1.500 años-luz. Pero, en realidad, está a un paso de nuestra galaxia: hay 30.000 años-luz desde el Sol hasta el centro de ésta y la Vía Láctea tiene unos 100.000 años-luz de diámetro.

Las galaxias irregulares son considerablemente más pequeñas que la Vía Láctea y la mayoría de las galaxias espirales son ligeramente menores. Andrómeda, vecina de la Tierra, es una de las mayores galaxias espirales que se conocen, con un diámetro de 150.000 años-luz. Las mayores galaxias elípticas son más grandes aun, con diámetros que llegan hasta un millón de años-luz. Estas cifras se refieren exclusivamente a la dimensión de las estrellas de una galaxia. Porque las ondas emitidas por una radiogalaxia, por ejemplo, pueden propagarse mucho más lejos, haciendo de estos cuerpos las mayores estructuras del Universo conectadas entre sí.

La galaxia más cercana a la Vía Láctea es la Nube Mayor de Magallanes, a 170.000 años-luz. Nuestro Grupo Local de galaxias tiene de un extremo a otro cinco millones de años-luz; mientras el enjambre de galaxias más cercano, la constelación de Virgo, se halla a unos 50 millones. La dimensión tipo de los grandes cúmulos de galaxias es generalmente de unos 30 millones de años-luz y a menudo forman cúmulos de cúmulos. Estos conglomerados de cúmulos tienen una dimensión tipo de 200 millones de años-luz y forman a menudo las partes más densas de las estructuras filamentosas que se extienden a más de 500 millones de años-luz. □



Foto © Mount Wilson and Palomar Observatories, Pasadena, California

La gran galaxia espiral de la constelación de Andrómeda.

VIENE DE LA PAG. 18

cantidad de energía equivalente a la de un millón de soles. La estación o central puede también enviar energía al espacio, en delgados haces.

Las de mayor tamaño entre las galaxias elípticas suelen tener una central de energía que por sí misma emite escasa radiación (por lo que no es fácil que la detecten los telescopios ópticos, los de rayos X o los radiotelescopios), sino que concentra su energía en dos haces orientados en dirección opuesta. Esos haces están formados probablemente por electrones de alta velocidad, a la manera del haz de un cañón de electrones en un tubo de televisión. Los haces atraviesan el espacio velozmente a ambos lados de la galaxia, sin apenas darnos una idea de la energía que fluye. Pero a la larga chocan con el tenue gas que rodea la galaxia y transmiten la energía de que están cargados. El resultado es una mezcla fortuita de campo magnético y de electrones caóticos que genera ondas de radio en virtud de un proceso llamado de radiación sincrotrón. Así pues, un radiotelescopio no "ve" la galaxia misma sino un par de nubes, una a cada lado de aquélla.

La central de energía de las galaxias espirales no se muestra tan tímida y evasiva. En general estas galaxias producen una gran cantidad de luz, de rayos X y de ondas de radio directamente. El tipo más corriente, y el mejor estudiado, es el de las galaxias de Seyfert. Carl Seyfert, que trabajaba en Estados Unidos en 1943, fue el primero que estudió las galaxias espirales dotadas de un diminuto punto de luz brillante en el centro. Al mismo tiempo

que esa inexplicable fuente luminosa, descubrió Seyfert que la región central de la galaxia contiene gases que se mueven a gran velocidad.

El paso siguiente se dió veinte años después, cuando los astrónomos comprobaron que algunas radiofuentes coincidían con pequeños puntos de luz en la bóveda celeste. Aunque esos puntos semejaban estrellas, de la desviación o corrimiento hacia el rojo de su luz se colegía que eran objetos muy remotos que se alejaban como resultado de la expansión general del Universo. Por sus contradictorias propiedades se les dio el nombre inglés de "quasistellar objects" (objetos cuasi-estelares), que por abreviación dio luego el de "quásares".

Por investigaciones más recientes sabemos que los quásares son sencillamente versiones más poderosas de los núcleos galácticos estudiados por Seyfert. Utilizando detectores electrónicos muy sensibles, los astrónomos han observado que las brillantes centrales de energía están rodeadas en muchos casos por una tenue "pelusa" que corresponde a la galaxia que cabía esperar existiera allí—y la pelusa muestra generalmente una forma espiral. Tanto los quásares como los centros de las galaxias de Seyfert tienen un brillo constantemente fluctuante; por eso es muy probable que se trate del mismo fenómeno, observado en diferentes niveles de actividad.

De la central de energía de un quásar bien puede decirse que es un auténtico infierno. En algunos quásares el flujo de rayos X se modifica en sólo un par de horas, lo cual supone que la central ▶

► de energía está sólo a unas cuantas "horas-luz"—, es decir el tamaño del sistema solar. Sin embargo, en la mayor de las erupciones hasta ahora observada en un quásar esa diminuta región emitía energía equivalente a la de... ¡mil galaxias ordinarias!

Para la mayoría de los astrónomos sólo hay una fuente posible de una energía concentrada de semejante magnitud: el poderoso campo gravitatorio en torno a un agujero negro. A medida que el gas penetra moviéndose en espiral en un agujero negro, hasta el 40 por ciento de su masa puede convertirse en energía. Una galaxia espiral tendría con seguridad gas suficiente para "alimentar" el agujero negro de un quásar que se disimulara en su centro.

Más problemático resulta explicar las centrales de energía en las galaxias elípticas que emiten haces de electrones ya que esas galaxias carecen relativamente de gas. Pero también para este problema hay solución: el tirón gravitatorio del agujero negro puede desgarrar violentamente a las estrellas cuando sus órbitas las acercan demasiado al agujero, en cuyo caso el gas escapado de la quebrantada estrella penetra en espiral en éste.

En apoyo de esta teoría han venido las delicadas mediciones efectuadas en dos galaxias activas cercanas. La galaxia elíptica M87 es una radiogalaxia, y un equipo de astrónomos británicos y norteamericanos ha descubierto que las estrellas próximas a su centro se desplazan como si estuvieran sometidas a la gravedad de un compacto objeto invisible unos 5.000 millones de veces más pesado que el Sol. Sólo un agujero negro puede tener ese peso y ser al mismo tiempo tan pequeño. Y un equipo internacional, al estudiar los movimientos del gas en la galaxia de Seyfert NGC 4151, ha llegado a la conclusión de que ésta gira en órbita en torno a un agujero negro unos 500 millones de veces más pesado que el Sol.

Las erupciones de una galaxia activa deben de depender no sólo de la existencia de un agujero negro central sino también de que el gas penetre helicoidalmente en él. Aproximadamente el 10 por ciento de las grandes galaxias espirales son galaxias de Seyfert y la mayor parte de los astrónomos estiman que no están constantemente activas. Pero es también posible que *todas* las galaxias espirales contengan un agujero negro central, pero que éste sólo recibe gas durante una décima parte del tiempo. En tal caso la distinción entre una galaxia normal y otra activa se vuelve borrosa. Tal vez las galaxias ordinarias, como la de Andrómeda y nuestra Vía Láctea, contienen un agujero negro inactivo, han experimentado en otros tiempos explosiones de la central de energía y acaso vuelvan a experimentarlas en el futuro.

N. Henbest

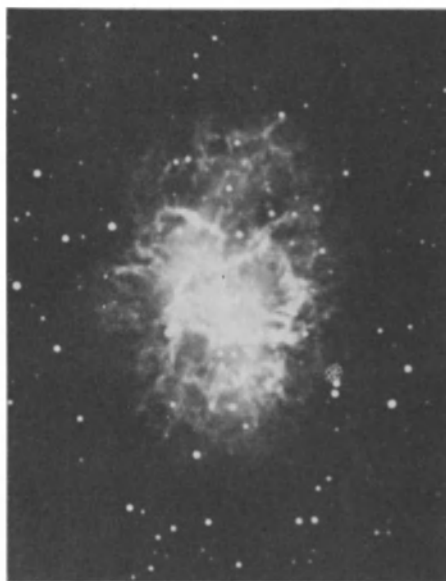


Foto © Observatoire de Haute-Provence du CNRS

La nebulosa del Cangrejo, producida por la explosión de una estrella supernova en el año 1054.

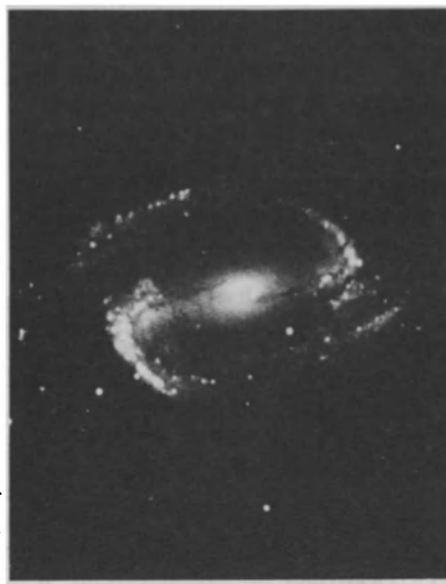


Foto © I.P.S., París

La galaxia espiral barrada NGC 1300

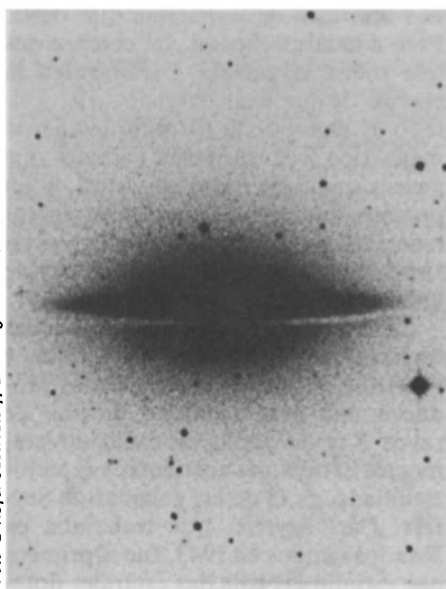


Foto © Royal Observatory, Edimburgo

La joven galaxia espiral llamada "del Sombrero".

EL rasgo más importante de nuestro mundo físico, o Universo, es su estructura. En efecto, la materia que nos rodea, en lugar de estar diseminada al azar, se halla fundamentalmente constituyendo formaciones o estructuras. Algunas de estas son los elementos a partir de los cuales se forman las estructuras de un segundo nivel cuyas dimensiones espaciales son considerablemente mayores. Estas, a su vez, se unen dando origen a estructuras de un tercer nivel, y así sucesivamente. Pero, como veremos más adelante, tal proceso no continúa indefinidamente. Dicho de otro modo, existe una jerarquía de los niveles estructurales.

Si nos limitamos a las escalas astronómicas, cualquier enumeración de tales estructuras debe hacerse a partir de la Tierra y de los demás planetas del sistema solar cuyo centro es la estrella que llamamos Sol. Existen cientos de miles de millones de estrellas agrupadas en galaxias como la nuestra, la Vía Láctea, o la nebulosa de Andrómeda, que constituyen estructuras astronómicas de segundo nivel. Sin embargo, las galaxias están distribuidas en el espacio de manera desigual y forman cúmulos o supercúmulos. Y son estas estructuras las que interesan a la cosmología, es decir al estudio del Universo.

Para quienes no están familiarizados con la astronomía la unidad de distancia que más fácilmente pueden concebir es el año-luz, o sea la distancia que la luz recorre en un año. Un año-luz equivale aproximadamente a diez billones (10^{13}) de kilómetros. A modo de comparación recordemos que la luz del Sol tarda ocho minutos en llegar a la Tierra; en cambio, la de Próxima Cen-

YACOV BORISOVICH ZELDOVICH, físico soviético, es miembro de la Academia de Ciencias de la URSS. En materia de astrofísica y de cosmología ha participado en la elaboración de teorías relativas a la evolución de las estrellas y de los sistemas estelares y de los procesos que tienen lugar en un Universo "caliente" en expansión. Ha recibido el Premio Lenin y cuatro Premios del Estado en reconocimiento a su obra.

estructura

del Universo

Yacov Borisovich Zeldovich

tauro, la estrella más cercana, tarda cuatro años, o sea que se encuentra a una distancia de cuatro años-luz.

