

Medida De La Constante De Verdet En El Efecto Faraday Con Un Equipo De Bajo Costo.

N. Santisteban¹, N. De La Rosa², R. G. Arenas y F. Fajardo³

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá-Colombia

¹npsantistebanv@unal.edu.co, ²nadelarosar@unal.edu.co, ³fefajardot@unal.edu.co

RESUMEN

Se determina la rotación que sufre el plano de polarización de un haz de luz, cuando éste incide sobre diferentes materiales, como: agua, un cristal de sal y un vidrio flint. Los materiales están inmersos en un campo magnético cuya dirección es paralela a la del haz incidente (láser de Helio-Neón). La intensidad del haz se midió después de que pasa a través de las muestras en presencia y ausencia del campo magnético. Se encontró que el ángulo de rotación del plano de polarización del haz es proporcional a la longitud de las muestras, a la intensidad del campo magnético y a la constante Verdet, que es propia de cada material. Para los materiales estudiados la constante de Verdet tiene un valor de 7,06, 4,43 y 12,0 (± 0.01) rad/mT, para el cristal de sal, el agua y el vidrio flint, respectivamente. En el desarrollo de este trabajo se implementó un montaje para observar el efecto Faraday usando un equipo sencillo, económico y fácil de construir en los cursos avanzados de física o ingeniería.

Palabras Clave: Efecto Faraday, Constante de Verdet.

ABSTRACT

The rotation that suffers the polarization plane of a light beam was determined, when this beam impacts on different materials as: water, a salt crystal and a flint glass. The materials are immersed in a magnetic field whose direction is parallel to the incident beam (Helium-neon laser). The beam intensity was measured after it passes through the samples in presence and absence of the magnetic field. Was found that the rotation angle of the beam polarization plane is proportional to the length of the samples, the magnetic field intensity and to the Verdet constant, that is own of each material. The Verdet constant for the studied materials was: 7.06, 4.43 and 12.0 (± 0.01) rad / mT, for the salt crystal, the water and the flint glass respectively. In the development of this work was implement an assembly to observe the Faraday effect using an economic, simple and easy to build equipment in advanced courses of physics or engineering.

Key Words: Faraday effect, Verdet constant.

1. INTRODUCCIÓN

Faraday encontró que el plano de polarización lineal de la luz incidente en un cristal, rotaba cuando se aplicaba un campo magnético intenso, cuya dirección coincidía con la dirección de propagación de la luz [1]. Éste fenómeno de giro se conoce como efecto Faraday. La luz dentro del material sigue linealmente polarizada, pero su plano de polarización va girando, por lo tanto la ausencia de campo magnético hará que la luz mantenga su orientación inicial [2]. Dentro de la descripción del fenómeno, se tiene que el plano de polarización representado por la superficie en la cual oscila la componente del campo eléctrico \vec{E} de la onda luminosa, va girando dentro del medio transmisor y emerge de él con una inclinación con respecto a la dirección inicial, tal como se muestra en la Fig.1. El ángulo de rotación está determinado por la expresión:

$$\beta = V \int_0^L \vec{B} \cdot d\vec{x} = \left(\frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\nu} \right) LB, \quad (1)$$

donde \vec{B} es el campo magnético, \vec{x} es un vector paralelo al vector de propagación de la onda que incide en la muestra, con una magnitud igual al camino óptico recorrido en la muestra y V es un factor de proporcionalidad denominado constante de Verdet, la cual depende de: la naturaleza del material, la temperatura y la frecuencia. Modelos cuánticos sofisticados permiten encontrar la dependencia explícita de la constante de Verdet con la temperatura. En este trabajo no se describe el proceso para llegar a tal dependencia, pero pueden ser encontradas en las referencias [3,4]. Para materiales

diamagnéticos y paramagnéticos se debe introducir un factor denominado anomalía magneto-óptica. En el caso de sustancias ferromagnéticas, se tiene que la rotación ya no es proporcional a la componente del campo magnético en dirección de propagación de la onda, sino a la componente de la magnetización.

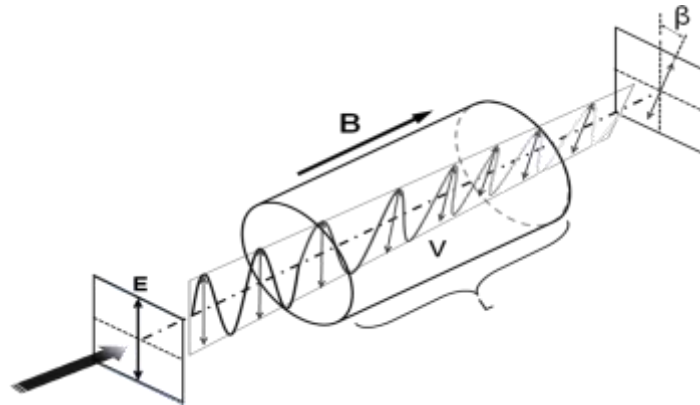


Figura 1. Efecto Faraday. Se muestra sólo el plano de polarización del vector eléctrico E. Donde L es la longitud del material y B el campo magnético.

