

PRÁCTICA N° 3: EFECTO FARADAY

Objetivos:

- Medida del campo magnético en el entrehierro de un circuito magnético.
- Observación del efecto Faraday en vidrio.

Bibliografía:

- J. Casas "Óptica". Capt 19.1 (electroóptica) apartado 6
- Tablas de datos: Handbook of Physics and Chemistry

1) Breve introducción teórica.

El efecto Faraday consiste en la rotación del plano de polarización que se produce cuando la luz polarizada linealmente se propaga en un medio material y hay aplicado un campo magnético estático paralelo a la dirección de propagación.

Para comprender la Física del caso que se presenta consideremos primero un medio transparente compuesto por moléculas quirales todas ellas de la misma quiralidad (dextro o levógira) aunque en posición desordenada y orientadas al azar. Un objeto quiral es aquél que no tiene ni siquiera un plano de simetría y por tanto no puede hacerse coincidir con su imagen especular mediante traslación o rotación propias, como ocurre con la mano derecha o la izquierda ("quiros" = "mano" en griego). Otro ejemplo es un muelle roscado a derechas. Un muelle del mismo paso pero roscado a izquierdas es su imagen especular y no se les puede hacer coincidir a ambos mediante traslación o rotación propias. En principio todo objeto de forma irregular es quiral, pero las moléculas son objetos sencillos, muy simétricos y raramente quirales. En el caso de moléculas orgánicas complicadas, cuando lo son, las dos quiralidades son energéticamente equivalentes y se suelen presentar con la misma frecuencia en un material compuesto por muchas de ellas. Es muy infrecuente el caso de un material formado por moléculas de una sola quiralidad, pero tales medios existen.

Un material formado por moléculas quirales, de la misma quiralidad pero desordenadas en posición y orientación (un vidrio) es isótropo pero tiene la propiedad de que la luz circularmente polarizada dextrógira se propaga con diferente velocidad que la levógira, fenómeno que se conoce como **actividad óptica**. Cuando se incide con una onda linealmente polarizada, cabe considerarla como superposición de dos ondas circulares de la misma amplitud una levógira y otra dextrógira. El desfase entre las dos da el plano de polarización de la onda plana resultante. Elegimos como eje z la dirección de propagación y entonces la dirección de polarización está en el plano xy . El ángulo que forma la dirección de polarización con el eje x es la mitad del desfase entre las dos componentes circulares, como puede verse fácilmente representando la superposición de dos movimientos circulares del mismo radio y velocidad angular recorridos en sentido inverso. El desfase es la distancia angular entre las posiciones en $t = 0$.

Si una onda plana linealmente polarizada incide en un medio ópticamente activo, tomemos como eje x la dirección de polarización inicial. A la entrada el desfase entre las dos componentes circulares es entonces cero. Una vez dentro del medio las dos se propagan con distinta velocidad. Las dos funciones de onda son

$E_0 \mathbf{u}_+ \exp[i(k_+ z - \omega t)]$ y $E_0 \mathbf{u}_- \exp[i(k_- z - \omega t)]$ donde los vectores que definen la

polarización circular, en notación compleja, son $\mathbf{u}_+ = \mathbf{u}_x + i \mathbf{u}_y$ y $\mathbf{u}_- = \mathbf{u}_x - i \mathbf{u}_y$. Después

de recorrer una distancia L en el medio el desfase es $\Delta = (k_+ - k_-)L = \frac{\omega}{c}(n_+ - n_-)L$,

siendo n_+ y n_- los índices de refracción para las dos polarizaciones circulares + y -. La luz saliente será otra vez linealmente polarizada, puesto que es la superposición de dos circulares opuestas de la misma amplitud, pero la dirección de polarización formará un ángulo $\phi = \Delta/2$ con el eje x . Por tanto el efecto final es que el plano de polarización ha girado un ángulo $\Delta/2$ que es proporcional al camino recorrido L , es decir, la dirección de polarización va girando conforme la luz se propaga.