El diámetro de una galaxia media puede oscilar entre 10.000 y 100.000 años-luz, y la distancia de la Tierra a la galaxia gigante más cercana, la nebulosa de Andrómeda, supera los dos millones de años-luz. Las galaxias forman cúmulos cuyo diámetro, en el caso de las mayores, puede ser del orden de diez millones de años-luz. Los cúmulos, a su vez, se agrupan en supercúmulos cuyas dimensiones oscilan entre 100 millones y 300 millones de años-luz.

Los grandes cúmulos, que abarcan millares de galaxias, son conocidos desde hace mucho tiempo debido a que se destacan nítidamente en el firmamento. Por ejemplo, en la figura 1 aparece el gran cúmulo de galaxias que se encuentran en la misma dirección que la constelación de la Cabellera de Berenice, aunque muy distante de ella. En cambio, la identificación de los supercúmulos es resultado exclusivo de los progresos alcanzados por las observaciones astronómicas de los diez años últimos.

Era imposible determinar la estructura de los supercúmulos mientras las fotografías estudiadas en los atlas estelares se limitaran a presentar sólo una proyección de la posición de una galaxia en la esfera celeste. Si en tales fotografías las galaxias parecen encontrarse unas junto a otras, no puede deducirse de ello que estén realmente cerca entre sí. Es probable que las distancias que separan tales galaxias de la Tierra sean muy diferentes y que sólo por azar se encuentren aparentemente en el mismo radio visual al observarlas desde nuestro planeta. Solo puede conocerse la ubicación exacta de las galaxias en el espacio mediante la construcción de un modelo tridimensional. Para ello es necesario añadir una tercera coordenada —la distancia a la galaxia— a las dos coordenadas angulares que indican la posición de la galaxia en la esfera celeste

(y que son análogas a la latitud y la longitud geográficas).

Las distancias de las galaxias lejanas han podido determinarse gracias a la "ley de Hubble" según la cual la velocidad a la que una galaxia se aleja de nosotros es proporcional a la distancia que media entre ella y la Tierra.

El coeficiente de proporcionalidad ha sido llamado "constante de Hubble" (véase la pág. 16). A su vez, la velocidad de la galaxia puede determinarse a partir del "efecto Doppler", es decir midiendo el *corrimiento hacia el rojo* de la luz proveniente de la galaxia (véase la pág. 16).

Actualmente se ha medido ya la desviación hacia el rojo de más de 10.000 galaxias. Basándose en las distancias así obtenidas, se ha podido construir con ayuda de computadoras modelos tridimensionales de la distribución de las galaxias en el espacio. Pero los resultados han sido inesperados.

¿Por qué "inesperados"? ¿Qué distribución de las galaxias habríamos podido esperar *a priori*? La cuestión radica en que si todos los niveles estructurales de la materia son cualitativamente similares entre sí y difieren sólo en sus dimensiones espaciales, era lógico esperar como resultado estructuras no muy diferentes de la que aparece en la figura 2 (pág. 26) en la que cada punto representa una galaxia.

Dicho de otra manera, basándonos en nuestros conocimientos previos era natural suponer que las galaxias se agruparan en cúmulos tal como las estrellas se agrupan en galaxias. La existencia de tales cúmulos, como la Cabellera de Berenice (figura 1), constituía un argumento más en favor de semejante hipótesis.

Sin embargo, la realidad ha demostrado ser enteramente distinta. Una extraordinaria proporción (del 80 al 90%) de las galaxias están concentradas en grupos filamentosos de gran extensión, con un espesor inferior a 30 millones de años-luz y una longitud de

más de 300 millones. Algunos filamentos adyacentes se entrecruzan formando una estructura combinada y tridimensional, como una red celular o un panal. Tal estructura suele denominarse sistema de supercúmulos y se han fijado convencionalmente los límites que separan a estos en los puntos donde los filamentos son más finos y ralos. Los grandes cúmulos de galaxias, como los que aparecen en la figura 1, contienen una proporción ínfima (menos del 10%) de todas las galaxias y por lo general están situados cerca de los puntos de intersección de las estructuras filamentosas.

En la figura 3 se ofrece una representación esquemática y sobremañera simplificada de la distribución de las galaxias. Los supercúmulos ocupan una porción insignificante (cerca del 10%) del volumen total del Universo. En el resto del espacio prácticamente no se encuentra galaxia alguna. En una proyección de la esfera celeste visible esos enormes espacios vacíos desaparecen por completo debido a que los supercúmulos situados detrás de ellos son visibles en los intervalos entre los cuerpos celestes. Lo mismo sucede con las estructuras filamentosas. Sólo los grandes cúmulos, que presentan una marcada concentración hacia el centro, se destacan con nitidez (como en la figura 1). De ahí que sea necesario construir un modelo tridimensional.

Las estructuras representadas en las figuras 2 y 3 son nítidamente visibles para el ojo humano y es imposible confundirlas. Sin embargo, ¿qué es lo que puede diferenciarlas desde el punto de vista matemático y cuantitativo? La dificultad es en cierto modo similar a la que plantea un problema de la vida corriente. Reconocemos inmediatamente a una persona al ver su fotografía o al encontrarnos con ella, pero ¿cómo describirla con palabras de modo que otros puedan reconocerla? (Y es más difícil aun programar una computadora para que reconozca a alguien a partir de su apariencia externa).

► Las figuras 2 y 3 han sido dibujadas de modo que en ambos casos sean idénticos la densidad media de los puntos que representan las galaxias y el contraste de densidad (definido como la porción del volumen espacial que ocupan la mayoría de las galaxias). Sin embargo, resulta indispensable establecer un criterio matemático estricto que permita distinguir las estructuras debido a que el ojo humano es capaz de verlas allí donde no existen. Un buen ejemplo al respecto es la historia de los "canales de Marte", vistos con ayuda de telescopios elementales, que desaparecieron en cuanto se emplearon aparatos ópticos más potentes (véase la página siguiente).

Recientemente nuestro grupo de investigaciones de Moscú logró establecer tal criterio matemático, que puede definirse *grosso modo* en los términos siguientes. Supongamos que el problema consiste en cruzar de un extremo al otro las figuras 2 y 3, cada una de las cuales representa la totalidad del Universo infinito. Pero sólo está permitido posarse en los puntos que representan las galaxias. Más aun, las posibilidades físicas son limitadas ya que el paso o el salto no debe exceder determinada longitud. Entonces se plantea la pregunta: ¿cuál es la longitud máxima que debe tener cada paso a fin de completar un viaje a través del Universo entero?

La respuesta depende de la relación entre esa longitud máxima del paso y la distancia media entre los puntos, relación a la que podemos llamar el parámetro crítico.

Si observamos las figuras citadas más arriba advertimos que cuando se cruza la estructura representada en la 2, es necesario dar grandes saltos entre los cúmulos (o sea que se requiere una extensión máxima del paso que corresponda a la distancia entre los cúmulos), mientras que, por el contrario, es posible cruzar la estructura de la figura 3 a pasos cortos cuya extensión máxima no supere la distancia que existe entre las galaxias que se hallan en los filamentos. En consecuencia, el parámetro crítico

en el primer caso resulta considerablemente mayor que en el segundo. A modo de comparación se puede considerar una tercera variante en la cual los puntos que representan las galaxias estén dispuestos de manera fortuita e independientemente entre sí. En tal caso el parámetro adquiere un valor intermedio.

Llegados a este punto cabe preguntarse a qué se asemeja la estructura real del Universo. Cuando investigamos la distribución real y tridimensional de las galaxias, encontramos que el parámetro es sensiblemente inferior y que se aproxima al que se obtuvo al tratarse de la estructura filamentososa de la figura 3. Esto significa, en términos estrictamente matemáticos, que la estructura de los supercúmulos semejante a un panal que percibimos con nuestros ojos es absolutamente real.

Nuestras observaciones han demostrado también que en una escala del orden de 1.000 millones de años-luz, o sea el doble de las dimensiones máximas de un supercúmulo, la distribución de la materia en el Universo es altamente homogénea (igual por todas partes), isotrópica (igual en todas direcciones) y sin estructura. En esta escala las desviaciones de la densidad media no exceden del 10 al 20%. En un orden de magnitud mayor, el grado de homogeneidad y de isotropía es más elevado aún. Esto quiere decir que no existen estructuras no homogéneas de nivel superior al de los supercúmulos y que estos constituyen las estructuras mayores del Universo, en la cumbre de la jerarquía a que nos referimos al comienzo. En escalas aun mayores, el universo es uniforme.

¿Cómo podemos explicar esta estructura? Las características generales del Universo, tales como su homogeneidad, su isotropía y su expansión quedan claramente descritas por medio del modelo del "Universo caliente" o del Big Bang. Para explicar el origen de las galaxias y su agrupación en cúmulos y supercúmulos, debemos suponer que en el momento del Big Bang, la distribución de la materia presentaba una

heterogeneidad muy leve. Recientemente han surgido teorías hermosas y atrayentes para explicar esa heterogeneidad inicial (véase el artículo de la pág. 8). Pero aquí nos ocuparemos exclusivamente de cómo ésta aumentó con el transcurso del tiempo.

Es fácil investigar la evolución de las disimilitudes ("protuberancias" o "grumos" en el Universo) mientras estas son pequeñas. Las protuberancias crecen debido a que la gravitación les añade materia, por lo que se vuelven más pronunciadas. Y, a medida que crecen, son más complejas las ecuaciones necesarias para describir su comportamiento, pero el autor del presente artículo ha logrado demostrar que las primeras estructuras compactas del Universo debieron de tener la forma de una torta chata con contornos muy finos. De ahí que tal hipótesis sobre la formación de las galaxias se conozca con el nombre de teoría de la "tortilla". Con el tiempo las "tortillas" crecieron entrecruzándose entre ellas. La densidad de la materia en las líneas de intersección aumentaba con la gravitación y son precisamente esas líneas las que en su evolución posterior dieron origen a las estructuras reticulares. Gracias a los cálculos numéricos con computadoras hechos en Moscú por nosotros y otros grupos de expertos hemos obtenido una estructura de grandes dimensiones en forma de panal, similar en su conjunto a la que habíamos observado, aunque no hay una coincidencia absoluta en todos los detalles.

Grandes progresos se han realizado en la esfera de la cosmología en general y en la teoría de la estructura del Universo en particular. Aún queda mucho por hacer pero el ritmo actual del progreso es tal que nos permite esperar que la generación actual de investigadores encuentre respuestas a estas cuestiones que siguen intrigándonos.