1.1 Medición del efecto Faraday

Las técnicas diseñadas para la medición del efecto Faraday están adecuadas en sobremanera, a la obtención de un campo magnético intenso, cuya dirección coincida con la dirección de propagación de un haz de luz y al registro de la rotación del plano de polarización de luz que atraviesa la muestra. Una de ellas tiene que ver con la utilización de un campo magnético pulsado muy intenso, que se obtiene por la descarga de un condensador de alta tensión a través de un circuito RLC. Dentro del conjunto de elementos relevantes que integran el circuito, se encuentra: un capacitor, una bobina (solenoides), que en cuyo núcleo se incorpora la muestra a analizar y una llave gaseosa (Spark-Gaps), que consiste de dos esferas metálicas separadas por una distancia que se puede reajustar. Cuando el circuito es activado mediante una fuente de 1,2kV, se origina una descarga que induce la formación de una pequeña columna de plasma, en el espacio de separación entre los electrodos, que cierra el circuito principal haciendo que el capacitor se descargue rápidamente a través del solenoide. Durante el tiempo de descarga, se puede contar con un campo magnético intenso, debido a que la llave gaseosa permite trabajar con corrientes eléctricas grandes [5]. Adicionalmente, este arreglo experimental cuenta con una parte óptica, constituida por un láser de semiconductor, que se emplea como fuente de luz linealmente polarizada, un fotodiodo, que permite la detección del giro de polarización de la luz que atraviesa la muestra, un arreglo de espejos metálicos para la alineación del haz y un polarizador fijo (analizador). La señal suministrada por el fotodiodo (pulsos) requiere de un osciloscopio digital para ser registrada [6]. Otras técnicas para la medición del efecto Faraday, emplean principalmente un electroimán y un arreglo de polarizadores para tener información de la alteración del plano de polarización de un haz de luz que incide en un material, cuando éste está inmerso en el campo magnético generado por el electroimán. La descripción detallada de algunos de estos arreglos experimentales se puede consultar en [2,7].

Para el estudio del efecto Faraday es de gran ayuda la ley de Malus, la cual establece que la intensidad de un rayo de luz polarizado linealmente, que atraviesa un polarizador perfecto equivale a:

$$I = I_0 \cos^2 \theta_i , \tag{2}$$

donde I_0 indica la intensidad de la luz antes de pasar por el polarizador, I es la intensidad resultante, y θ indica el ángulo entre el eje del polarizador y el eje de polarización de la luz incidente [8].

2. Arreglo experimental

Los efectos del campo magnético en la propagación de una onda linealmente polarizada en un material, se lograron

medir con la ayudada primordial de un sensor de luz y de un electroimán que se acoplaron con otros elementos según el arreglo experimental mostrado en la Fig.2. El sensor de luz permite medir la intensidad por medio de un fotodiodo de silicio (Hamamatsu S1133), el cual produce un voltaje que es proporcional a la intensidad de la luz [9]. Los datos se almacenan en un computador usando la interface Go! Link de la Vernier y el software Logger Lite [10]. El electroimán consta de dos bobinas conectadas en serie y acopladas mediante un núcleo de hierro en forma de U. Tanto las bobinas como el núcleo de hierro son de la marca PHYWE. Cada una de las bobinas son de 600 vueltas, soportan 2 A en corriente, poseen una resistencia de $2,5 \Omega$ y una inductancia de 9 mH. En las superficies superiores del núcleo del electroimán se encuentran dos orificios de 4 mm, que nos permitieron colocar dos placas polares de hierro perforadas. El agujero permite que el haz de luz pase inmerso y paralelo al campo magnético, además de facilitar la colocación de los diferentes materiales a estudiar dentro del campo. El largo de estas placas es de $4.81 \pm 0.01 \times 10^{-2}$ m, con un agujero que pasa por su eje de 0.7×10^{-2} m de diámetro. Para el funcionamiento de este electroimán se contó con una fuente de 20 V y 2 A.