Para entender física e intuitivamente cómo puede ser que la velocidad de propagación de las dos polarizaciones sea diferente, imaginemos un medio cuyas moléculas son pequeños alambres, de tamaño mucho menor que la longitud de onda, y en forma de muelle roscado a derechas. Supongamos que el eje del muelle es paralelo a la dirección de propagación de la luz. Si la quiralidad de la onda es la misma que la del alambre los trozos del mismo que son casi paralelos al campo eléctrico son ligeramente más largos que si la quiralidad fuera la inversa (Si la longitud de onda coincidiera con el paso de rosca del alambre todo él se haría simultáneamente paralelo al campo eléctrico en el mismo instante, pero no es el caso porque la longitud de onda es mucho mayor). La corriente producida en el alambre por el campo eléctrico de una onda circularmente polarizada con la misma quiralidad que el muelle (levógira) polariza eléctricamente el alambre con más facilidad que la dextrógira, por lo tanto la constante dieléctrica y el índice de refracción efectivos son mayores para la levógira. Si el eje del muelle no coincide con la dirección de propagación de la onda el efecto será menor, pero siempre en el mismo sentido cualquiera que sea su posición, por lo tanto un medio así presentará actividad óptica. La actividad la presentan medios materiales sólidos o líquidos formados por moléculas quirales (como el azúcar) y cristales formados por iones o moléculas no quirales individualmente pero con una disposición cristalina quiral, como por ejemplo el cuarzo. En este caso la actividad óptica desaparece en el estado líquido.

El **efecto Faraday** consiste en que la aplicación de un campo magnético introduce quiralidad en un medio que en principio no lo era. Para entenderlo pensemos en una superficie troncocónica conductora, como la superficie lateral de un cubo de agua, que no es quiral. La aplicación de un campo magnético paralelo a su eje induce corriente sólo en un sentido, no en el contrario, y el tronco de cono recorrido por una corriente circular es quiral pues su imagen especular es un tronco de cono igual pero con la corriente en sentido contrario.

La mejor forma de observar el efecto Faraday es incidir con luz polarizada plana sobre un cilindro de material transparente, en la dirección de su eje, en la que además se aplica un campo magnético. Lo que se observa a la salida es que el plano de polarización de la luz ha girado un ángulo proporcional al campo aplicado y a la longitud del cilindro:

$$\phi = V(\lambda)LB \quad (1)$$

donde $V(\lambda)$ es la llamada *constante de Verdet*, que depende del material y de la longitud de onda de la luz empleada.

La constante de Verdet expresada en función de la longitud de onda de la luz en el vacío, y para el vidrio flint que emplearemos en esta práctica viene dada aproximadamente por la expresión semiempírica:

$$V(\lambda) = (n^2 - 1) \left(A + \frac{B}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \right) \quad (2)$$

con $\lambda_0 = 156.4 \text{ nm}$. Esta expresión puede obtenerse a partir del modelo clásico de Lorentz de la dispersión cromática de la luz, añadiendo la fuerza que produce el campo magnético externo sobre los electrones.

λ_0 corresponde al ultravioleta, por tanto el efecto Faraday será más acusado cuanto menor sea la longitud de onda de la luz visible, es decir mayor en el azul que en el verde y en éste mayor que en el rojo.



2) Aplicación práctica

Ver figura. Sobre un banco óptico hay montados y alineados, sucesivamente una lámpara halógena con lente condensadora a la salida que produce una onda luminosa aproximadamente plana. A continuación se coloca un monocromador que deja pasar un estrecho rango de longitudes de onda, cuyo valor medio está indicado en una rueda giratoria que lleva el monocromador. Al girar la rueda cambias la orientación de la red de difracción del monocromador y se selecciona una nueva longitud de onda que emerge del sistema. Después un polarizador lineal, que produce luz linealmente polarizada. La dirección de polarización se puede escoger, cambiando la orientación del polarizador. A continuación hay un electroimán con las piezas polares taladradas para que la luz pueda pasar y también aptas para colocar entre ellas una barra cilíndrica de vidrio transparente, que es donde observaremos el efecto Faraday. Después del vidrio hay un segundo polarizador ("analyzer") y una lente de focal 15 cm, que focaliza la luz sobre una pantalla blanca situada detrás. También (o quizá mejor) puede observarse la luz saliente directamente con la vista en lugar de colocar la pantalla.

