

Aparato para la medición del efecto Faraday

S. Galindo y S. Cruz¹

*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Apartado Postal 18-1027, 11801 México D.F., México
¹Programa de Ciencia de Materiales UAEM,
Colón y Tolloca, 50120 Toluca Edo.Mex., México*

Recibido el 25 de septiembre de 2001; aceptado el 1 de febrero de 2002

Se describe un aparato de demostración del efecto Faraday para un laboratorio de licenciatura. Las principales características del instrumento son: el uso de diodos emisores de luz como fuente monocromática, el empleo de un sistema de agua de enfriamiento para mantener la muestra y la bobina de campo magnético a temperatura constante y el uso de la técnica de media sombra para mediciones de rotación angular. El aparato puede ser construido con piezas de desecho.

Descriptores: Efecto Faraday; efectos magneto- ópticos; auxiliares educativos.

A Faraday rotation demonstration apparatus for an undergraduate laboratory is described. The main features of the instrument are: The use of light emitting diodes as the monochromatic source, the employment of a cooling water system to keep the sample and the magnetic field coil at a constant temperature, and the use of the half shadow effect for angular rotation measurements. The apparatus can be built from scraps.

Keywords: Faraday effect; magneto-optical effects; educational aids.

PACS: 0150; 7820L; 3345

1. Introducción

La enseñanza de fenómenos ópticos relacionados con la luz polarizada forma parte de los temas de estudio en los cursos de introducción a la óptica física a nivel licenciatura [1,2,3] Entre los temas cubiertos por estos cursos se encuentra el de la actividad óptica. Sin embargo, es notorio el menor énfasis y algunas veces la ausencia de la enseñanza de la actividad óptica cuando el fenómeno se produce por la presencia de un campo magnético aplicado. La manifestación de actividad óptica, magnéticamente inducida, se conoce como el “ efecto Faraday” .

La importancia de enseñar el efecto Faraday en la temprana formación de un físico es triple. Por un lado permite mostrar al estudiante una pieza clave en el desarrollo histórico del electromagnetismo. Por otro lado, es relevante pedagógicamente ya que su explicación, en materiales no magnéticos, puede darse en el marco de la física clásica abarcando diversos aspectos de la misma. Este hecho permite desarrollar en el estudiante una visión unificada de la física, evitando que la perciba como una serie de compartimientos desconectados entre sí. Finalmente, las múltiples aplicaciones del efecto Faraday en dispositivos tecnológicos y su uso en la determinación de campos magnéticos hacen necesaria su inclusión en cursos tempranos. Cabe hacer notar que las aplicaciones del efecto Faraday abarcan, desde la construcción de moduladores e interruptores ópticos ultra rápidos [4], pasando por la medición de campos magnéticos espaciales en la astrofísica moderna [5], hasta la medición de varias propiedades macroscópicas de películas delgadas como son: la forma de las curvas de histéresis, el campo coercitivo, la temperatura de Curie, el campo anisótropo y la variación de la magnetización con la temperatura [6].

Es la intención de este trabajo presentar el diseño y construcción de un aparato de demostración del efecto Faraday. El diseño del instrumento puede ser cambiado y mejorado por los propios estudiantes, lo que les permite explorar aspectos básicos de la instrumentación.

Para nuestro propósito hemos dividido al trabajo en varias secciones. Iniciamos señalando en dónde se encuentra enclavado el efecto Faraday dentro un marco histórico. Después definimos en qué consiste el efecto y damos una breve explicación clásica del fenómeno. En seguida especificamos las consideraciones de diseño del aparato de demostración y los detalles de construcción. Los resultados de las mediciones hechas con el aparato son reportados posteriormente y al final se discuten las ventajas del aparato aquí presentado sobre trabajos anteriores.

2. El efecto Faraday

2.1. Marco histórico

El lugar del efecto Faraday en el desarrollo histórico de la física se enclava en una serie de acontecimientos que desembocan en el descubrimiento de la naturaleza electromagnética de la luz.[7].

La naturaleza ondulatoria de la luz fue propuesta inicialmente por Christian Huygens en 1678 y demostrada experimentalmente entre 1800 y 1803 por Thomas Young y redescubierta por Agustín Fresnel en 1814 [8]. Sin embargo, el primer indicio de la conexión de las ondas luminosas con el electromagnetismo fue establecido por Michael Faraday en 1845 [9]. La conexión es indirecta, ya que se requiere de un medio material para que el efecto ocurra.

La teoría electromagnética de Maxwell formulada en

1865 predijo la existencia de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz. Esta teoría obligó a los físicos de aquella época a buscar la forma de probar experimentalmente la predicción maxwelliana. Dicha predicción fue confirmada cuando Hertz realiza experimentos entre 1885 y 1889, en los que produce y detecta ondas electromagnéticas, además de medir su velocidad y demostrar sus propiedades de reflexión, refracción e interferencia, propiedades idénticas a las mostradas por la luz. Como detalle importante, Hertz, en la mencionada serie de experimentos, descubre el efecto fotoeléctrico y alude a él como la segunda conexión indirecta entre la luz y la electricidad; señalando como la primera conexión precisamente al efecto Faraday [10].

2.2. Descripción del efecto.

El efecto Faraday se observa cuando un campo magnético es aplicado a un material por el cual se transmite un haz de luz polarizada en un plano. Cuando el material se somete a un campo magnético aplicado y es atravesado por un haz de luz polarizada, la luz permanece linealmente polarizada, pero su plano de polarización va girando en el trayecto dentro del material. Este efecto de giro es el efecto Faraday. Si el campo magnético deja de ser aplicado al material, el plano de polarización mantiene su orientación original.

El efecto se ilustra en la Fig. 1. En ésta el plano de polarización se halla representado por la superficie sobre la que oscila la componente del campo eléctrico \vec{E} de la onda luminosa. Además se observa que el plano de polarización se haya orientado verticalmente antes de que el haz de luz atraviese la muestra. Durante el trayecto a través de la muestra, el plano de polarización va girando y emerge del medio transmisor con un ángulo de giro con respecto a su dirección original. Este ángulo de giro está dado por

$$\theta = V \int_0^X \vec{B} \cdot d\vec{x} = VBX \quad (1)$$

donde \vec{B} es el flujo magnético del campo aplicado, \vec{x} es un vector cuya dirección es misma que la del haz de luz que atraviesa la muestra y cuya magnitud X es igual a la longitud del camino óptico en la muestra. Finalmente V es una constante asociada a cada sustancia en particular. Esta constante recibe el nombre de constante de Verdet y depende de la longitud de onda de la luz y de la temperatura del material.