2.1 Procedimiento

Para que el haz del laser de Helio-Neón (con una longitud de onda de 632.8 nm), incidiera perpendicularmente sobre cada uno de los materiales a estudiar, se ubicó la muestra líquida en un recipiente cilíndrico de vidrio dentro de las perforaciones de los polos y las muestras sólidas entre las placas polares. Con ello se aseguró, como se menciona anteriormente, que la dirección de propagación del haz fuese paralela al campo magnético generado por el electroimán. El haz se hizo pasar por dos polarizadores, ubicados antes y después de la incursión de éste por los materiales. Por lo tanto, se situó el sensor de intensidad después del segundo polarizador, para captar el grado de intensidad del haz en presencia o ausencia de campo magnético. A la vez se midió el campo magnético aplicado al material, con una sonda Hall de un teslámetro digital. En definitiva, se midieron intensidades del haz para diferentes valores de campo magnético utilizando un cristal de sal, un vidrio flint y agua. Los datos de las intensidades del haz para diferentes condiciones se lograron registrar en un PC, gracias a la interfaz y al software de adquisición de datos. De tal manera que durante un tiempo dado se registro el comportamiento de la intensidad del haz después de incursionar en cada uno de los materiales. Es importante anotar que antes de registrar las intensidades, el laser se dejo estabilizar durante media hora. Las longitudes que tuvo que recorrer el haz en cada una de las muestras fueron: 1.16, 1.26 y 10.19 (± 0.01) cm, para el cristal de sal, el vidrio flint y el agua respectivamente. El recipiente de vidrio cilíndrico que contenía el agua (sin destilar), fue sellado con tapas de vidrio en sus extremos, cuyos grosores son muy pequeños (0.08 cm) con respecto a la longitud total del tubo. Por consiguiente, los efectos de estas tapas no son relevantes en los cambios de intensidad del haz después de que éste pase a través de ellas y la muestra de agua.



Figura. 2 Montaje experimental: a: Laser de Helio-Neón, b₀ y b₁: polarizadores, c: fuente de 20VDC, 12A, d: electroimán, e: teslámetro digital, f: Sensor de intensidad, g: Interfaz Go Link!

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los datos que se recolectaron fueron los valores del campo magnético al cual se sometió cada muestra y las intensidades del haz después de que éste incidiera en ella, primero en ausencia de campo magnético y después en presencia del mismo. En la Fig. 3-(a) se puede observar como la intensidad del haz incidente disminuye, por la presencia del campo magnético para todas las muestras estudiadas. Debido a la gran cantidad de datos recogidos, se procedió a calcular valores promedios de las intensidades y sus respectivas desviaciones estándares, para así proceder a calcular los ángulos de giro que sufrió el plano de polarización de la luz, a través de la Ley de Malus. Las relaciones de los ángulos de giro con los valores del campo magnético se representan gráficamente en la Fig. 3-(b), para todos los materiales. Las incertidumbres en los ángulos se determinaron según la teoría de propagación de errores.

Para todas las muestras, la mejor función que representa la relación entre el campo magnético y el efecto de giro del plano de polarización de la luz incidente, es una relación lineal. Tal comportamiento es congruente a lo deducido en la expresión (1). Las constantes de Verdet (V) y sus correspondientes discrepancias porcentuales frente a valores reportados en la literatura [12,13] para los materiales empleados, se sintetizan en la tabla 1. La determinación de estas constantes se efectuaron dividiendo las pendientes de las relaciones lineales encontradas en la figura 3-(b), con las longitudes que debió recorrer el haz en cada una de las muestras.

La discrepancia porcentual de la constante de Verdet para el agua sobrepasa el 10%, lo cual puede ser debido a que se trabajó con agua potable más no destilada, como fue el caso de los valores reportados en la literatura. Además las temperaturas a las cuales se determinaron nuestras constantes fue a una T promedio de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los valores tomados de la literatura se midieron a un T de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