Y. B. Zeldovich

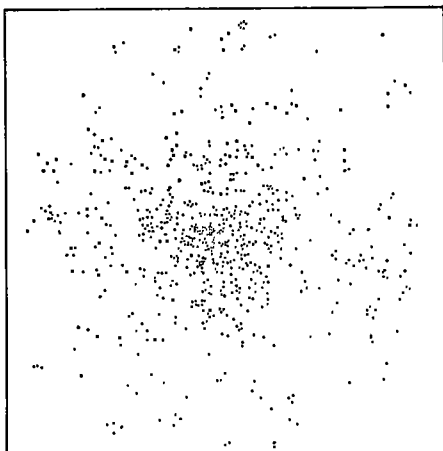


Figura 1

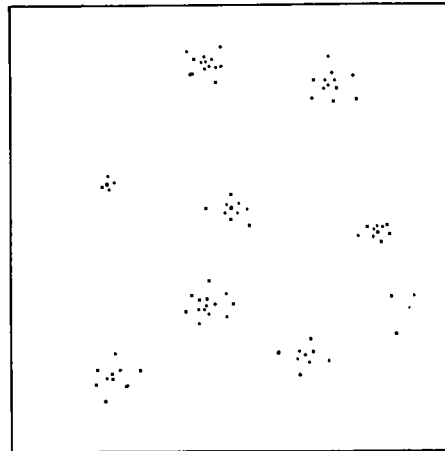


Figura 2

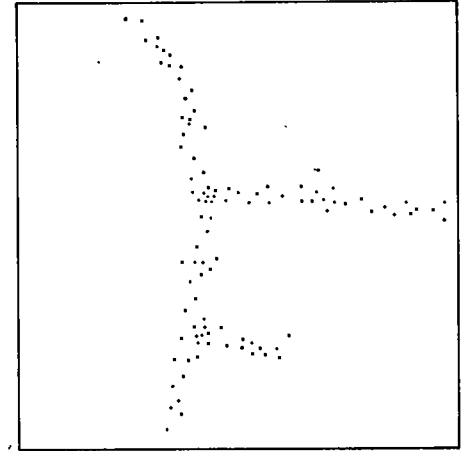
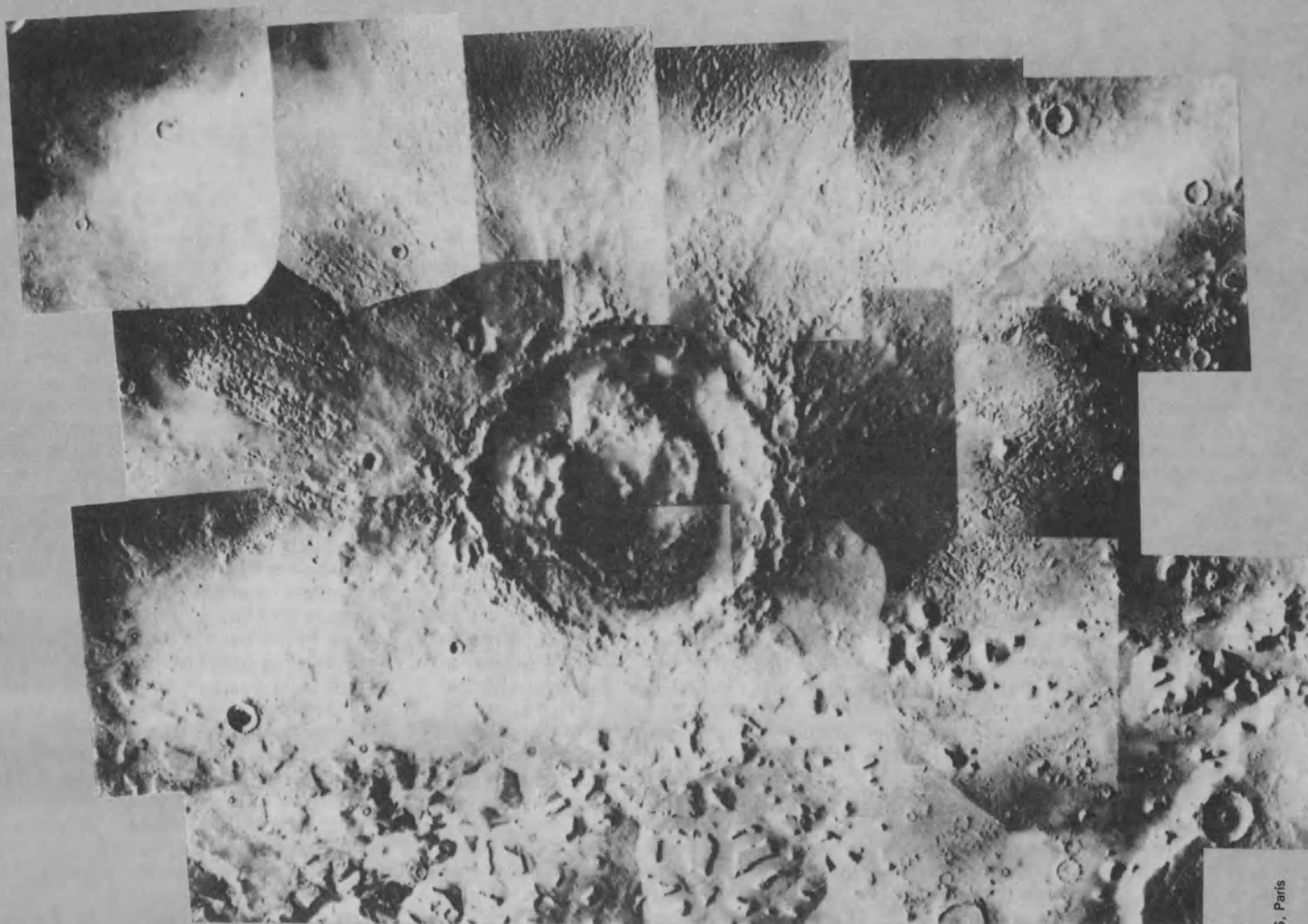
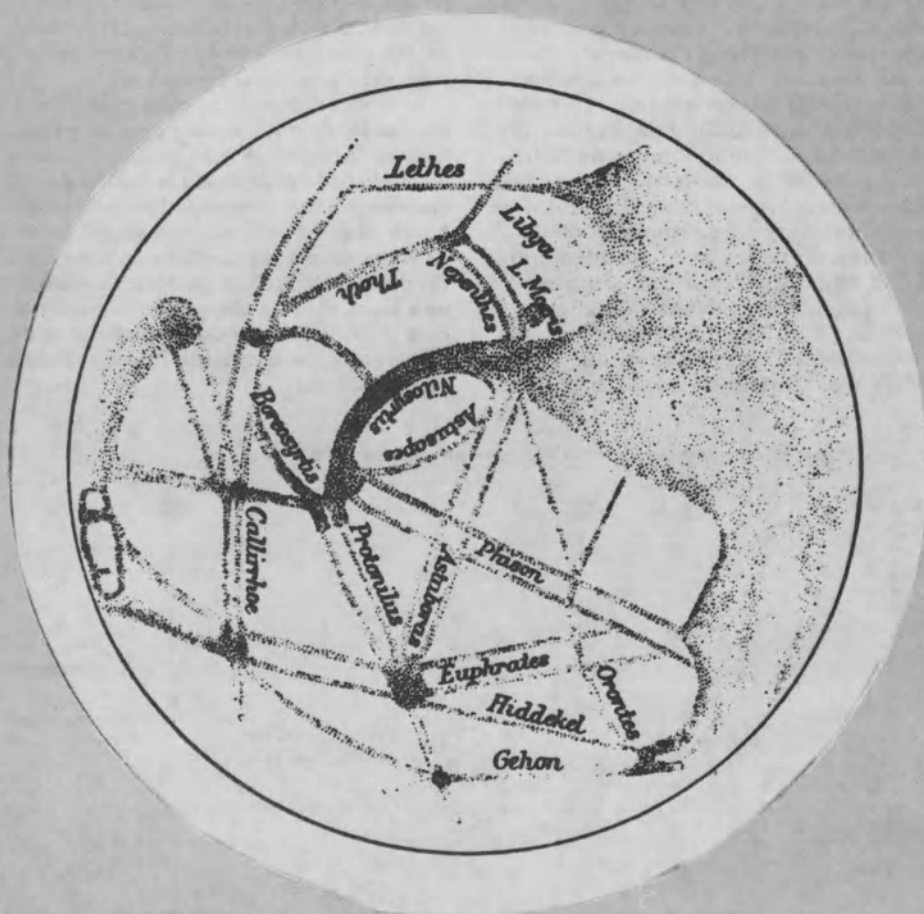


Figura 3



Los canales de Marte

La curiosa controversia en torno a "los canales de Marte" constituye un ejemplo de las dificultades con que se tropieza cuando se trata de efectuar observaciones astronómicas precisas a través de la atmósfera turbulenta de la Tierra. El astrónomo italiano Giovanni V. Schiaparelli (1835-1910) observó en 1877 que había en Marte extrañas "líneas" a las que llamó *canali*. Las hipótesis de Chiaparelli fueron apoyadas luego por el astrónomo norteamericano Percival Lowell (1855-1916) quien afirmó que se trataba de canales de riego construidos por seres dotados de inteligencia. "El sistema que observamos parece obedecer a una mente de un nivel más que mediano", escribía, "una mente por cierto de mucha mayor envergadura que la que preside los diversos departamentos de nuestros servicios de obras públicas". Tales teorías inspiraron numerosas historias de ficción científica y hubo que abandonarlas solamente a mediados de los años de 1970 cuando las misiones de la nave espacial "US Viking" revelaron que la superficie de Marte era polvorienta y llena de cráteres y que en ella no había huella alguna de "canales". A la derecha, un dibujo de Marte con sus *canali* hecho por Schiaparelli en 1888. Arriba, mosaico de fotos tomadas por el "Viking Orbiter 2", a 7.600 km, que muestran un gran cráter formado en Marte por la caída de un meteorito.



La formación de los elementos

CUANDO el Universo comenzó a enfriarse tras el Big Bang original, las nubes de gas interestelar se condensaron por la presión de sus propia gravitación para formar estrellas. Pero estas primeras estrellas no contenían la gran variedad de elementos químicos que encontramos hoy en la Tierra. La propia explosión inicial sólo produjo hidrógeno y algo de helio, o sea aproximadamente el 20% de toda la materia. Los demás elementos, incluidos el carbono de nuestro organismo y el oxígeno del aire que respiramos, se formaron en el interior de las estrellas y se difundieron en el espacio con las explosiones estelares o supernovas.

Las estrellas de la primera generación que sólo contenían hidrógeno y pequeñas cantidades de helio se habían formado a partir de un globo gaseoso contraído por su propia gravitación y cuyo centro se calentaba al transformarse en calor la energía gravitatoria. La elevación de la temperatura acelera el movimiento de las partículas del núcleo de la reciente estrella y las hace chocar violentamente entre ellas. A algunos miles de grados de temperatura los electrones pierden sus átomos, dejando un mar de protones (núcleos de hidrógeno) que chocan constantemente entre sí. Y a una temperatura de cerca de diez millones de grados Kelvin, dos protones que chocan se unen; cada uno de ellos tiene una carga positiva pero al fusionarse emiten un positrón, equivalente positivo de la carga negativa del electrón, y uno de los protones se transforma así en neutrón. La combinación de un protón y de un neutrón forma el núcleo de un átomo de hidrógeno pesado, el deuterio. Al chocar con otro protón, el núcleo del deuterio puede unirse para formar el núcleo de un átomo de helio, de un tipo llamado helio-3 constituido por dos protones y un neutrón. Dos núcleos de helio-3 se combinan a su vez para formar un núcleo de helio-4 con dos protones y dos neutrones, liberando dos protones

(núcleos de hidrógeno) que vuelven a la "marmita" estelar.

El resultado inmediato de todo este ciclo es la transformación de cuatro protones en un núcleo de helio para producir energía: es la fusión nuclear, base de la bomba de hidrógeno. Una estrella como el Sol es nada menos que el equivalente a la escala del cosmos de una bomba de hidrógeno que estallara ininterrumpidamente durante diez millones de años. La energía así liberada mantiene el calor en el centro de la estrella y le impide desintegrarse mientras dure su reserva de hidrógeno. Sin embargo, esta termina por agotarse. Cuando todo el hidrógeno del centro se ha transformado en helio, la estrella vuelve a deshacerse violentamente y su centro se calienta más aun. La presión aumenta entonces hasta el punto de que los propios núcleos de helio comienzan a combinarse. Tres núcleos de helio-4 se unen para formar un núcleo de carbono que contiene seis protones y seis neutrones. Nuevamente este proceso genera energía (esta vez a una temperatura más elevada aun) e interrumpe la desintegración por gravitación hasta que casi todo el helio se transforma en carbono. Luego el mismo ciclo recomienza nuevamente con la formación sucesiva de elementos cada vez más pesados en el centro de la estrella a medida que ésta envejece. El proceso de combustión es muy rápido en las estrellas de gran masa, y todas las de la primera generación, formadas en los comienzos del Universo, se han consumido mucho tiempo atrás.

El elemento más pesado que puede formarse de esta manera es el hierro, que es también el más estable. Si a lo largo de todo el proceso la fusión de los elementos más livianos libera energía hasta llegar a producir hierro, es preciso un aporte considerable de energía a fin de lograr que los núcleos se combinen para formar elementos más pesados. Esto sólo sucede con estrellas de gran masa, pero cuando ocurre es algo espectacular.