Las constantes de Verdet pueden ser positivas o negativas. Por convención, una constante positiva corresponde a la situación ilustrada en la Fig. 1. Es decir, en esta figura se observa que el plano de polarización gira en el sentido de las manecillas del reloj para un observador situado frente a la muestra y con la dirección del campo magnético tal y como se halla indicada. En contraste, una constante de Verdet negativa involucra un giro contrario al mencionado.

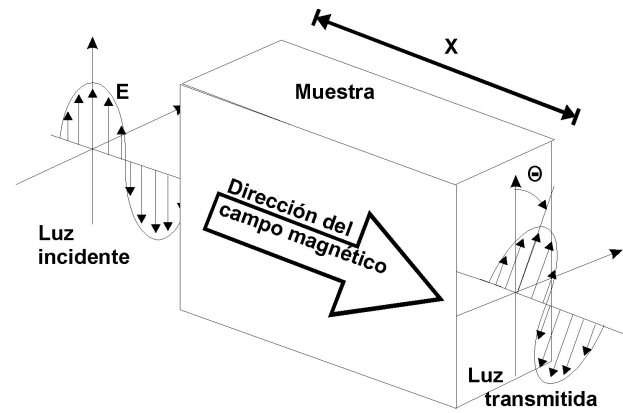


FIGURA 1 Efecto Faraday. Solo se muestra el plano de polarización del vector eléctrico E .

En la Fig. 1 se muestra la situación en el que la luz viaja a través de la muestra en el mismo sentido que el campo aplicado \vec{B} . Si se invierte la dirección del campo magnético, el plano de polarización girará en un sentido contrario al mostrado en la mencionada figura. Ahora bien, si en lugar de invertir la dirección del campo magnético, el haz de luz se refleja en un espejo colocado enfrente de la muestra, el haz retro-reflejado, viajará ahora en un sentido opuesto al campo. En consecuencia, para un observador situado en el mismo lugar anterior, es decir frente a la muestra, el plano de polarización del haz retro-reflejado, seguirá girando en el sentido de las manecillas del reloj. En otras palabras, si la luz atraviesa de ida y vuelta a la muestra, su plano de polarización al emerger de la muestra habrá girado el doble. En resumen, el efecto de giro para haces retro-reflejados es acumulativo.

Una ventaja práctica de este hecho, es que pueden construirse rotores ópto-magnéticos resonantes mediante la colocación de espejos mediante los cuales el haz lumínico puede pasar varias veces a través del material y de esta manera los giros se van acumulando y se pueden lograr giros de uno o dos ordenes de magnitud mayores a los que se logran con un solo paso del haz [11].

3. Modelo clásico

El efecto Faraday es consecuencia de la interacción entre el campo magnético y el material sobre el cual el campo está siendo aplicado. Como explicaremos a continuación, esta interacción altera las propiedades del material para transmitir la luz linealmente polarizada.

El estudio teórico del efecto Faraday involucra a la teoría cuántica de la dispersión incluyendo los efectos del campo magnético sobre los niveles atómicos o moleculares. Sin embargo para materiales no magnéticos la expresión dada por la ecuación (1) puede ser deducida en términos clásicos. Proporcionaremos a continuación una síntesis de la explicación clásica del fenómeno dada por Becquerel en 1897 [12].

La descripción se inicia recurriendo a un principio elemental de la mecánica que dice que cualquier movimiento

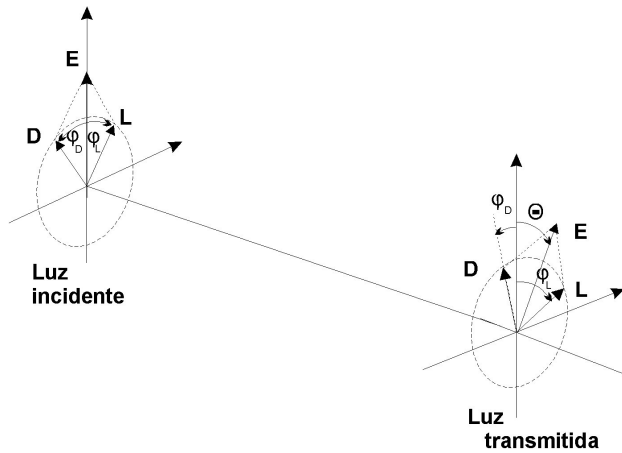


FIGURA 2 Rotación del haz linealmente polarizado representado por el vector eléctrico E . Su componente ordinaria D y extraordinaria L giran en direcciones opuestas.

armónico sobre una línea recta, puede ser descrito como la resultante de dos movimientos circulares opuestos con la misma amplitud y período. Esto implica que un haz de luz linealmente polarizado, representado por el vector de campo eléctrico \vec{E} desplazándose en un plano, puede descomponerse en dos vibraciones circulares D y L (dextrógira u ordinaria y levógira o extraordinaria) girando en direcciones opuestas y a la misma frecuencia que \vec{E} , como lo muestra la Fig. 2.

La rotación óptica del plano de polarización de un haz de luz que atraviesa el medio, es explicada por el hecho de que alguna de las dos componentes del vector \vec{E} , ya sea la D o la L , atraviesa el material más lentamente que la otra componente y en consecuencia una de ellas se defasa. Esto se ilustra en la Fig. 2 donde se observa que inicialmente, al incidir la luz sobre el material, ambas componentes entran en fase $(\varphi_D - \varphi_L) = 0$, pero al salir del material hay defasamiento, esto es: $(\varphi_D - \varphi_L) \neq 0$. Como resultado se tiene que el vector de campo eléctrico \vec{E} se encuentra en un plano rotado por un ángulo θ con respecto a su orientación original.

El hecho de que cada una de las componentes L y D atraviese la muestra a distinta velocidad puede ser descrito por dos índices de refracción distintos, n_l y n_d , respectivamente. Esta situación se conoce como birrefringencia circular.