La lámpara y el electroimán van alimentados con una fuente de voltaje que produce 12 V AC para la lámpara y regulable de 0 a 20 V DC para el electroimán. En el circuito de este último se intercala un amperímetro para medir la corriente con que se alimenta y un conmutador que sirve para invertir cómodamente el sentido de la corriente en el electroimán sin cambiar su magnitud. Además se dispone de un teslámetro, o aparato para medir campo magnético basado en el voltaje Hall que se produce en una sonda dispuesta para ello. La sonda Hall es una sonda axial, montada sobre una varilla, que mide la componente del campo magnético paralela a la varilla y en el extremo de la misma.

El proceso experimental tiene dos partes:

a) **Medida del campo magnético en el entrehierro del electroimán en función de la posición y de la corriente de alimentación de las espiras.** Ya que cuando está montada la varilla de vidrio es imposible medir el campo se mide previamente sin varilla y como el vidrio es diamagnético se puede suponer que el campo es el mismo con y sin varilla. Si el núcleo del electroimán (hierro dulce) fuera un medio lineal magnéticamente la corriente la relación corriente/campo sería proporcional, pero eso no ocurriría exactamente. Además el campo no es uniforme, de modo que será distinto en distintas posiciones. **Se trata de establecer la relación corriente/campo para saber cuál es el campo sin más que medir la intensidad e corriente.**

b) Medida **del efecto Faraday en la barra de vidrio en función de la corriente de alimentación**, para distintas longitudes de onda de la luz incidente.

3) Medida del campo magnético.

Para esta parte no se utiliza la lámpara. Conviene desenchufarla para no gastarla inútilmente.

a) Encender el teslámetro. Cuando se mide en una zona algo apartada del electroimán debe indicar aproximadamente cero (el campo terrestre es del orden de 0.1 mT). Si no lo hace se puede regular mediante el mando de la derecha. El conmutador de la izquierda es para cambiar de escala, mientras que el del centro para hacer medidas de campo estático o bien AC. En este caso hay que seleccionar estático.

b) Quitar el analizador, la lente y la pantalla, que están detrás del electroimán. Usando el pie de la lente o del analizador con una abrazadera colocar la sonda Hall horizontalmente a una altura regulada para que pase limpiamente por el hueco de las piezas polares del electroimán. Apretar la abrazadera sujetando la sonda con fuerza suficiente para que no se mueva.

c) En la fuente, regular el voltaje hasta que el amperímetro indique 0.5 A aproximadamente.

d) Con corriente fija, tomar datos del campo que indica la sonda deslizándola a lo largo del hueco de las piezas polares y anotando en una tabla los valores del campo y la posición, indicada en el pie de la abrazadera sobre el banco óptico. Medir cada 5 mm cubriendo una distancia de unos 5 cm, en la zona del entrehierro. Anotar qué indicación del banco corresponde a la posición en que la punta de la sonda está en el centro del entrehierro. Posteriormente convendrá restar ese valor de todas las lecturas para que la posición x sea relativa al centro del entrehierro.

e) Repetir c) y d) con valores crecientes de la corriente, cada 0.5 A, hasta con 4 A.

ATENCIÓN: por encima de 2 A sólo se puede operar por periodos breves de tiempo. **Si se deja la fuente conectada permanentemente se corre peligro de fundir la laca que cubre el bobinado, destruyendo el electroimán.** Por tanto conviene hacer las mediciones con cierta rapidez. Se supone que se ha alcanzado cierta práctica en las medidas con corrientes bajas. Por el mismo motivo vigilar la temperatura del bobinado de cuando en cuando, tocándolo con la mano. Es normal que se caliente un poco pero si se calienta mucho hay que bajar la intensidad y esperar que se enfríe.