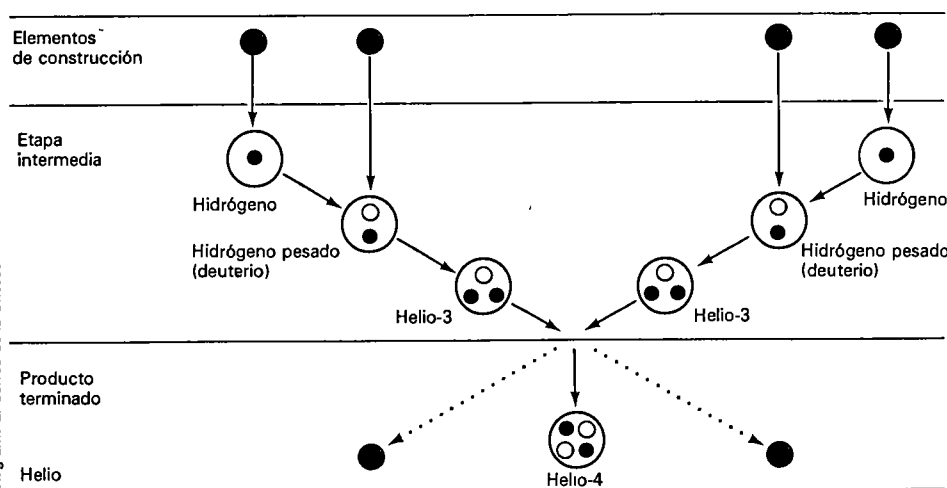
Cuando una estrella de gran masa ha agotado todo su combustible nuclear y ha desarrollado en su centro un gas de hierro cuyos núcleos se entrecierran a una temperatura de diez millones de grados, llega un momento en que ya no libera energía y nada puede contrarrestar su fuerza de gravitación. Esto se produce cuando el centro llega a tener una vez y media la masa del Sol, en circunstancias en que la masa total de la estrella es de por lo menos diez veces la de éste. El núcleo de la estrella se desintegra entonces súbitamente en una masa sobremas densa en la que los protones y los electrones se fusionan para formar neutrones. El equivalente de la masa total del Sol llega a caber en una bola de neutrones no mayor que la isla de Manhattan. Esta compresión libera cantidades inmensas de energía gravitatoria que se difunde en el 90 por ciento restante de la estrella. En los comienzos de la explosión así producida, la compresión de los núcleos atómicos forman elementos pesados tales como el plomo y el uranio. Algunas fracciones de segundo más tarde, todas las capas exteriores de la estrella se desprenden violentamente de ella y se dispersan en el espacio.

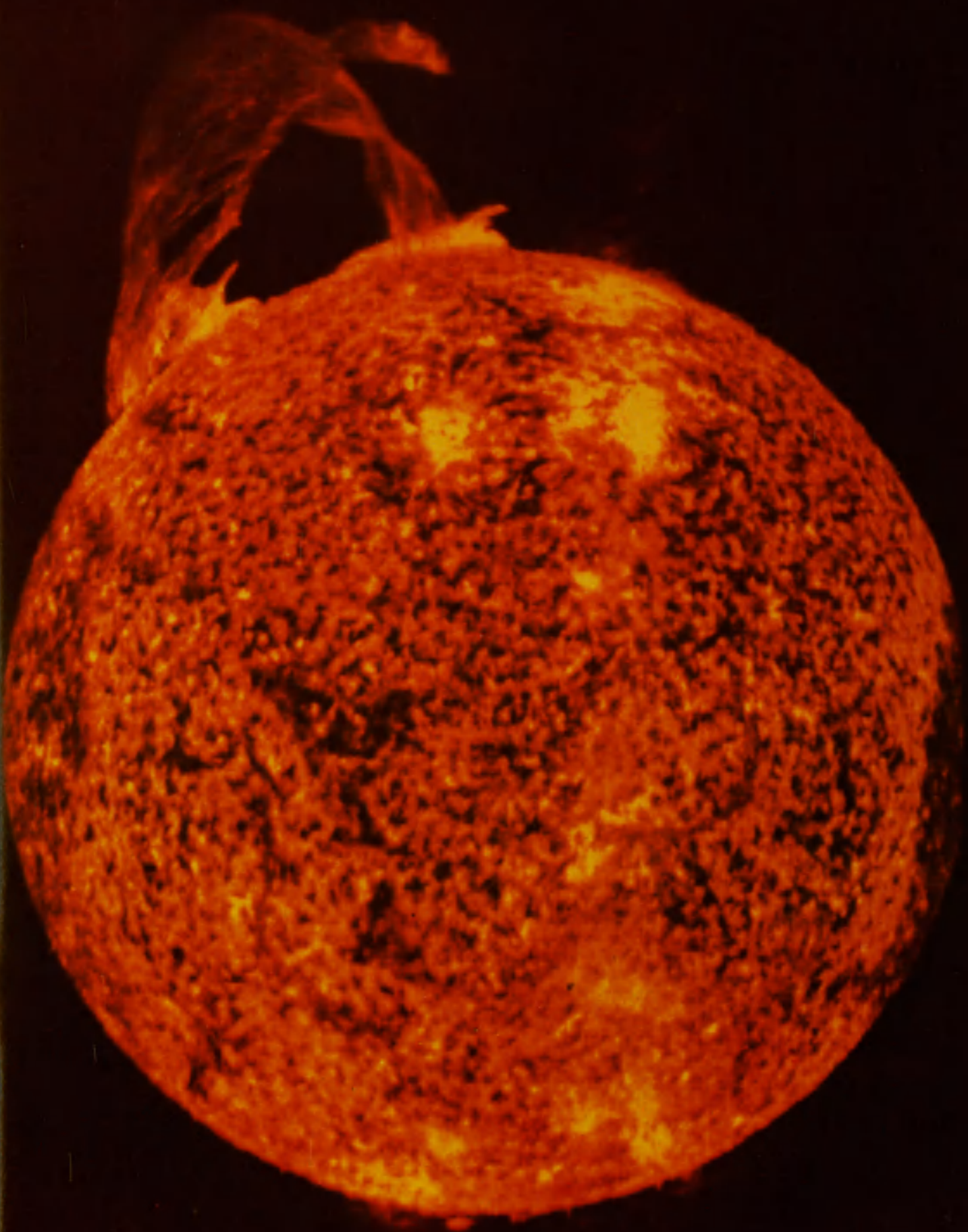
Los elementos formados en el corazón de la estrella agonizante constituirán posteriormente nuevas nubes de gas interestelar que se desintegrarán a su vez para dar origen a estrellas y planetas semejantes a los de nuestro sistema solar. Nuestro Sol forma parte de las estrellas más recientes y por tal razón contiene otros elementos a más del hidrógeno y el helio y está rodeado de planetas constituidos por elementos más pesados. En definitiva, debemos nuestra existencia a los estertores de las estrellas. □

Página en color

El Sol, estrella de la secuencia principal, es una densa masa esférica de materia luminosa de 1.392.000 kilómetros de diámetro. Formado principalmente de hidrógeno y con una inconcebible temperatura de 13 millones de grados centígrados en su centro, constituye un caldero en ebullición en el que los electrones se despojan de sus átomos y los núcleos se entrecierran y funden en una serie de reacciones que dan como resultado la transformación del hidrógeno en helio. El Sol se encuentra aproximadamente en la mitad de su ciclo de vida como estrella de la secuencia principal, puesto que en unos 5.500 millones de años habrá consumido todas sus reservas de hidrógeno y se extinguirá. Los gases provenientes del centro transportan calor a la superficie donde hierven y bullen, produciendo destellos y protuberancias solares que estallan a centenares de miles de kilómetros en el espacio. En la fotografía, tomada desde el "Skylab 4" en diciembre de 1973, aparece una protuberancia de unos 586.000 kilómetros, una de las más espectaculares que se hayan observado jamás.

Cómo el helio se forma a partir del hidrógeno en una estrella.







LA VIDA

Una

fatalidad cósmica

por Carl Sagan

Artículo © Copyright. Prohibida la reproducción.

DESDE que tengo uso de razón me he venido planteando la cuestión de saber si la vida puede existir en otros cuerpos celestes distintos de la Tierra ¿Qué clase de vida será, si es que existe? ¿En qué podrá consistir? Todos los seres vivos de nuestro planeta se componen de moléculas orgánicas, complejas estructuras microscópicas en las que el átomo de carbono desempeña un papel capital. Hubo un tiempo, antes de la aparición de la vida, en que la Tierra era un planeta completamente árido y desolado. En cambio, nuestro mundo aparece hoy desbordante de vida. ¿Cómo se

produjo tal cosa? ¿Cómo eran, antes de que surgieran los primeros seres vivos, las moléculas orgánicas a base de carbono? ¿Cómo aparecieron esos primeros seres vivos? ¿Cómo evolucionó la vida hasta producir seres tan complejos y perfeccionados como nosotros los seres humanos, capaces de explorar el misterio de nuestro propio origen?

Por otra parte, ¿existe también la vida en los innumerables planetas que giran en torno a otros soles? De existir, ¿se basa la vida extraterrestre en las mismas moléculas orgánicas que la terrestre? ¿Se parecen los seres que moran en otros mundos a los de la Tierra? ¿O bien son tajantemente distintos, como resultado de la adaptación a otros entornos diferentes?

En la inmensa tiniebla que separa a las estrellas existen nubes de gas y polvo y materia orgánica. Los radiotelescopios han detectado en ese espacio decenas de tipos distintos de moléculas orgánicas. De la abundancia de esas moléculas se colige que la materia prima de la vida existe por doquier. Quizá la aparición y la evolución de la vida son, con un lapso suficiente de tiempo, una fatalidad cósmica. En algunos de los miles de millones de planetas que existen en nuestra galaxia, la llamada Vía Láctea, tal vez no llegue a surgir jamás la vida. En otros puede aparecer y extinguirse, o bien no pasar de sus formas más elementales. Pero acaso en un pequeño número de mundos puede dar nacimiento a seres más inteligentes y más civilizados que nosotros.

CARL SAGAN, norteamericano, es director del Laboratorio de Estudios Planetarios y profesor "David Duncan" de Astronomía y Ciencias Espaciales de la Universidad Cornell, de Ithaca, Nueva York. Ex presidente de la División de Ciencias Planetarias de la American Astronomical Society, participó en la realización de los viajes interplanetarios de las naves espaciales "Mariner", "Viking" y "Voyager". Es autor, coautor o coordinador de una decena de libros entre los que figuran *Intelligent Life in the Universe*, *The Cosmic Connection*, *The Dragons of Eden*, y *Broca's Brain*. En 1978 recibió el Premio Pulitzer de Literatura de los Estados Unidos. El artículo que se publica en estas páginas está tomado de *Cosmos*, un libro basado en una importante serie de programas de televisión del profesor Sagan que suscitaban profundo interés en el mundo entero.

De cuando en cuando alguien pone de relieve la feliz coincidencia que hace de la Tierra un planeta perfectamente adaptado para la vida: temperaturas moderadas, agua en estado líquido, atmósfera de oxígeno, etc. Pero ello supone, al menos en parte, confundir la causa con el efecto. Nosotros los seres terrestres estamos magníficamente adaptados al medio ambiente de la Tierra porque en él hemos nacido y crecido. Las formas primitivas de la vida que no estaban bien adaptadas desaparecieron. Nosotros descendemos de organismos que supieron prosperar y desarrollarse. Otros organismos que evolucionen en un modo totalmente diferente considerarán también que éste es estupendamente apto para la vida.

Todas las formas de la vida terrestre están estrechamente relacionadas entre sí. Poseemos una estructura químico-orgánica común y un mismo patrimonio evolutivo. Ello entraña una enorme limitación para nuestros biólogos en la medida en que no pueden estudiar más que un solo tipo de biología, un solo tema en la vasta música de la vida. ¿Es esta tenue y aguda melodía la única voz surgida en miles de años-luz? ¿O bien existe una especie de fuga cósmica, con temas y contrapuntos, disonancias y armonías, con mil millones de voces distintas cantando la música vital de nuestra galaxia?

Lo que ha ocurrido aquí en la Tierra puede ser más o menos típico de la evolución de la vida en otros muchos mundos; pero por algunos de sus aspectos como la química de las proteínas o la estructura neurológica del cerebro tal vez la historia de la vida en la Tierra sea un fenómeno único en la Vía Láctea.