En forma cuantitativa podemos describir la rotación del plano de polarización en términos de la birrefringencia circular que presenta la muestra, de la siguiente manera. Sí la muestra tiene una longitud X , las extensiones de los caminos ópticos para cada una de las componentes D y L de la luz son entonces $n_l \times X$ y $n_d \times X$ respectivamente. Estas cantidades pueden representarse en una escala de longitudes de onda λ como $n_l \times \frac{X}{\lambda}$ y $n_d \times \frac{X}{\lambda}$. Ahora bien, por cada longitud de onda que recorran las componentes, éstas giran 2π grados. En consecuencia la componente L , después de atravesar la muestra, habrá girado un ángulo $\varphi_l = 2\pi(n_l \times \frac{X}{\lambda})$ mientras que la componente D habrá girado $\varphi_d = 2\pi(n_d \times \frac{X}{\lambda})$. La Fig. 2 presenta esquemáticamente la suma de las componentes L y D para la luz transmitida a través de la muestra. Es simple deducir geoméricamente de la figura referida que

$\theta = (1/2)(\varphi_l - \varphi_d)$. Esto es, el plano de polarización sufre una rotación con respecto a su dirección original igual a

$$\theta = \frac{1}{2}(2\pi \times \frac{X}{\lambda})(n_l - n_d) \tag{2}$$

Esta relación indica que para una longitud de onda constante, el ángulo de giro θ es directamente proporcional al espesor X de la muestra. Sin embargo, hay que tener cuidado pues no podemos decir que es inversamente proporcional a la longitud de onda λ , ya que los índices de refracción n_l y n_d , son también función de λ . La dependencia del índice de refracción con la longitud de onda es un fenómeno conocido como dispersión. Un ejemplo muy claro que puede ser recordado a los estudiantes, es el de un prisma separando o dispersando luz blanca en los colores primarios según la longitud de onda de los mismos. Una ecuación que conecta el índice de refracción con la frecuencia de la luz $\nu = \frac{c}{\lambda}$ es llamada relación de dispersión. Debemos entonces proceder a calcular las relaciones de dispersión $n_l(\nu_l)$ y $n_d(\nu_d)$, para el caso que nos ocupa, de acuerdo a algún modelo apropiado.

Quizás la manera más sencilla de obtener las relaciones de dispersión, a nivel licenciatura, es utilizando el modelo elemental del efecto Zeeman clásico. Este modelo se maneja ya en un primer curso de física moderna. Este modelo supone que la muestra está formada por electrones girando en órbitas circulares orientadas al azar. Para que se produzca el efecto Faraday es necesario aplicar un campo magnético a la muestra. Es tal vez prudente recordar a los alumnos que el efecto de un campo magnético externo sobre las órbitas de los electrones es similar al de un trompo bajo la influencia del campo gravitatorio terrestre. Es decir, la órbita circular establece un movimiento de precesión alrededor de la dirección del campo B . De acuerdo con el teorema de Larmor, la frecuencia de precesión en un sistema de referencia inercial (el del laboratorio) está dada por $\nu_L = (\frac{eB}{4\pi m})$ donde e y m son respectivamente la carga y la masa del electrón. Si el movimiento es descrito desde un marco de referencia distinto, esto es, situado en el electrón y que gire con una frecuencia ν_L , entonces las componentes L y D de la luz polarizada, se hallarán girando con las frecuencias $\nu + \nu_L$ y $\nu - \nu_L$ respectivamente. Por lo tanto, las relaciones de dispersión pueden escribirse como funciones de estas dos últimas variables:

$$n_l = n(\nu_l) = n(\nu + \nu_L), \quad n_d = n(\nu_d) = n(\nu - \nu_L).$$

La diferencia entre las relaciones de dispersión, $(n_l - n_d)$, es entonces función de

$$(n_l - n_d) = n(\nu + \nu_L) - n(\nu - \nu_L).$$

Ahora bien, para la situación en la cual $\nu \approx \nu_L$ un desarrollo en serie nos permite escribir

$$(n_l - n_d) \approx (n(\nu) + \frac{dn}{d\nu}\nu_L) - (n(\nu) - \frac{dn}{d\nu}\nu_L) = 2\nu_L \frac{dn}{d\nu}.$$

Expresando esta relación en términos de la longitud de onda e introduciendo el valor de la frecuencia de Larmor, se

obtiene de manera explícita la diferencia entre relaciones de dispersión

$$(n_l - n_d) \approx 2 \left(\frac{eB}{4\pi m} \right) \left(\frac{\lambda^2}{c} \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

Por lo que de acuerdo a la Ec. (2), el plano de polarización sufre una rotación con respecto a su dirección original aproximadamente igual a

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi X}{\lambda} \right) \left(2 \left(\frac{eB}{4\pi m} \right) \left(\frac{\lambda^2}{c} \frac{dn}{d\lambda} \right) \right). \quad (3)$$

Finalmente, recordando que $\theta = VBX$, el valor de la constante de Verdet resulta ser

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (4)$$

Este modelo nos indica que la constante V es proporcional a la longitud de onda y la dispersión del medio. Debemos señalar que el modelo aquí presentado, es aproximado y válido sólo cuando la rotación de Larmor es dominante en un material [13]. Para sustancias diamagnéticas y paramagnéticas la relación dada por la Ec.(3) es válida si se introduce al lado derecho de la ecuación un factor γ , llamado anomalía magneto-óptica [13]. Este factor representa una medida de la desviación de la rotación de Larmor. Para otros materiales como las sustancias ferromagnéticas, la Ec. (3) también sigue siendo válida, pero el giro es proporcional a la componente de la magnetización en la dirección de propagación de la onda, en lugar de ser proporcional a la componente del campo magnético aplicado. Sin embargo la dependencia de la constante V con la temperatura no es explícita en estos modelos y se tiene que recurrir a modelos mecánico-cuánticos más sofisticados. No es el propósito de este trabajo describir éstos, solamente referiremos al lector interesado a consultar la literatura al respecto [14,15,16].

4. El dispositivo experimental

4.1. Consideraciones de diseño

En términos generales, son tres las partes esenciales de un instrumento para la medición de las constantes de Verdet. La primera es una fuente de luz polarizada situada en uno de los dos extremos de la muestra. La segunda consiste de un polarizador, llamado analizador, situado en el extremo opuesto a la fuente. El analizador debe ser capaz de girar sobre un eje perpendicular a su plano de polarización y estar montado sobre una escala angular graduada. Por último, el instrumento deberá contar con un dispositivo generador de un campo magnético estable.

El principio de operación del instrumento reside en ajustar el analizador de tal manera que excluya totalmente el paso de la luz proveniente de la fuente polarizada después de haber atravesado la muestra. Acto seguido, sobre la muestra se

aplica un campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la onda lumínica. Como consecuencia de la aplicación del campo, el efecto Faraday se hará presente y entonces cierta cantidad de radiación atravesará el analizador. El ángulo a través del cual el analizador deberá ajustarse, con el objeto de excluir una vez más el paso de radiación, corresponde a la rotación θ del plano de polarización con respecto a su dirección original.

Las consideraciones de diseño que seguiremos en la construcción del dispositivo será fundamentalmente la economía de costo, pues se trata de fabricar un equipo de laboratorio escolar. Dentro de la limitación económica, procuraremos que tenga la mayor precisión y exactitud posible teniendo en mente que para determinar constantes de Verdet debemos medir el ángulo de giro θ , la magnitud de campo magnético y la longitud de la muestra.