A partir de aquí puede hacerse en casa, después de realizar todo el experimento, incluida la rotación Faraday. En todo caso conviene tomar primero los datos de la parte siguiente y si queda tiempo libre comenzar a realizar los cálculos.

f) Las piezas polares del electroimán tienen forma troncocónica para concentrar las líneas de flujo magnético en el entrehierro, pero entonces el campo no es uniforme. Para cada intensidad de corriente, determinar el campo medio en los 3 cm centrales, que son los que ocupará la barra de vidrio. Para ello hay que integrar B como función de x :

$$\langle B \rangle = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} B(x) dx \quad (3)$$

que puede hacerse simplemente mediante la regla del trapecio sumando los (habitualmente 5) valores de B medidos dentro del intervalo de los 3 cm, más la mitad de los extremos y dividiendo para el número de intervalos (normalmente 6). En caso de duda ver el apéndice al final sobre la regla del trapecio.

Hacer una aproximación del campo medio mediante la teoría de los circuitos magnéticos, haciendo una estimación de la reluctancia del entrehierro y sabiendo que el bobinado consta de 600 espiras. Comparar los valores, que tienen que salir parecidos.

Se recuerda que en la teoría del circuito magnético es

$$NI = \Phi R = \langle B \rangle \Delta x / \mu_0 \quad (4)$$

donde N es el número de espiras, I la intensidad de corriente, Φ el flujo magnético, R la reluctancia y Δx la longitud promedio efectiva de las líneas de flujo en el entrehierro. Un cálculo exacto de la reluctancia para esta geometría es imposible pero dando a Δx un valor razonable se puede obtener un resultado estimativo que nos sirve para ver si no hay errores groseros.

g) Representar el campo medio $\langle B \rangle$ en función de la intensidad de corriente. Según la teoría elemental del circuito magnético deberían ser proporcionales, pero no será exactamente así pues cuando las piezas polares se aproximan a la saturación las líneas de flujo salen gradualmente del hierro, aumentando la reluctancia. Finalmente, si se alcanzase la saturación el campo producido por el hierro sería independiente de la corriente y los posteriores aumentos se deberían sólo a la corriente de la bobina, según la ley de Biot-Savart, que crece mucho más despacio. Ajustar los datos a un polinomio de grado 4 como máximo, sin término independiente para que pase forzosamente por $B = 0$ para $I = 0$. Esta función nos sirve para determinar a partir de ahora el campo medio $\langle B \rangle$ midiendo sólo la intensidad de corriente.

4) Medidas de efecto Faraday.

a) Poner a cero la corriente en el electroimán. Enchufar la lámpara. Quitar la sonda Hall y colocar la barrita de vidrio en el entrehierro. Las piezas polares pueden girarse para permitir colocar la barrita en su sitio.

b) Colocar el analizador y la lente colectora. Seleccionar una longitud de onda en el monocromador y anotarla. Se medirá la rotación para las siguientes longitudes de onda: 450, 500, 550, 625 y 700nm.

Alinear la lámpara y las lentes de modo que mirando desde el frente se vea la luz que pasa a través de la barrita, que está en el entrehierro, pero no se vea luz pasando por los lados. En principio no es necesario, pero caso de serlo, esta luz parásita se puede

eliminar colocando un trozo de cartulina negra recortada adecuadamente rodeando el electroimán.

c) Colocar el polarizador en la posición de -45° , para que la luz transmitida esté polarizada linealmente formando 45° con la vertical. Mover el analizador y se observará intensidad luminosa máxima cerca de la posición -45° y mínima, casi nula, cerca de $+45^\circ$, cuando el plano de polarización del analizador es perpendicular al del polarizador. Si no es exactamente $+45^\circ$ es porque el plano del polarizador o analizador están algo desorientados con respecto a la indicación del nonius angular. Esta prueba también se puede hacer sin barrita.

d) Hacer pasar una corriente de 0.5 A en el electroimán. Observar el efecto Faraday, pues la intensidad luminosa que era casi nula ahora ha crecido significativamente. Buscar la nueva posición del analizador que corresponde a mínima intensidad y anotar el valor. Para observar el mínimo con precisión mover el analizador a uno y otro lado hasta quedarse con una posición ideal de mínima intensidad. Normalmente se observará luz de otro color que el original ya que el filtro no es perfecto (deja pasar una pequeña intensidad de otras longitudes de onda además de la nominal) y el efecto Faraday depende de la longitud de onda. Moviendo ligeramente el analizador de su posición de mínimo hacer una estimación del margen de error en la medida del ángulo de giro. Basta hacerlo una vez con cada longitud de onda pero ser realistas: es tan anticientífico dar un error demasiado pequeño como darlo exagerado.