La Tierra surgió de la condensación del gas y el polvo interestelares hace unos 4.600 millones de años. Por los restos fósiles que han llegado hasta nosotros sabemos que la aparición de la vida se produjo poco después, quizás hace unos 4.000 millones de años, en las lagunas y los océanos de nuestra primitiva Tierra.

Las primeras formas vivientes eran menos complicadas que un simple or- ▶

Página en color

Arriba

Esta fotografía por rayos infrarrojos en la que la Vía Láctea aparece como una luminosa varilla iridiscente se ha obtenido gracias a un progreso extraordinario de la ciencia que permite a los astrónomos observar por vez primera un Universo que hasta hoy era invisible e inaccesible para el ser humano. La foto fue transmitida en 1983 por un telescopio al infrarrojo instalado en el Infrared Astronomical Satellite (IRAS) como parte de un programa de un año de duración en el que participan astrónomos holandeses, norteamericanos y británicos. Las ondas infrarrojas son semejantes a las ondas luminosas pero no son visibles, ni siquiera con ayuda de los telescopios ópticos, debido a que las densas nubes de polvo interestelar oscurecen la luz de las estrellas. Pese a haberse construido observatorios especiales en la cumbre de montañas altas, entorpece las observaciones que se realizan desde la Tierra el hecho de que el agua de la atmósfera terrestre absorbe la mayor parte de la radiación infrarroja. La solución a semejante problema era la construcción de un observatorio de ondas infrarrojas en el espacio y el IRAS ha aportado ya tan gran cantidad de datos sobre la formación de las estrellas que su análisis completo requerirá años enteros y modificará probablemente muchas teorías generalmente aceptadas.

Abajo

Las Pléyades constituyen un denso cúmulo de estrellas cuya edad es de unos 60 millones de años y que se hallan aun en proceso de formación. Seis o siete de ellas pueden ser vistas por el ojo humano y aunque la constelación es conocida generalmente con el nombre de "Las siete hermanas", las fotografías han revelado que el cúmulo consta de varios centenares de estrellas.

► ganismo unicelular, que es ya una forma muy compleja de vida. Los primeros pasos de la vida fueron mucho más humildes. En esos días primitivos los rayos y la luz ultravioleta del Sol escindían las moléculas elementales ricas en hidrógeno de la primera atmósfera cuyos fragmentos volvían a combinarse espontáneamente formando moléculas cada vez más complejas. Los productos de esta primitiva actividad química se disolvieron en los océanos formando una especie de caldo orgánico de creciente complejidad, hasta que un buen día, por pura casualidad, surgió una molécula dotada de la capacidad de fabricar copias toscas de sí misma, empleando como material de construcción otras moléculas de ese caldo.

Fue éste el más antiguo antepasado del ácido desoxirribonucleico (DNA), la molécula clave de la vida terrestre. Su forma es la de una escalera retorcida en forma helicoidal, con los peldaños situados en cuatro distintas partes moleculares que constituyen las cuatro letras del código genético. Esos peldaños, llamados nucleótidos, transmiten las instrucciones hereditarias que dan nacimiento a un determinado organismo.

Cada forma viviente posee una serie distinta de instrucciones, escritas en un lenguaje que es en lo esencial siempre el mismo. La razón de que los organismos sean diferentes estriba en la diferencia entre sus instrucciones nucleicas. Una mutación es un cambio en un nucleótido que después copia la generación siguiente, la cual procrea ya uno auténtico. Dado que las mutaciones son cambios *fortuitos* de un nucleótido, resultan en su mayor parte nocivas e incluso letales, al dar nacimiento a enzimas no funcionales. Hay que esperar largo tiempo para que una mutación logre mejorar el funcionamiento de un organismo. Y, sin embargo, es ese poco probable acontecimiento, esa mutación be-

neficia en un nucleótido de una diezmillonésima de centímetro de envergadura, lo que impulsa la evolución.

Hace 4.000 millones de años la Tierra era un Paraíso molecular. Todavía no habían aparecido los animales de presa. Algunas moléculas se reproducían en forma poco eficiente, rivalizando entre sí por el "material de construcción", y dejaban copias toscas de sí mismas. Con la reproducción, la mutación y la eliminación selectiva de las variedades menos fuertes, la evolución proseguía sólidamente su camino, incluso en el plano molecular.

A medida que pasaba el tiempo, mejoraban sus capacidades de reproducción. Las moléculas con funciones especializadas terminaron por unirse, formando una suerte de colectividad molecular: la primera célula.

Hace aproximadamente 3.000 millones de años una serie de plantas unicelulares se unieron, quizás porque una mutación impidió que una célula sencilla se separara tras escindirse en dos. Aparecieron así los primeros organismos pluricelulares. Cada célula de nuestro cuerpo es una especie de comuna en la que las partes, antes libres e independientes, se han vinculado entre sí por el bien de todas. Y nuestro cuerpo está formado por unos cien millones de células. Quiere ello decir que cada uno de nosotros es una muchedumbre.

Parece ser que el sexo surgió hace unos 2.000 millones de años. Antes, las nuevas variedades de organismos sólo podían nacer por acumulación de mutaciones fortuitas, es decir por la selección de los cambios, letra a letra, en las instrucciones genéticas. La evolución debió de agonizar lentamente. Con la "invención" del sexo los organismos podían intercambiar párrafos, páginas y libros de su código DNA, produciendo nuevas variedades prestas para el tamiz de la evolución.



Foto © Museo Provincial de Xinjiang, China

Arriba: sobre un fondo de estrellas, estas dos espirales entrelazadas representan en una antigua pintura de China la interacción de los contrarios, el Yin y el Yan, que en la cosmología de ese país da origen a la Creación. A la derecha, una "maqueta" de la doble hélice del DNA (ácido desoxirribonucleico), la molécula clave de la vida que se encuentra en el centro de cada una de las células vivientes. Con su apariencia de una escalera de forma helicoidal, el DNA transmite las instrucciones hereditarias que determinan si un organismo vivo será, por ejemplo, un ciempiés, una ballena, un ser humano o un árbol.

De los animales uni

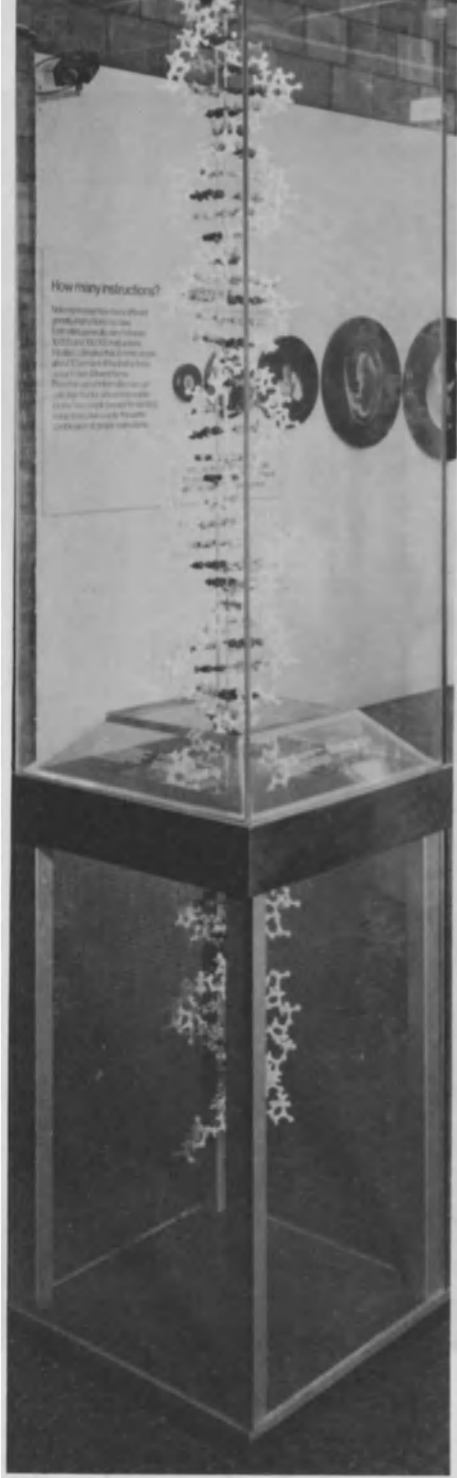
VIDA VEGETAL	Precámbrico	PALEOZOICO						
		Cámbrico	Ordovicense	Siluriano	Devoniano		Carbonífero	
					Inferior	Superior		
Algas Líquenes Hongos	Algas marinas	Plantas acuáticas	Primeras plantas terrestres	Equisetáceas	Helechos	Musgos de tallo	Plantas de pantano	Primeras coníferas
Animales unicelulares Bacterias Primeros moluscos	Braquiópodos Corales Trilobites Moluscos	Peces acorazados y sin mandíbulas	Primeros nautiloideos	Verdaderos peces	Primeros anfibios	Arañas	Escorpiones	Primeros insectos

- 600 millones de años

- 500

- 400

- 300



En una fase que se sitúa en torno a los mil millones de años las plantas, gracias a su actividad cooperativa, habían ya acarreado un cambio radical en el medio ambiente de la Tierra. Las plantas verdes generan oxígeno molecular. Como los océanos rebosaban ahora de plantas verdes muy elementales, el oxígeno se iba convirtiendo en un elemento esencial de la atmósfera terrestre, transformando irreversiblemente su primitiva constitución rica en hidrógeno y poniendo punto final a aquella época de la historia de la Tierra en que la sustancia de la vida consistía en procesos no biológicos. Pero he aquí que el oxígeno tiende a demoler las moléculas orgánicas. Sabida es la afición que tenemos a ese elemento; pero no menos claro es que en lo fundamental actúa como un veneno respecto de la materia orgánica no protegida contra él.

El paso hacia una atmósfera oxidante representó una gravísima crisis en la historia de la vida, de modo que una enorme cantidad de organismos incapaces de hacer frente al oxígeno perecieron. Unas cuantas formas primitivas, como los bacilos del botulismo y del tétanos, se las arreglan aún hoy día para sobrevivir en medios carentes de oxígeno. El nitrógeno de la atmósfera terrestre es mucho más inerte químicamente y, por consiguiente, mucho más benigno que el oxígeno. Pero él también se mantiene biológicamente. Así pues, el 99 por ciento de la atmósfera terrestre es de origen biológico. El cielo está hecho de vida.

Durante la mayor parte de los 4.000 millones de años desde que apareció la vida, los organismos dominantes fueron las microscópicas algas verdiazules que cubrían y llenaban los océanos. Más tarde, hace unos 600 millones de años, se rompió el monopolio de las algas produciéndose una enorme proliferación de formas de vida: la llamada explosión cámbrica.

La vida había aparecido casi inmediatamente después del nacimiento de la Tierra, de lo que parece colegirse que aquella constituye un proceso químico inevitable en un planeta semejante a la Tierra. Pero la vida no fue mucho más allá de las algas verdiazules durante 3.000 millones de años, lo que parece demostrar que las grandes formas vivientes dotadas de órganos especializados son difíciles de producir, más difíciles incluso que la vida misma. Tal vez existan otros muchos planetas que hoy poseen abundantes microbios pero ni un solo gran animal o vegetal.