Para comenzar el diseño es muy importante indicar que las constantes de Verdet tienen valores muy pequeños. Un ejemplo típico es la constante para el agua cuyo valor es de 1.309 centésimas de minuto angular sobre Gauss por centímetro a 20° C. Cabe aclarar que los valores de las constantes de Verdet para una gran diversidad de sustancias son de este mismo orden de magnitud [17]. Este hecho implica que el giro angular producido al aplicar el campo magnético resulta muy pequeño y puede resultar difícil de medir con precisión en un laboratorio escolar.

Con el propósito de tener una idea de la magnitud del ángulo de giro a medir, partimos del hecho de que las intensidades alcanzables ordinariamente en un laboratorio común de enseñanza para el campo magnético son del orden de las decenas de gauss y que las muestras no pueden ser muy grandes ya que deben ser colocadas dentro del dispositivo productor del campo donde la magnitud del mismo es intensa en una pequeña región del espacio. En estas condiciones podemos suponer que las muestras son del orden de unos cuantos centímetros, a lo más de una decena. En estas condiciones, de acuerdo con la Ec. (1), y para una constante V de centésimas de minuto angular sobre Gauss por centímetro y un campo de 500 gauss, el giro resulta del orden de un par de grados sexagesimales. El hecho de que los giros a medir son muy pequeños debe ser tomado en cuenta en el diseño pues este resultado implica que debemos de aumentar el resultado de multiplicar del valor del camino óptico por el valor del campo magnético. Para aumentar el primer valor, algunos laboratorios de investigación hacen que el haz de luz polarizada atraviese muchas veces la muestra pues el efecto Faraday, como ya lo explicamos, es aditivo. Esta situación implica el uso de un arreglo de espejos que hagan que la luz se refleje y atraviese muchas veces la muestra [11]. Además, este método requiere necesariamente de un haz de luz que presente poca divergencia, en otras palabras, es necesario el uso de un láser. Por lo anterior, consideramos que este método queda fuera del alcance económico de un laboratorio escolar. De modo que nos queda la alternativa de generar un campo magnético de la mayor intensidad posible y a la vez debemos procurar medir el ángulo de giro con la mayor precisión posible.

4.2. El campo magnético

Los laboratorios profesionales de investigación de materiales poseen aparatos capaces de generar campos magnéticos aplicados muy intensos. Esto lo logran empleando imanes superconductores o descargando bancos de condensadores a través de una bobina. Este último arreglo conlleva al uso de láseres pulsados como fuentes de luz. Sin embargo estos métodos también quedan fuera del alcance económico de un laboratorio escolar.

En el presente trabajo por razones de economía hemos escogido, para la producción del campo magnético, usar una bobina por cuyo devanado deberá circular una corriente eléctrica constante. Dicha corriente deberá ser intensa para poder alcanzar un valor para el campo magnético razonablemente alto. Como la bobina se va a calentar por efecto joule, debemos emplear un sistema disipador de calor para mantener fija la temperatura del dispositivo y evitar así desviaciones en la intensidad del campo magnético. Además un calentamiento excesivo en el devanado trae como consecuencia el deterioro del barniz aislante del alambre de la bobina. Para disipar el calor producido por la bobina utilizaremos un circuito de agua.

Tomando en cuenta lo anterior, a continuación describiremos brevemente el resultado nuestro del diseño. La bobina fue planteada para producir campos de alrededor de 500 gauss. Consiste de 1700 vueltas de alambre magneto de cobre No.19 en 18 capas y recubierta por resina epóxica. La longitud de la bobina es de 17 cm con un diámetro interior de 4 cm.

Las bobinas se encuentran enfriadas por agua contenida en una chaqueta de vidrio formada por dos tubos concéntricos de vidrio unidos entre si, en el extremo inferior, mediante una sección de vidrio anular en forma de U (ver Fig. 3). Por el extremo superior ambos tubos se encuentran unidos por un anillo de lucita con dos perforaciones para atravesar los conductores eléctricos que sirven para unir a las terminales de la bobina con su fuente de corriente. La chaqueta posee además dos conexiones para las mangueras de entrada (en la parte inferior) y de salida de agua (en la parte superior) como se muestra en la Fig. 3. El circuito enfriador se completa con un tanque de depósito y una bomba de agua eléctrica de corriente directa que sirve para recircular el agua. El circuito es una adaptación que utiliza el depósito de agua y bomba de limpia parabrisas de un Volkswagen sedan. Es importante mencionar que en general cualesquiera piezas de otras marcas automotrices pueden ser fácilmente adaptadas para este propósito. Con respecto a la fabricación de la chaqueta de agua debemos indicar que, si el laboratorio escolar no posee un buen taller de vidrio, los tubos de vidrio que forman la chaqueta pueden ser sustituidos por tubos de PVC. Estos tubos puede recortarse y pegarse con el adhesivo adecuado.

La fuente de alimentación de la bobina de campo magnético es convencional y consiste en un transformador rectificado por un par de diodos de potencia y filtrada por un condensador de alta capacitancia. Es importante conectar un

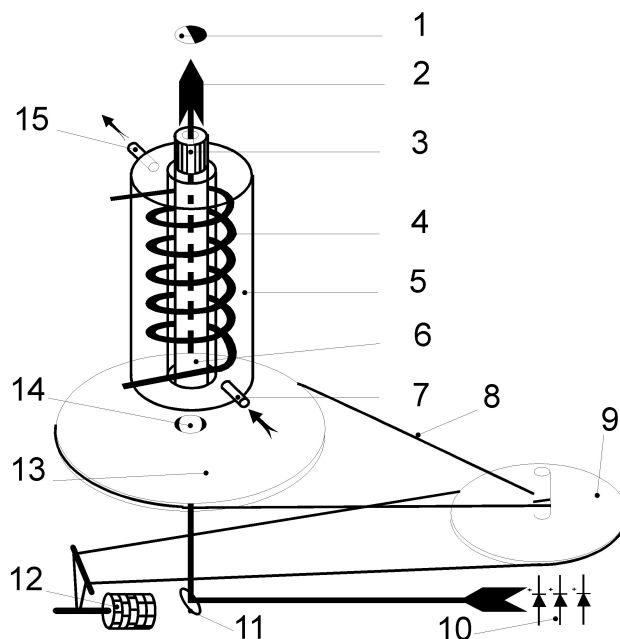


FIGURA 3 Esquema del instrumento: 1) polarizador de media sombra, 2) haz polarizado, 3) tapa del porta muestras, 4) bobina de campo, 5) chaqueta refrigerante, 6) tubo porta muestras, 7) entrada de agua refrigerante, 8) hilo de cáñamo, 9) polea menor, 10) diodos emisores de luz, 11) espejo de cara frontal, 12) cuenta vueltas con manivela, 13) polea principal con transportador, 14) polarizador, 15) salida de agua refrigerante.

amperímetro entre la salida de la fuente y la bobina de campo para poder vigilar continuamente que la corriente a través de la bobina se aleje de su valor nominal. La fuente de voltaje del motor de recirculación de agua debe controlarse con un potenciómetro para ajustar así el gasto a través del circuito.