e) Cambiar el sentido de la corriente en las bobinas, cuyo efecto es invertir la dirección del campo resultando un efecto Faraday opuesto al anterior. Inmediatamente se observará un aumento de la luz transmitida. Buscar la nueva posición de mínima intensidad y anotarla. La finalidad de invertir el campo es corregir el error de cero en la alineación de los polarizadores y duplicar el valor de la magnitud observada, que es el ángulo de giro del plano de polarización de la luz.

f) Repetir con intensidades crecientes hasta 4 A, cada 0.5 A aproximadamente. Controlar el calentamiento de las bobinas. Si es excesivo bajar la corriente a cero durante unos instantes para que se enfríen.

g) Cambiar la longitud de onda en el monocromador y repetir desde el apartado c). Procurar que todas las personas del grupo hagan medidas.

5) Análisis de los datos

a) Representar el ángulo de giro del plano de polarización de la luz en función del campo magnético promedio para cada longitud de onda, todas ellas en una sola gráfica. Para determinar el campo medio a partir de la intensidad medida, utilizar la expresión obtenida en el apartado g) de la sección 3). Más simple, pero también más inexacto es interpolar linealmente en la tabla de datos de $\langle B \rangle$ frente a I que se midió en el apartado f) de la misma sección 3). Representar las barras de error como trazos verticales centrados en cada punto.

b) Ajustar los datos a una recta que pase forzosamente por el origen. Comprobar si experimentalmente se cumple la ley (1) de proporcionalidad con el campo magnético. "Experimentalmente" quiere decir que la recta pasa por todas las barras de error.

Deducir la constante de Verdet $V(\lambda)$ y su margen de error, para cada longitud de onda

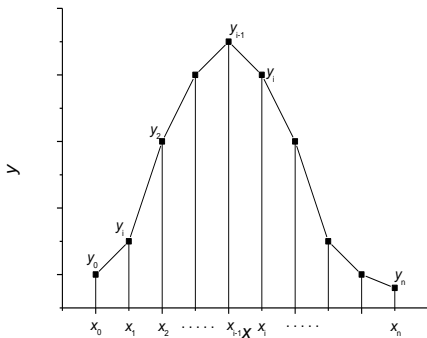
c) Representar la constante $V(\lambda)$ y sus barras de error como función de λ . Decir si la expresión (2) se ajusta a los resultados haciendo una elección apropiada de las constantes A y B.

d) Los vidrios tipo SF (flint densos, porque tienen mucho plomo), de alto índice de refracción, se componen fundamentalmente de SiO_2 , y PbO y muy pequeña cantidad

de otros óxidos. La constante de Verdet para la sílice pura es $V=325 \text{ }^\circ/(\text{T}\cdot\text{m})$ para $\lambda = 546 \text{ nm}$ y $V=277 \text{ }^\circ/(\text{T}\cdot\text{m})$ para $\lambda = 589 \text{ nm}$. El Handbook of Physics and Chemistry no trae datos de V para un vidrio formado casi exclusivamente por PbO ni para los vidrios SF, pero sí para otros vidrios parecidos dados en la tabla siguiente (especialmente el DF y el EDF). Con esos datos (y convirtiendo correctamente las unidades) obtener cuál puede ser la composición aproximada en peso del vidrio SF6 en SiO_2 y PbO , suponiendo que no contiene otros componentes. Hacer hipótesis simplificadoras razonables.

Apéndice: Regla del trapecio para hacer integrales numéricas.

Ver figura siguiente:



Supongamos una función $y = f(x)$ que tenemos evaluada en los puntos $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, es decir para los valores $\{x_i\}$, $0 \leq i \leq n$, (hay n intervalos y $n+1$ puntos) donde los valores correspondientes de la función son $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$,

La integral $\int_{x_0}^{x_n} y dx$ es geoméricamente el área bajo la

curva que representa y como función de x .