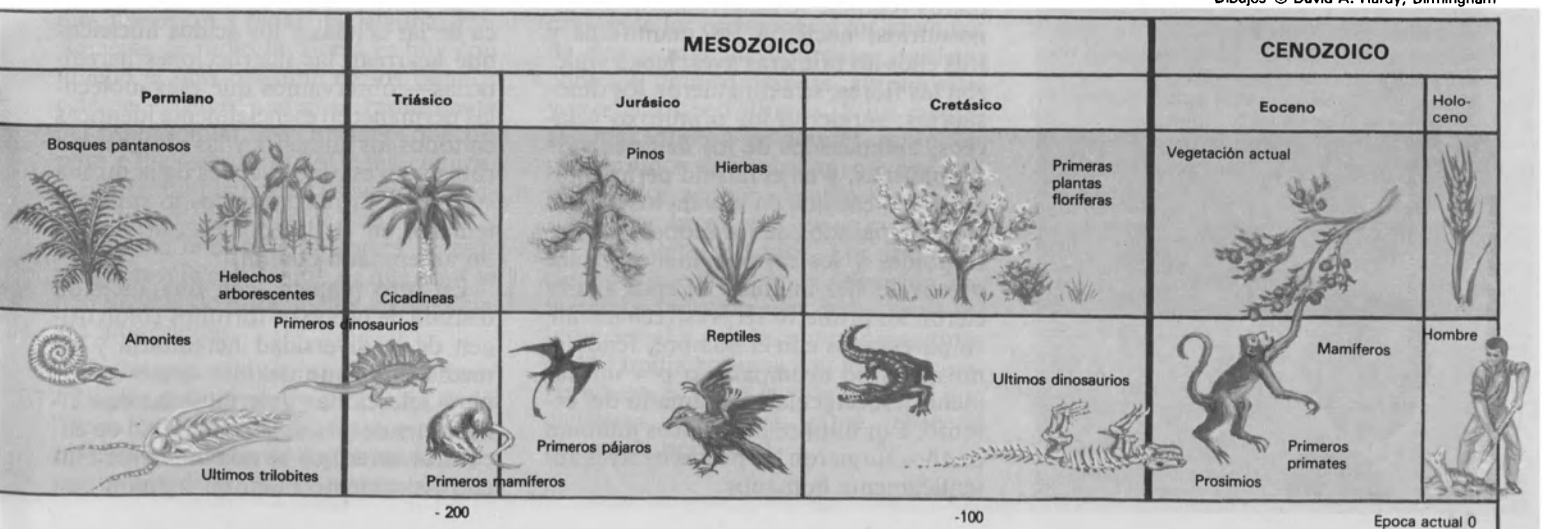
Poco tiempo después de la explosión cámbrica los océanos rebosaban de muy diferentes formas de vida. Hace 500 millones de años había vastos rebaños de trilobites, animales bellamente estructurados un poco a la manera de los grandes insectos. Los trilobites acumulaban cristales en sus ojos para poder detectar la luz polarizada. Pero ya no existen trilobites vivos, ni hoy ni desde hace doscientos millones de años. La Tierra solía estar habitada por plantas y animales de los que hoy no queda traza viviente. Y, como es natural, hubo un momento en que cada una de las especies hoy existentes en nuestro planeta no existía. No hay en las más antiguas capas geológicas el menor indicio de la existencia de animales como nosotros. Las especies aparecen, viven más o menos brevemente y al final se extinguen.

Antes de la explosión cámbrica parece que las especies se sucedían unas a otras más bien lentamente. Pero después los nuevos procesos de delicada adaptación se sucedieron a un ritmo relativamente vertiginoso.

En rápida sucesión aparecieron los primeros peces y los primeros vertebrados; las plantas, que hasta entonces habían quedado confinadas a los océanos, empezaron a colonizar la tierra firme ▶

celulares al hombre

Dibujos © David A. Hardy, Birmingham



"Si existen seres inteligentes en los planetas de las estrellas más cercanas, ¿tendrán noticia de nosotros? Actualmente contamos con un vasto tráfico de comunicaciones por radio, televisión y radar. En algunas frecuencias de radio la Tierra es hoy con mucho el más brillante de los objetos celestes, la más poderosa radiofuente del sistema solar, más brillante que Júpiter e incluso que el Sol. Una civilización extraterrestre que escuche la emisión de radio procedente de la Tierra y que reciba tales señales llegará necesariamente a la conclusión de que aquí se han producido últimamente algunas cosas interesantes". A la derecha, Strahlenlinien (Irradiación), 1927, óleo sobre tela de Vassily Kandinsky.

La vida ha existido en la Tierra desde hace 4.000 millones de años o más. Durante los primeros 2.000 millones, aproximadamente, los organismos se reproducían mediante la división de las células, lo cual muy rara vez produce nuevas formas de vida por mutación fortuita. La aparición de los dos sexos y de la reproducción sexual, que hizo posible el intercambio de enormes cantidades de información genética, dio origen a la deslumbradora variedad de formas de vida y de especies del mundo. El sexo, en tanto que mecanismo biológico, fue "inventado" por las algas verdes. En la foto, células del alga verde Spirogyra en el proceso de la cópula.

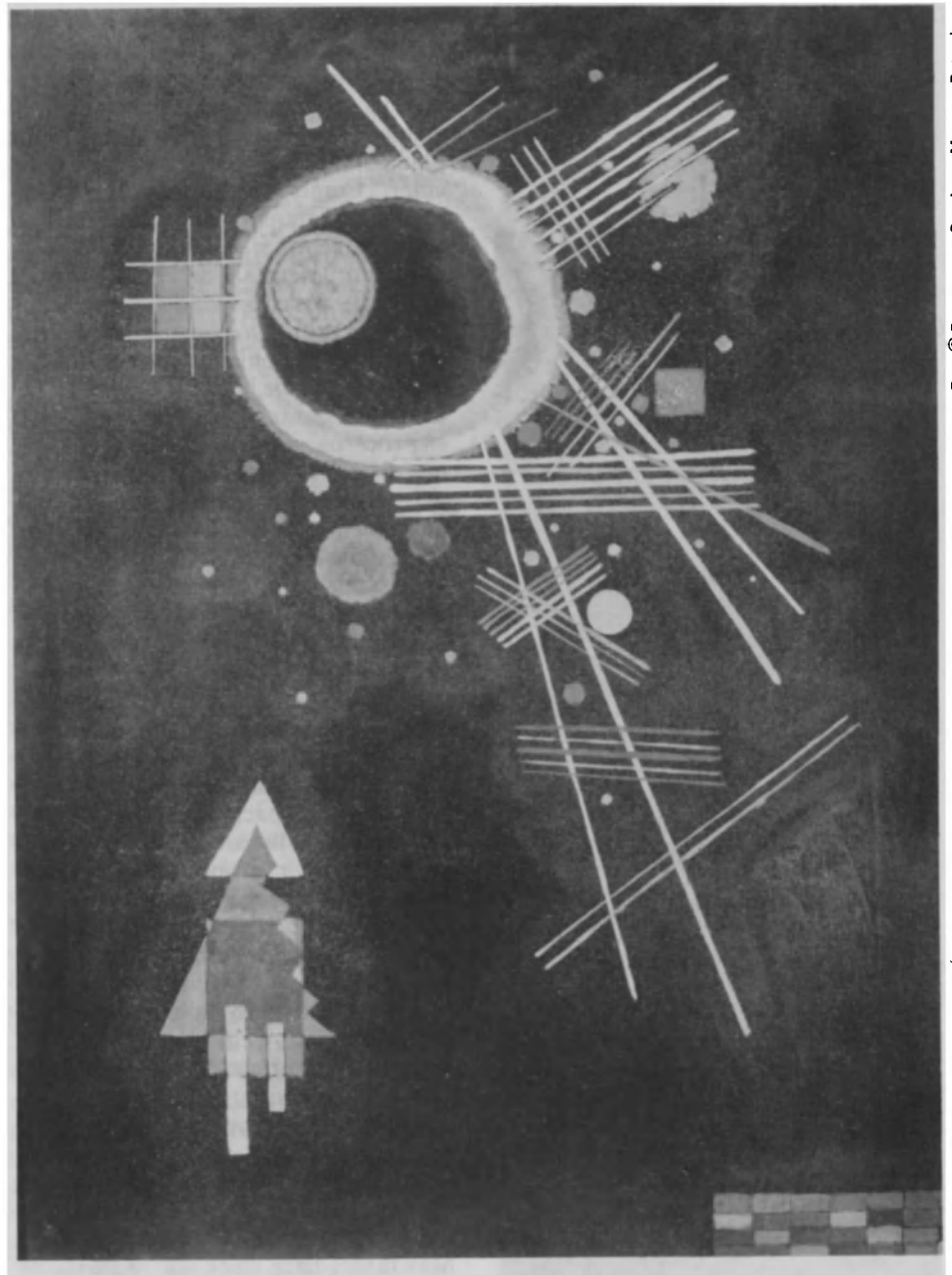


Foto © Boymans van Beuningen Museum, Rotterdam

Foto Ciccone © Rapho, París

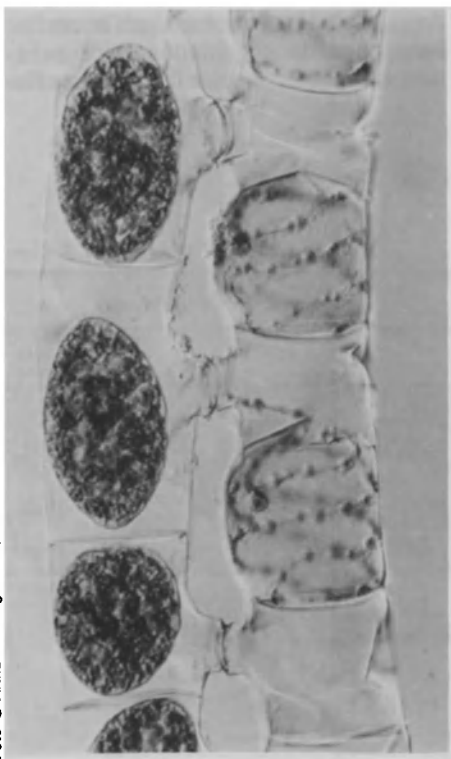


Foto © Arthur M. Siegelmann, Nueva York

► me; surgieron los primeros insectos y sus descendientes se convirtieron en los adelantados de la colonización de la tierra por los animales; los insectos alados nacieron al mismo tiempo que los anfibios, seres parecidos al pez dípneo, capaces de sobrevivir simultáneamente en la tierra y en el agua; hicieron su aparición los primeros árboles y los primeros reptiles; se desarrollaron los dinosaurios; nacieron los mamíferos y tras ellos las primeras aves; luego vinieron las flores; se extinguieron los dinosaurios; surgieron los primitivos cetáceos, antepasados de los delfines y de las ballenas, y en el mismo período hicieron su entrada en la vida los primates, antepasados de los monos, los antropoides y los seres humanos. Hace menos de diez millones de años aparecieron los primeros seres estrechamente emparentados con el hombre, fenómeno que vino acompañado por un aumento espectacular del tamaño del cerebro. Por último, hace pocos millones de años surgieron los primeros seres auténticamente humanos.

Existen decenas de miles de millones de tipos conocidos de moléculas orgánicas. Y, sin embargo, sólo una cincuenta de ellas sirven para las actividades esenciales de la vida. Las mismas fórmulas o pautas se utilizan una y otra vez, conservadora pero ingeniosamente, para realizar distintas funciones. Y en el corazón mismo de la vida terrestre—las proteínas que controlan la química de las células y los ácidos nucleicos que acarrean las instrucciones hereditarias— observamos que esas moléculas permanecen esencialmente idénticas en todos los animales y las plantas. Un roble y yo estamos hechos de la misma sustancia. Si retrocedemos lo suficientemente en el tiempo, encontraremos un antepasado común.

En otro planeta, con una sucesión distinta de procesos fortuitos como origen de la diversidad hereditaria y un medio ambiente distinto como motor para seleccionar determinadas combinaciones de genes, la posibilidad de encontrar seres que se nos asemejen mucho físicamente es en mi opinión casi



nula. Pero no lo es en cambio la posibilidad de encontrar otra forma de inteligencia.

Si existen seres inteligentes en los planetas de las estrellas cercanas ¿tendrán noticia de nosotros? Un medio para saberlo sería escuchar con los grandes radiotelescopios. Actualmente existe un vasto tráfico de comunicaciones por radio, televisión y radar. En algunas frecuencias de radio la Tierra es hoy con mucho el más brillante de los objetos celestes, la más poderosa radiofuente del sistema solar, más brillante que Júpiter e incluso que el Sol. Una civilización extraterrestre que escuche la emisión de radio procedente de la Tierra y que reciba tales señales llegará necesariamente a la conclusión de que aquí se han producido últimamente algunas cosas interesantes.