4.3. Fuente de luz polarizada

La constante de Verdet, como lo indica la Ec. (4), depende de la longitud de onda de la luz, por lo que el aparato de medición requiere una fuente de luz monocromática y polarizada. En un trabajo anterior se ha utilizado un foco incandescente y un filtro de color [18]. En el presente trabajo emplearemos diodos emisores de luz (LEDs por sus siglas en inglés) pues la banda (fwhm) emitida por ellos es del orden de 100 nm. [19]. Hay que resaltar que la banda es más angosta que aquella de muchos filtros comunes [20]. Por otro lado, la desventaja de un LED sobre un foquito incandescente es que la intensidad lumínica del primero es inferior al del segundo y hay que recordar que la luz emitida debe atravesar a la muestra. Esta desventaja es fácilmente subsanada usando en lugar de un diodo, arreglos de diodos para aumentar la intensidad lumínica.

Dado que la luz emitida por un LED no es polarizada se emplearán filtros polarizadores lineales conocidos como láminas polaroid tanto para el polarizador como para el analizador.

La fuente de luz utilizada en el presente aparato, consiste de un conjunto de siete LEDs ya sean rojos (TIL 220), verdes

(TIL236) o amarillos (TIL234) montados a una base cilíndrica de resina epóxica, la cual puede ser fácilmente insertada en un soporte. De esta manera, intercambiando distintos arreglos de diodos, el observador puede cambiar la longitud de onda de la fuente de luz. Para abastecer de corriente a los LEDs, se requiere un voltaje de 5V regulados y una resistencia limitadora.

4.4. Sistema de medición

Hemos mencionado que el principio de operación del instrumento reside en ajustar dos veces el analizador de tal manera que éste excluya totalmente el paso de la luz proveniente de la fuente polarizada después de que el haz ha atravesado la muestra. La primera vez el ajuste se realiza sin aplicar el campo a la muestra y la segunda en presencia del campo magnético.

Para fijar la posición de exclusión total de luz en ambos casos, utilizaremos como detector al ojo humano. Sin embargo, cabe aclarar que si utilizamos un arreglo consistente de una sola lámina polaroid para el polarizador y otra para el analizador, el uso del ojo humano como detector del ángulo de extinción resulta inadecuado y por lo tanto, como veremos más adelante, debemos modificar el arreglo de polarizadores.

El porqué resulta inadecuado el uso del ojo como detector se debe a que la posición angular de completa extinción de la luz es difícil de localizar con precisión debido a la poca habilidad de nuestro órgano visual para detectar pequeños cambios en la intensidad de la luz. El ojo humano es capaz de percibir cambios de intensidad de la luz mayores que un 2%, independientemente de la luminosidad absoluta de los objetos que esté observando [21]. Por otro lado, los cambios de intensidad de la luz transmitida surgen en el curso de una medición al momento de irse efectuando el ajuste del ángulo de rotación del analizador cuando se busca su posición de óptima extinción. A continuación presentamos el cálculo del límite de precisión en la medición de la posición angular que la mencionada limitación visual implica.

La intensidad de luz transmitida por un polarizador obedece la ley de Malus, $I = I_0^2 \cos^2 \alpha$ donde I_0 es la intensidad de la luz incidente sobre el polarizador, I es la intensidad transmitida y α es el ángulo entre el plano del polarizador y el plano de polarización de la luz incidente. Ahora bien, la necesidad de ajustar el analizador del aparato a la condición de total extinción implica que el ojo tiene que detectar cambios de intensidad de la luz en los alrededores del ángulo $\alpha = 90^\circ$, es decir cuando los planos de polarización están cruzados. En la vecindad de dicho ángulo, la variación de la intensidad de la luz resulta ser muy pequeña ya que como consecuencia de la ley de Malus, el cambio de la intensidad con el ángulo ($dI/d\alpha$) varía como ($\sin \alpha \times \cos \alpha$). Esta función tiene valores cercanos a cero en la vecindad de 90° . Es decir, la intensidad casi no cambia en dicha vecindad. Es fácil calcular que para que cambie en más de un 2%, el ángulo α debe variar $\pm 8^\circ$ alrededor de 90° . En otras palabras el ojo no nota cambio alguno en la intensidad de la luz transmitida en un intervalo muy amplio por lo que el arreglo consistente

en el uso del ojo y una sola lámina polaroid para el analizador conduce a una pobre precisión en las mediciones del ángulo de rotación.

Sin embargo, existe una alternativa consistente en usar el ojo para detectar pequeños cambios en la razón entre las luminosidades de dos polarizadores adyacentes. Este método, como demostraremos, resulta ser de mayor precisión. Para este propósito debemos utilizar, en lugar de una sola lámina polaroid para el analizador, un arreglo conocido como polarizador de media sombra.

4.5. Polarizador de media sombra

El polarizador de media sombra consiste de dos filtros polaroid que ocupan sendas mitades del mismo. Estos polaroides están orientados entre sí de tal manera que sus respectivos planos de polarización forman un pequeño ángulo β . De esta forma, el campo de visión para un observador o para un detector que se encuentre frente al dispositivo queda dividido en mitades. Si sobre el dispositivo de media sombra incide luz polarizada linealmente, entonces, por cada mitad del campo de visión, emerge luz de distinta intensidad. De esta manera, de acuerdo con la ley de Malus, la intensidad transmitida por una mitad es $I_1 = I_0 \cos^2 \alpha$ y por la segunda mitad es $I_2 = I_0 \cos^2(\alpha - \beta)$. Siendo β , como acabamos de mencionar, el ángulo de separación entre polarizadores.

En el método del polarizador de media sombra, el observador procede a girar, ya sea el dispositivo analizador o el polarizador, hasta que ambas mitades del campo de visión presenten la misma intensidad, es decir, el giro alrededor de un eje paralelo al haz luminoso se ajusta hasta que $I_1 = I_2$. Sin embargo se debe tomar en cuenta que, como ya se mencionó, el ojo humano puede percibir razones de iluminación ($dI/d\alpha$) entre objetos adyacentes sólo si éstas son mayores que el 2%.