Representemos gráficamente los puntos donde hemos evaluado la función (x_i, y_i) . Podemos unirlos con trazos rectos y si los puntos $\{x_i\}$ están suficientemente

próximos unos a otros, el área bajo los trazos rectos, será aproximadamente la integral. La aproximación consiste en que hemos sustituido la verdadera función por los trazos. El área bajo los trazos rectos resulta ser la suma de un conjunto de n trapecios. El área de uno cualquiera de ellos, por ejemplo el i -ésimo, es

$$\Delta A_i = (x_i - x_{i-1})(y_{i-1} + y_i)/2,$$

usando la bien conocida fórmula del área del trapecio.

El área total será la suma de las de todos los trapecios, es decir:

$$A = \sum_{i=1}^n \Delta A_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1})(y_{i-1} + y_i)$$

Si se han tomado los puntos $\{x_i\}$ igualmente espaciados, es decir $x_i - x_{i-1} = \Delta x = \text{cte}$, el factor $(x_i - x_{i-1}) = \Delta x$ sale fuera de la suma, y la suma que queda es de los valores de y , que aparecen dos veces cada uno excepto los extremos y_0 e y_n , que aparecen sólo una

vez. por tanto:
$$A = \frac{1}{2} \Delta x \sum_{i=1}^n (y_{i-1} + y_i) = \Delta x \left[\frac{1}{2} (y_0 + y_n) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i) \right]$$

El intervalo total que cubren los puntos considerados es $L = n\Delta x$, por lo tanto el promedio es:

$$\langle y \rangle \equiv \frac{A}{L} = \frac{1}{n} \left[\frac{1}{2} (y_0 + y_n) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i) \right]$$

y no como en un análisis demasiado superficial superficial podría pensarse: $\frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n (y_i)$

ELASTO-OPTIC, ELECTRO-OPTIC, AND MAGNETO-OPTIC CONSTANTS (continued)

MAGNETO-OPTIC CONSTANTS (continued)

Verdet Constants of Commercial Glasses¹

This table gives the density, ρ , refractive index at 589 nm, n_D , and Verdet constant, V , for the wavelengths indicated; the data refer to room temperature

Glass type	ρ g/cm ³	n_D	V in min/Oe cm				
			$\lambda = 365.0$ nm	$\lambda = 404.7$ nm	$\lambda = 435.8$ nm	$\lambda = 546.1$ nm	$\lambda = 578.0$ nm
BSC	2.49	1.5096	0.0499	0.0392	0.0333	0.02034	0.01798
HC	2.53	1.5189	0.0561	0.0440	0.0372	0.0225	0.01995
LBC	2.87	1.5406	0.0609	0.0477	0.0403	0.0245	0.0216
LF	3.23	1.5785	0.1143	0.0850	0.0693	0.0394	0.0344
BLF	3.48	1.6047	0.1112	0.0832	0.0685	0.0393	0.0344
DBC	3.56	1.6122	0.0662	0.0517	0.0435	0.0261	0.0231
DF	3.63	1.6203	0.1473	0.1076	0.0872	0.0485	0.0423
EDF	3.9	1.6533	0.1725	0.1248	0.1007	0.0556	0.0483

The composition of the glasses in weight percent is:

Glass type	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	As ₂ O ₃	Na ₂ O	BaO	ZnO	PbO
BSC	69.6	6.7	20.5	2.9	0.3	0.1	—	—	—	—
HC	72.0	—	10.1	11.4	0.3	0.2	6.1	—	—	—
LBC	57.1	1.8	13.7	0.3	0.2	0.1	—	26.9	—	—
LF	52.5	—	9.5	0.3	0.2	0.1	—	—	—	37.6
BLF	45.2	—	7.8	—	—	0.4	—	16.0	8.3	22.2
DBC	36.2	7.7	0.2	0.2	3.5	0.7	—	44.6	6.7	—
DF	46.3	—	1.1	0.3	0.2	0.1	5.0	—	—	47.0
EDF	40.6	—	7.5	0.2	0.2	0.2	0.1	—	—	51.5

REFERENCES

1. Weber, M. J., *CRC Handbook of Laser Science and Technology*, Vol. IV, Part 2, CRC Press, Boca Raton, FL, 1988, p. 299-310.
2. Gray, D. E., Ed., *American Institute of Physics Handbook*, Third Edition, McGraw Hill, New York, 1972, p. 6-230.