En conjunto, la fuente de radiotransmisiones más invásora y notoria de la Tierra es la televisión. Como nuestro planeta gira en torno a sí mismo, unas estaciones de televisión aparecerán en

un horizonte de la Tierra mientras otras desaparecen por el otro. Habrá así un confuso revoltijo de programas. Pero incluso esto podría ser corregido y reconstruido por una civilización avanzada nacida en un planeta de una estrella cercana.

Los mensajes repetidos con mayor frecuencia serán las señales de identificación de las estaciones y los anuncios de detergentes, desodorantes, tabletas contra el dolor de cabeza, automóviles y productos petrolíferos. Y los mensajes más dignos de interés serán los transmitidos simultáneamente por muchas emisoras, por ejemplo los discursos de hombres de estado en momentos de crisis internacional. Los insignificantes contenidos de la televisión comercial y las peripecias de las crisis internacionales y de las guerras intestinas de la familia humana son los principales mensajes sobre la vida terrestre que emitimos al Cosmos. ¿Qué deben de pensar de nosotros?

"Los árboles son grandes y hermosas máquinas que toman su energía del sol, el agua de la tierra y el bióxido de carbono del aire, y los convierten en materiales para su consumo y el nuestro (...) Existen decenas de miles de millones de tipos conocidos de moléculas orgánicas. Y sin embargo, sólo una cincuentena de ellas sirven para las actividades esenciales de la vida. Las mismas fórmulas o pautas se utilizan una y otra vez, conservadora pero ingeniosamente, para realizar distintas funciones. Y en el corazón mismo de la vida terrestre (...) observamos que esas moléculas permanecen esencialmente idénticas en todos los animales y las plantas. Un roble y yo estamos hechos de la misma sustancia. Si retrocedemos lo suficientemente en el tiempo, encontraremos un antepasado común".

Un telescopio en el espacio

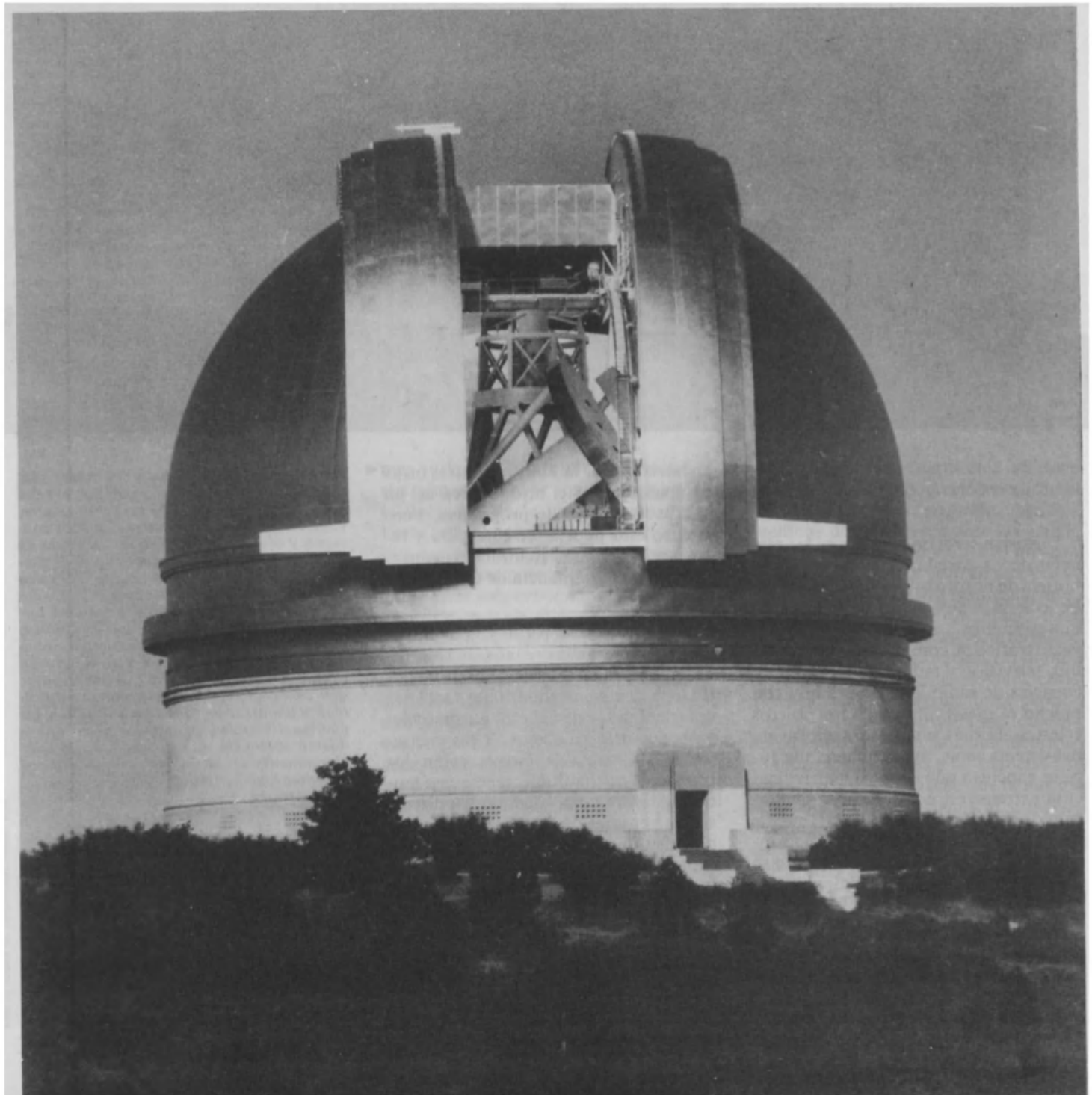
por Albert Ducrocq

ALBERT DUCROQC, ingeniero francés, es también escritor, autor de programas de radio y periodista del diario *Le Figaro de París*. Se ha especializado en cosmología y cuestiones espaciales y es uno de los precursores de la cibernética en Francia. El más reciente de sus numerosos libros, *Le futur aujourd'hui (El futuro hoy)*, acaba de ser publicado por "Les Presses de la Cité", de París.

CONCEBIDO para ampliar 350 veces el volumen del Universo observable, el Telescopio Espacial será el instrumento científico más importante jamás enviado al espacio, según James Beggs, administrador de la NASA. Será puesto en órbita, a 550 kilómetros de la Tierra, en el curso de 1986, por una lanzadera espacial cuyas dimensiones han determinado las del telescopio: el cuerpo cilíndrico de éste tendrá 13,1 metros de largo y su diámetro será de 4,27.

El telescopio, cuyo peso es de 11 toneladas, apenas difiere del que concibieron en el siglo XVII el físico francés N. Cassegrain y

el matemático escocés James Gregory. La luz llega a un espejo hiperboloide cóncavo primario de 2,4 metros de diámetro, es reflejada a un espejo convexo de 30 centímetros, a cinco metros de distancia, y luego atraviesa un orificio de 60 centímetros situado en el centro del espejo primario. De allí pasa a los instrumentos destinados a detectar y medir los rayos, a saber: un fotómetro de gran velocidad, un espectrómetro de alta resolución para estudiar la composición química de los objetos celestes, un espectrómetro de alta sensibilidad para observar la velocidad de éstos, una cámara mixta planetaria de gran campo óptico sen-



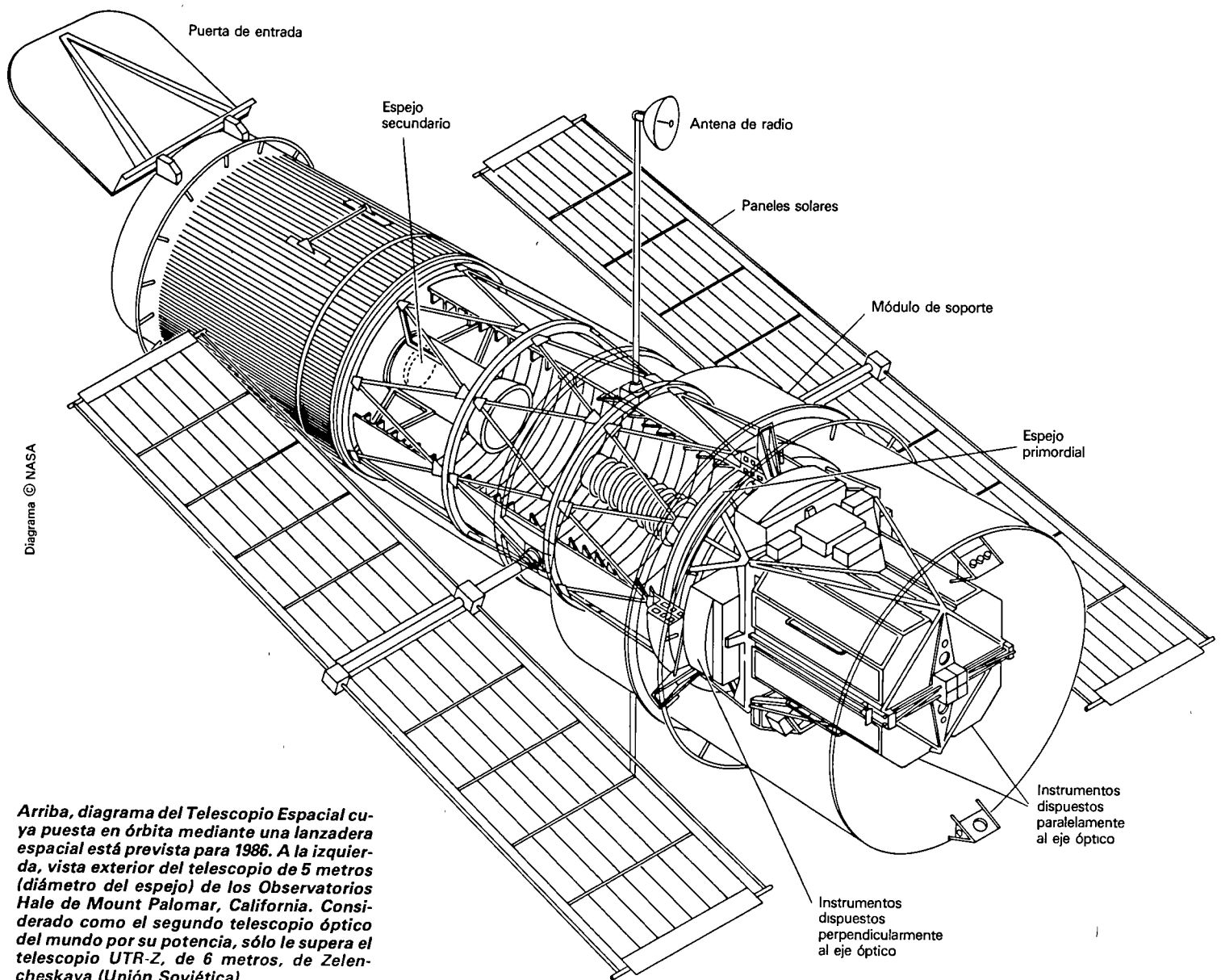


Diagrama © NASA

Arriba, diagrama del Telescopio Espacial cuya puesta en órbita mediante una lanzadera espacial está prevista para 1986. A la izquierda, vista exterior del telescopio de 5 metros (diámetro del espejo) de los Observatorios Hale de Mount Palomar, California. Considerado como el segundo telescopio óptico del mundo por su potencia, sólo le supera el telescopio UTR-Z, de 6 metros, de Zelencheskaya (Unión Soviética).

sible a todas las longitudes de onda —desde los rayos infrarrojos hasta los ultravioletas— y una cámara ultrasensible, con un campo óptico 40 veces menor, llamada FOC (Faint Object Camera), o sea cámara para objetos de escasa luminosidad.