A fin de ilustrar el método con un ejemplo, presentamos la siguiente Fig. 4 donde se muestra la gráfica de

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = ((\cos^2 \alpha)/(\cos^2(\alpha - \beta)))$$

en función del ángulo α para un ángulo de separación arbitrario entre polarizadores de $\beta = 8^\circ$. La figura también muestra una línea horizontal correspondiente al valor $(I_1/I_2) = 1$ que representa la situación de igualdad de intensidades luminosas para ambos campos del polarizador de media sombra. La región donde se atraviesan la línea horizontal y la gráfica de (I_1/I_2) en función de α , se muestra a mayor escala en la Fig. 5. En ésta se observa que, una incertidumbre de $\Delta 2\%$ en el cociente (I_1/I_2) corresponde a un error en el posicionamiento del dispositivo de media sombra de 0.02° . Este pequeño error contrasta dramáticamente con el error estimado en el apartado 4.4 cuyo valor es de $\pm 8^\circ$ al utilizar un solo polarizador.

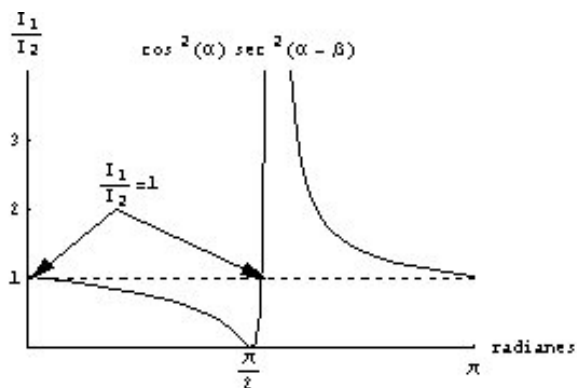


FIGURA 4 Gráfica de $\frac{I_1}{I_2}$ versus ángulo de incidencia del haz polarizado para un ángulo de separación entre polarizadores de 8° .

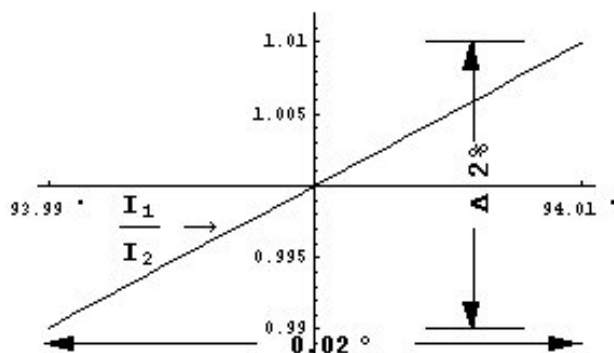


FIGURA 5 Detalle de la gráfica de $\frac{I_1}{I_2}$ versus ángulo de incidencia del haz de luz polarizada para un ángulo de separación entre polarizadores de 8° .

Al construir un polarizador de media sombra se debe considerar que va a existir un error en el ángulo de unión β al ensamblarse las mitades de los polarizadores. Este error de ensamblado podría afectar en principio el cálculo que hemos hecho de 0.02° ($\beta = 8^\circ$) para la incertidumbre en la determinación de la posición angular. Sin embargo lo interesante del caso es que un error de ensamblaje, por grande que sea, afecta minúsculamente la precisión del dispositivo de media sombra. Por ejemplo si se comete un error de $\pm 1^\circ$ para el ángulo $\beta = 8^\circ$, es fácil calcular que la precisión en el posicionamiento del dispositivo de media sombra se ve afectada de 0.02° a un valor de 0.0225° . La Fig. 6 muestra la gráfica de la incertidumbre en el posicionamiento del dispositivo de media sombra en función del ángulo de separación β entre los campos. En la gráfica se observa que inicialmente el error de posicionamiento crece muy lentamente en la medida que el ángulo β aumenta, llegando a un valor de apenas 1° para $\beta = 150^\circ$. La consecuencia de este hecho es que si se utiliza el dispositivo de media sombra, la incertidumbre del mismo ($\sim 0.02^\circ$ para β pequeñas) es un orden de magnitud menor que la incertidumbre con la que ordinariamente se puede medir la rotación del mecanismo de giro donde se halle montada la media sombra (0.5° a 0.1°). Por lo tanto, debemos de enfocar el diseño a crear un mecanismo preciso de rotación de los polarizadores.

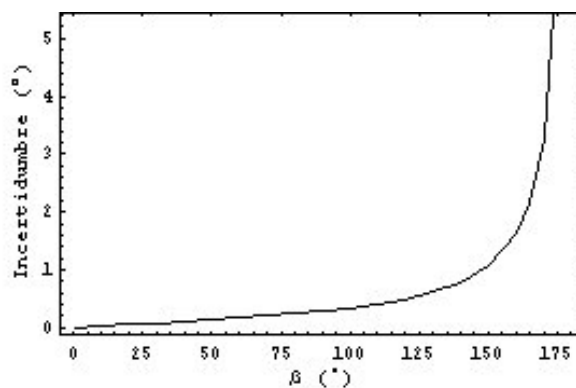


FIGURA 6 Incertidumbre en el posicionamiento del dispositivo de media sombra en función del ángulo de separación entre los campos.

4.6. Mecanismo de rotación

El mecanismo que se diseñó para soportar a los polarizadores primario y de media sombra, produce una rotación lenta y precisa de los mismos. Consiste de un arreglo de poleas y reductores. La Fig. 3 muestra dicho arreglo. En esta figura se observa que el polarizador está montado sobre la perforación central de un disco de acrílico que forma el cuerpo de una polea. El disco lleva adherida sobre su cara superior una escala de transportador de 360° . Con esta escala, es posible medir la posición angular inicial y final del polarizador y por lo tanto permite observar de manera aproximada el desplazamiento angular de la medición. La cara inferior de la polea va montada sobre un rodamiento de balines que permite la libre rotación sobre su eje. La polea además posee una ranura en su circunferencia en cuya garganta entra una banda fina de hilo inextensible de cáñamo que transmite el movimiento desde el eje de una segunda polea de menor diámetro. Esta última se encuentra también montada sobre un rodamiento para su libre rotación. Por la ranura de la circunferencia de la segunda polea también pasa una segunda banda de cáñamo que le transmite a su vez el movimiento del eje de un contador de vueltas, cuya manivela debe ser girada por el operador del instrumento (Fig. 3). De esta manera el operador puede girar lentamente y con precisión al polarizador a través del sistema reductor de poleas. La lectura fina del movimiento angular se mide directamente de los tambores numéricos del cuenta vueltas. El cuenta vueltas se adaptó de un odómetro automotriz. La calibración del sistema de movimiento angular se realiza contando el número de vueltas que debe girar la manivela del cuenta vueltas para que el polarizador gire un ángulo de 90° . Para el caso del instrumento actual, se requieren 1836 vueltas, lo que representa un avance angular de 0.049° por vuelta de manera que la precisión total que se alcanza con este mecanismo estaría dada por la suma de la incertidumbre del detector de media sombra (0.04°) más el correspondiente a la mínima división del cuenta vueltas (0.049°), es decir se tiene una precisión mejor que 0.1° .

4.7. Celda portamuestras

La celda para líquidos se adaptó de un tubo de ensaye con tapón de rosca de 10 X 150 mm. El tapón fue perforado y se le pegó una ventana de vidrio. El menisco inferior del tubo, situado en el extremo opuesto del tapón, fue cortado con disco de diamante y removido. En su lugar se pegó una segunda ventana de vidrio plano. Las ventanas se fabricaron con vidrios portaobjetos de microscopio cortados circularmente. Las muestras sólidas simplemente se conforman en cilindros de un máximo de 1 cm de diámetro con los extremos planos para evitar distorsiones.

4.8. Chasis de montaje

Una vez construidos todos los dispositivos, éstos se fijaron en una base de madera donde también se fijaron las componentes de las diferentes fuentes de poder y se dejó espacio para tener acceso al soporte de los LEDs, para poder cambiarlos. En la parte frontal se colocó la carátula de control con los siguientes medidores y controles: interruptor de encendido, lámpara piloto de encendido, amperímetro de corriente a la bobina, control de precisión de la corriente a la bobina, botón de activación de la bobina, control de flujo del agua de enfriamiento, interruptor del motor de enfriamiento y ventanas de observación de las escalas de medición angular. Las escalas están iluminadas por focos de 12V. La manivela que mueve la escala angular se encuentra en la parte lateral del instrumento y está formada por una barra de aluminio moleteado. Todo el conjunto del instrumento se cubrió con paneles de acrílico color humo cortados a la medida.

5. Calibración y resultados

El último paso que se debe realizar antes de efectuar las mediciones, es la calibración del campo magnético del instrumento. Recordemos que la intensidad de inducción magnética dentro de la bobina fue calculada para producir 500 gauss pero, debido a los efectos de borde, el campo magnético de la bobina no es uniforme y por lo tanto debemos de estimar un valor de campo promedio a una intensidad de corriente

eléctrica fija. Esto se logra empíricamente sometiendo a una muestra cuya constante de Verdet sea conocida, al campo de la bobina cuyo valor promedio queremos determinar. La muestra seleccionada para este caso es el disulfuro de carbono pues su constante de Verdet reportada en la literatura [17] resulta ser de las más grandes y en consecuencia va a presentar un ángulo de rotación mayor. La constante de Verdet para este material es de 4.255 minutos angulares por centímetro por gauss para una longitud de onda de 589 nm correspondiente a la banda D de sodio y con una temperatura de la muestra de 20.0° C.

A continuación se procede a medir el ángulo de rotación que presenta el disulfuro empleando en este caso como fuente de luz a los diodos amarillos (TIL-232-2) pues la longitud de onda a la que emiten, según el fabricante, es de 580 nm [19]. Debemos notar que la diferencia entre la longitud de onda a la que está reportada la constante de Verdet para el disulfuro patrón y la longitud de onda de los LEDs es de tan solo 9nm. Esta diferencia es equiparable considerando que la banda de transmisión típica de un monocromador es de 6 nm [20]. Con estos datos en mano y tomando en cuenta la propagación de errores, el campo magnético promedio, para el instrumento aquí presentado, resulta ser de 316 ± 10 gauss.

Posteriormente realizamos pruebas de comparación para distintas sustancias obteniendo sus constantes de Verdet con el instrumento aquí construido. Dichas constantes fueron comparadas contra las constantes reportadas en la literatura [17]. La Tabla I presenta los resultados de dicha comparación.

La columna de la extrema derecha de la Tabla I muestra la diferencia porcentual entre los valores obtenidos experimentalmente y los valores reportados en la literatura. Es de hacer notar que las diferencias se encuentran dentro del intervalo de precisión del instrumento que es, según calculamos de 10 %.

Se puede investigar la dependencia del ángulo de rotación con la longitud de onda de la luz cambiando el conjunto de LEDs. La Tabla II muestra la dependencia de las lecturas del ángulo de rotación con la longitud de onda empleada. La muestra observada fue disulfuro de carbono a una temperatura de 20° C y a un campo promedio de 316 gauss.

TABLA I. Las constantes de Verdet están dadas en centésimas de minuto angular por gauss por centímetro.

Compuesto	Temp. °C	Lectura ($\pm 0.1^\circ$)	Verdet Exp.	Verdet literatura	Diferencia en por ciento
Anilina	15	3.5	3.8 (6 %)	4.180	7 %
Benceno	15	2.5	2.7 (10 %)	3.000	7 %
Nitrobenceno	15	2.2	2.4 (11 %)	2.170	13 %
Tolueno	15	1.8	2.0 (12 %)	2.170	8 %
Cloroformo	20	1.5	1.6 (13 %)	1.600	4 %
Tetracloruro de carbono	25	1.5	1.6 (13 %)	1.600	4 %
Agua	20	1.2	1.3 (15 %)	1.309	2 %
Acetato de Etilo	20	1.0	1.1 (16 %)	1.080	3 %

TABLA II. θ versus λ para disulfuro de carbono

Color	L. de onda	Lectura (grados)
Rojo	650 nm	2.9
Amarillo	580 nm	3.9
Verde	560 nm	4.3

Para investigar la dependencia del ángulo de rotación con la temperatura de la muestra, ésta se sumerge en un baño de agua fría y posteriormente se coloca dentro del aparato. Si el sistema de enfriamiento no es operado, entonces la muestra paulatinamente se irá calentando. La temperatura de la muestra puede ser tomada con la ayuda de un termopar. La tabla III muestra la dependencia de las lecturas del ángulo de rotación con la temperatura de la muestra. De nuevo, la muestra observada fue disulfuro de carbono a una longitud de onda de 580 nm y a un campo promedio de 316 gauss.