Los grandes telescopios de Mount Palomar, en Estados Unidos, y de Zelencheskaya, en la Unión Soviética, tienen 5 y 6 metros de apertura, respectivamente, pero se espera un rendimiento mayor del Telescopio Espacial, ante todo por el extraordinario esmero con que se ha fabricado su espejo a partir de una placa de silicato de tetanio con un coeficiente sobremano bajo de dilatación térmica, sujeto a una estructura reticular. La construcción del espejo, que pesa 829 kilos, comenzó en octubre de 1977 y terminó en diciembre de 1978. Su pulimento, controlado por medio de computadoras, es tan preciso que la desviación total de las superficies refringentes, en relación con el modelo teórico, es de 10 nanómetros (1 nanómetro = 1 millonésima de milímetro). La misma precisión se ha observado en la aplicación de una envoltura de aluminio de 80 nanómetros y de una capa protectora de fluoruro de magnesio de 25 nanómetros.

Las observaciones que se realizan desde la Tierra jamás son óptimas debido a la turbulencia de la atmósfera terrestre, pues aun cuando se la considera serena las estrellas

“bailan” en un telescopio común. Pero en el espacio no existen tales inconvenientes.

¿Cómo se orientará y controlará el Telescopio Espacial? Su parte posterior es un “módulo de soporte” destinado a servir de plataforma y está equipada con un detector estelar y un giroscopio, lo que permitirá obtener una precisión en el enfoque de 7 milésimas de segundo (lo cual significa que se puede enfocar un objeto a 30 kilómetros de distancia con una desviación de 1 milímetro) y durante un periodo de muy larga duración. Para algunos programas se ha previsto el mantenimiento constante del enfoque durante diez horas con lo que se alcanzará la 29ª magnitud estelar.

El Telescopio Espacial no tomará fotografías. Al sistema de película se ha preferido un detector sólido llamado CCD (Charge Coupled Device), o sea un dispositivo de transferencia de carga. Cada CCD (habrá cuatro) tiene la forma de un cuadrado de 1,2 centímetros de lado y contará con 640.000 elementos que deberán actuar como otras tantas células acopladas a un amplificador de la luz, de modo que su sensibilidad será 50 veces mayor que la de cualquier tipo de película.

Un sistema especial instalado en el módulo de soporte transmitirá a la Tierra un millón de bits de información por segundo, gracias al TDRS (Tracking and Data Relay

Satellite) de la NASA. En el módulo se instalará también el sistema de distribución de la energía necesaria, mediante dos paneles solares situados a lado y lado del telescopio. Sus dimensiones serán de $2,3 \times 11,8$ metros y se espera que produzcan 2,4 kilovatios.

Todo el trabajo de orientación y control del telescopio así como las experiencias e investigaciones se harán desde la Tierra utilizándose para ello los instrumentos científicos dispuestos en ocho cajones en la parte posterior del aparato. Pero es posible también que de tiempo en tiempo—quizás cada dos años—equipos de astrónomos especializados controlen el funcionamiento de los instrumentos, realicen los reajustes que requieran e incluso los reemplacen desde la lanzadera espacial, porque es preciso evitar todo contacto humano directo mientras el telescopio esté en funcionamiento. Dado el grado de precisión que se persigue, hasta los simples latidos del corazón humano podrían hacerlo vibrar.

El Telescopio Espacial será la cabeza de lanza de la astronomía hasta fines del presente siglo. El programa establecido prevé que tras cinco años de servicio el telescopio vuelva a la Tierra con la lanzadera espacial, a fin de modernizar su equipo con los nuevos y más compactos CCD que se habrán desarrollado para entonces. □

Glosario

AGUJERO NEGRO. Región hipotética del espacio que tiene una fuerza de gravitación tan grande que ni la materia, ni la radiación y ni siquiera la luz pueden escapar de ella. Se supone que tales regiones se forman cuando una estrella de gran masa se hunde en sí misma tras haber consumido todo el combustible contenido en su núcleo (véase la página 22).

AÑO-LUZ. Distancia que recorre la luz en un año, o sea $9,460 \times 10^{15}$ metros, aproximadamente diez billones de kilómetros.

BARIONES. Nombre genérico de los neutrones y protones.

CERN. Abreviatura del antiguo "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire", hoy Organización Europea de Investigaciones Nucleares, creado en Ginebra, Suiza, en 1952.

CORRIMIENTO HACIA EL ROJO. Desviación hacia el extremo rojo en el espectro de las ondas de luz de las estrellas o de otros objetos celestes. Tal desviación indica que estos objetos se alejan. El corrimiento hacia el rojo es la prueba más evidente de la expansión del Universo (véase la página 16).

ELECTRON. Partícula de carga negativa que forma parte de todos los átomos.

ESTRELLA DE NEUTRONES. Estrella que al final de su proceso evolutivo se ha contraído inmensamente por la fuerza de gravitación.

GALAXIA. Gran sistema de estrellas, polvo y gases. La Vía Láctea, de la que forma parte nuestro sistema solar, es una galaxia espiral.

GRUPO LOCAL. Cúmulo de unas veinte galaxias conocidas, entre ellas la Vía Láctea.

KELVIN. (Símbolo: K). Escala de temperaturas que debe su nombre al del físico británico William Thomson (Lord Kelvin) y que toma el cero absoluto como punto de partida, lo que en la escala Celsius (centígrados) equivale a $-273,15$ grados. Los intervalos en ambas escalas son iguales de modo que una temperatura expresada en grados centígrados en la escala Kelvin es la misma menos 273,15 grados.

NEBULOSA. Región de polvo y gas en una galaxia. En el pasado solía emplearse este término para designar una galaxia.

NEUTRON. Partícula elemental que forma parte del núcleo de todos los átomos excepto del de hidrógeno.

POSITRON. Antipartícula de carga positiva, que corresponde al electrón.

PROTON. Partícula elemental de carga positiva que forma parte del núcleo de todos los átomos.

PULSAR. Estrella de neutrones que gira y emite impulsos de radiación cortos y regulares.

QUARK. Partícula subatómica hipotética. Se supone que los bariones están formados por tres quarks juntos.

QUASAR. (Del inglés "Quasi Stellar Radio Sources"). Fuentes extragalácticas de radiación electromagnética de alta energía.

SUPERNOVA. Estrella pesada que al final de su fase de estrella gigante roja estalla y brilla brevemente con una luminosidad equivalente a la de mil millones de soles.

TEORIA DEL BIG BANG. Teoría según la cual el Universo ha evolucionado a partir de la explosión de una aglomeración de materia infinitamente densa. Se supone que la expansión del Universo es consecuencia de tal explosión, con las galaxias separadas entre sí como los fragmentos de una bomba que estalla (véase el artículo de la página 5).

TEORIA DEL ESTADO ESTACIONARIO. Teoría según la cual el Universo ha existido siempre en el mismo estado, compensándose su expansión con una continua creación de materia.

VIA LACTEA. Galaxia espiral de algunos miles de millones de estrellas, incluido en estas el Sol.

Tarifas de suscripción:

1 año: 58 francos (España: 1.450 pesetas). 2 años (únicamente en Francia): 100 francos. Tapas para 12 números (1 año): 46 francos.

Redacción y distribución:

Unesco, place de Fontenoy, 75700 París

Los artículos y fotografías que no llevan el signo © (copyright) pueden reproducirse siempre que se haga constar "De EL CORREO DE LA UNESCO", el número del que han sido tomados y el nombre del autor. Deberán enviarse a EL CORREO tres ejemplares de la revista o periódico que los publique. Las fotografías reproducibles serán facilitadas por la Redacción a quien las solicite por escrito. Los artículos firmados no expresan forzosamente la opinión de la Unesco ni de la Redacción de la revista. En cambio, los títulos y los pies de fotos son de la incumbencia exclusiva de ésta. Por último, los límites que figuran en los mapas que se publican ocasionalmente no entrañan reconocimiento oficial alguno por parte de las Naciones Unidas ni de la Unesco.

Redacción y distribución:

Unesco, place de Fontenoy, 75700 París

Subjefe de redacción:

Olga Rödel

Secretaría de redacción:

Gillian Whitcomb

Redactores principales:

Español: Francisco Fernández-Santos (París)
Francés: Alain Lévêque (París)
Inglés: Howard Brabyn (París)
Ruso: Nikolai Kuznetsov (París)
Arabe: Sayed Osman (París)
Alemán: Werner Merkli (Berna)
Japonés: Seiichiro Kojimo (Tokio)
Italiano: Mario Guidotti (Roma)
Hindi: Rajmani Tiwari (Delhi)
Tamul: M. Mohammed Mustafa (Madrás)
Hebreo: Alexander Broïdo (Tel-Aviv)
Persa: Hossein Razmdyu (Teherán)
Portugués: Benedicto Silva (Río de Janeiro)
Neerlandés: Paul Morren (Amberes)
Turco: Mefra Ilgazer (Estambul)
Urdu: Hakim Mohammed Said (Karachi)
Catalán: Joan Carreras i Martí (Barcelona)
Malayo: Azizah Hamzah (Kuala Lumpur)

Coreano: Paik Syeung-Gil (Seúl)
Swahili: Domino Rutayebesibwa (Dar es-Salam)
Croata-servio, esloveno, macedonio y servio-croata: Vitomir Sudarski (Belgrado)
Chino: Shen Guofen (Pekín)
Búlgaro: Goran Gotev (Sofía)
Griego: Nicolas Papageorgiu (Atenas)
Braille: Frederick H. Potter (París)

Redactores adjuntos:

Español: Jorge Enrique Adoum
Francés: Neda el Khazen
Inglés: Roy Malkin
Documentación: Christiane Boucher
Ilustración: Ariane Bailey
Composición gráfica: Georges Servat
Promoción y difusión: Fernando Ainsa
Proyectos especiales: Peggy Julien

La correspondencia debe dirigirse al director de la revista.

PUBLICACIONES DE LA UNESCO

SOBRE

EL DESARME Y LA PAZ

Los problemas mundiales en la escuela

Estudios y documentos de educación
69 páginas. 12 francos franceses

Aprender a ser

La educación del futuro
Publicación conjunta : Alianza
Editorial/Unesco. Distribución exclusiva
en España : Alianza Editorial S.A.,
Madrid 33
426 p. 22 FF

Las empresas transnacionales y el desarrollo endógeno

Balance de conocimientos sobre el impacto
sociocultural de las actividades de las
empresas transnacionales y sus efectos en
el desarrollo cultural, la comunicación, la
educación, la ciencia y la tecnología
307 p. 90 FF

Hacia un nuevo orden económico internacional

por Mohammed Bedjaoui
Nuevos horizontes del derecho
internacional
243 p. 45 FF

Peligros de las armas modernas para el hombre y el medio ambiente

Selección representativa de las obras
publicadas en todo el mundo sobre las
relaciones entre la guerra y el medio
humano
29 p. 8 FF

Ideas para la acción

La Unesco frente a los problemas de hoy y
al reto del mañana
392 p. 36 FF

La carrera armamentista y el desarme : consecuencias sociales y económicas

Tendencias de la investigación y
bibliografía
50 p. 8 FF

Investigación sobre la paz

Tendencias recientes y repertorio mundial
252 p. 26 FF

Los científicos, la carrera armamentista y el desarme

La responsabilidad social de los científicos
en la carrera armamentista y el desarme.
Conclusiones y recomendaciones para una
acción futura
400 p. 132 FF

Construyendo el futuro

por Amadou-Mahtar M'Bow
La Unesco y la solidaridad de las naciones
253 p. 18 FF

El mundo en devenir

Reflexiones sobre el nuevo orden
económico internacional
146 p. 15 FF

Las raíces del futuro

por Amadou-Mahtar M'Bow
Principales orientaciones de la acción de la
Unesco durante el decenio de 1980 en los
sectores de la educación, la ciencia, la
tecnología, la cultura y la comunicación
124 p. 20 FF

La violencia y sus causas

Los trabajos presentados en esta
publicación dan una respuesta y precisan la
importancia de recurrir al método
interdisciplinario en el estudio de las causas
de la violencia.
303 p. 38 FF

¿Dominar o compartir?

Desarrollo endógeno y transferencia de
conocimientos
298 p. 45 FF

Del temor a la esperanza

Los desafíos del año 2000
221 p. 38 FF

Apartheid : poder y falsificación de la historia

por Marianne Cronevin
Valiéndose de los descubrimientos de la
investigación moderna, la autora refuta las
mayores falsificaciones de la historia
oficial sudafricana y analiza la ideología
del apartheid
151 p. 38 FF