TABLA III. θ versus temperatura para disulfuro de carbono

Temp °C	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
Lectura (°)	4.2	4.0	3.9	3.9	3.8	3.6	3.5	3.4

6. Comparación con trabajos anteriores

Existen un par de instrumentos para laboratorio escolar, reportados en la literatura, que miden el efecto Faraday. El primero fue construido por Loeffler [18] y su fuente de luz polarizada consiste de una lámpara de filamento incandescente colimada con una lente biconvexa y una pantalla con una pequeña apertura. El haz se hace pasar por un filtro de color y después por un filtro polaroid. El campo magnético se aplica con un solenoide convencional. La luz transmitida por el arreglo polarizador- muestra- analizador es detectada por un fotodiodo. La posición angular del analizador se determina con la ayuda de un transportador. El punto de extinción del analizador se localiza midiendo la luz transmitida por el analizador cuando éste se halla en un par de distintas posiciones angulares correspondientes a dos ángulos en los que la intensidad transmitida es la misma. Estos dos ángulos se hallan situados simétricamente a ambos lados de la curva de Malus ($\cos^2 \theta$). El proceso se repite para cinco pares de ángulos y la media es calculada para cada par, finalmente el promedio

de los cinco valores es considerado como el ángulo de extinción. Para este método el autor reporta un error del 10 % en la determinación del ángulo. Por otro lado el campo magnético promedio para dicho instrumento fue determinado a partir de la constante de Verdet para el agua usando el mismo procedimiento seguido en nuestro trabajo. En su reporte, Loeffler [18] no cita ningún valor o estimación para el error en su determinación del campo magnético promedio, pero dado que la relación entre el campo aplicado y el ángulo de rotación es lineal, entonces el error en el valor del campo corresponde también a un 10 %. Consecuentemente el error global porcentual para este equipo es la suma de el error en el ángulo mas el error el campo, es decir , 20 %. Este valor representa el doble que el de nuestro trabajo.

El reporte más reciente sobre un instrumento para la determinación de constantes de Verdet es el de Pedrotti y Bandettini [22]. Estos autores emplean equipo más costoso como lo son dos láser de distinta frecuencia, un electro magneto comercial y un polarizador analizador con una precisión de 0.1°. Para determinar el ángulo de rotación utilizan el método del ángulo de extinción. Sólo reportan mediciones para dos vidrios tipo Flint de alta birrefringencia y para disulfuro de carbono. La exactitud que estos autores estiman para sus mediciones es de alrededor de 3 % mientras que nuestro equipo alcanza sólo un 10 %. Sin embargo queremos hacer notar que nuestro equipo también tiene la ventaja de poder variar la temperatura de la muestra.

7. Conclusión

Finalmente hacemos una sugerencia para la mejoría del prototipo aquí presentado. Creemos que debe ser posible instrumentar la técnica de media sombra utilizando un apuntador láser y dos fotodetectores. La posible pequeña diferencia de respuesta entre los dos fotodetectores sólo equivaldría a un ligero incremento o decremento en el valor efectivo del ángulo beta entre los campos del polarizador de media sombra y no afectaría la sensibilidad del método. Por otro lado, con el uso del apuntador láser también debe ser posible aumentar, mediante el uso de espejos, el camino óptico que el haz recorre a través de la muestra. Esto es debido a la mejor colimación que posee el haz del diodo láser en comparación con la de un LED común y corriente. Sugerimos consultar el trabajo de Briggs y Peterson [11].

1. F. A. Jenkins and H.E. White, *Fundamentals of Optics*, third edition (McGraw Hill, 1957).
2. E. Hecht and A. Zajac, *Optics*, (Addison Wesley,1974)
3. J. R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics*, fourth edition (Prentice Hall, 1995)
4. S.A. Stepanov, *Sov. J. Opt. Technol.* **41** (1974) 179.
5. G. L. Verschuur, *Hidden Attraction, The Mystery and History of*

- Magnetism*, (Oxford University Press Paperback, 1996) Chap. 12 Magnetic Fields in Space.
6. B. K. Tanner, *Am. J. Phys.* **48** (1980) 59.
7. F. Cajori, *A History of Physics*, (Dover, 1962)
8. Newton postuló la teoría corpuscular de la luz, la autoridad de su opinión hizo difícil la aceptación de la teoría ondulatoria de la luz propuesta por Huygens (ver por ejemplo, F. Cajori, op.cit. Chap. "The eighteen century", sec. "Wave theory abandoned"

- p109). Los experimentos de Young reviven la teoría ondulatoria pero el peso de la opinión de Newton persiste. Fresnel redescubre el principio de interferencia 13 años después que Young y sienta las bases matemáticas de un modelo ondulatorio de la luz. La naturaleza ondulatoria finalmente es aceptada (F. Cajori, *ibidem.* Chap. “*The nineteenth century*”, sec. “*Wave theory*” p148).
9. Desde los comienzos de su carrera científica Faraday suponía que debía haber una conexión entre la luz, la electricidad y el magnetismo. Tras de sus primeros descubrimientos sobre fenómenos electromagnéticos, Faraday dedica sus esfuerzos al estudio de la electrolisis y celdas voltaicas. En septiembre de 1845, Faraday reanuda su antigua búsqueda de evidencia sobre una posible conexión entre la luz, la electricidad y el magnetismo a raíz de una pregunta expresa de Thomson (Lord Kelvin) en una carta dirigida a él fechada el 6 de agosto de 1845. (L. P. Williams *The Selected Correspondence of Michael Faraday* Cambridge U.P.,1971). El 13 de septiembre de 1845 Faraday escribe en su diario, “*Es cuando el rayo polarizado viaja paralelo a las líneas de inducción magnética que el vidrio manifiesta su poder de afectar al rayo. Es la primera relación real entre el magnetismo y la luz, y el poder conferir fuerzas giratorias en la materia puede quizás servir así como un medio para medir la condición interna de los cuerpos en investigaciones filosóficas*” . (M. Faraday, *Faraday's Diary, Being the Variuos Philosophical Notes of Experimental Investigation*, Vol. 4 edited by T. Martin (Bell, London 1936) nota del diario número 7504.
10. H. Hertz, “Sobre las Relaciones entre la Luz y la electricidad” en Antología de Física (*Lecturas Universitarias* No.9 UNAM 1971) compilador A. Noyola.
 11. E.M. Briggs and R.W. Peterson, *Am. J. Phys* **61** (1993) 186.
 12. M.H. Becquerel, *Comp Rend* **125** (1897) 679.
 13. C. G. Darwin and W.H. Watson, *Proc. Roy. Soc* **114A** (1927) 474.
 14. L. Rosenfeld, *Zeits fur Physik* **57** (1930) 835.
 15. R. Serber, *Phys Rev* **41** (1932) 489.
 16. J.H. Van Vleck and M.H. Hebb, *Phys Rev* **46** (1934) 17.
 17. R. C. West ed., *Hanbook of Chemistry and Physics 49 ed* (The Chemical Rubber Co. Ohio 1968) p C-707.
 18. F. J. Loeffler, *Am J Phys* **51** (1983) 661.
 19. ECG, *Semiconductors Master Guide*, (Phillips ECG Inc. 1986).
 20. D.A. Skoog and D. M. West, *Análisis Instrumental* (Ed. Interamericana, México 1982)
 21. V. Surdin, *Quantum* **10** (2000) 16.
 22. F. L. Pedrotti and P. Bandettini, *Am J Phys* **58** (1990) 542.