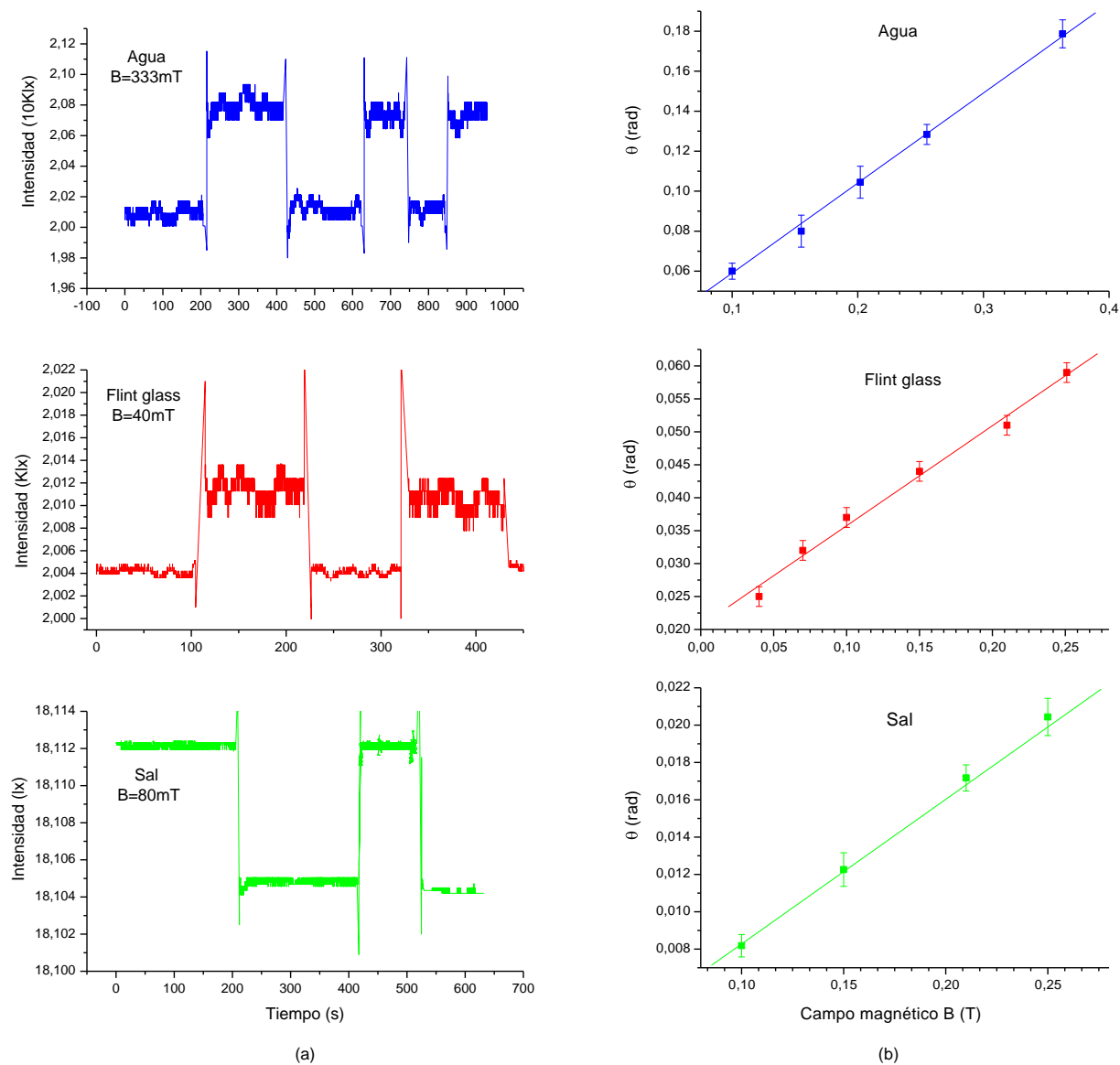


Figura 3: (a) Intensidades como función del tiempo, en presencia (escalones bajos) y ausencia (escalones altos) de campo magnético. (b) Ángulo de giro del plano de polarización del haz (θ) que incide sobre los materiales en función del campo magnético B aplicado.

Tabla 1. Constantes de Verdet (V_{Exp} y V_{Lit}) para una muestra de agua, un vidrio flint y un cristal de sal (NaCl), determinadas a partir las pendientes de las relaciones lineales de la Fig. 3-(b) y la longitud de las muestras.

Material	Pendiente (rad.m/mT)	Longitud (cm)	V_{Exp} (rad/T.m)	V_{Lit} (rad/T.m)	Discrepancia porcentual
Agua	0,451	$1,02 \pm 0,01$	$4,43 \pm 0,01$	3,808	14%
Vidrio flint	0,152	$1,23 \pm 0,01$	$12,00 \pm 0,01$	11,8	2%
NaCl	0,082	$1,16 \pm 0,01$	$7,06 \pm 0,01$	8,50	20%

La discrepancia porcentual del cristal de sal se puede atribuir a posibles dispersiones del haz de luz, en el momento

de incidir por una de las caras del cristal. Ya que las superficies de éstas no fueron totalmente planas y paralelas y por ende no perfectamente perpendiculares al vector de propagación de la onda incidente. Otra causa de la discrepancia, pueden ser las impurezas del cristal de sal que proviene de la mina de sal de Zipaquirá, que pueden afectar la transmisión del haz de luz.

CONCLUSIONES

La respuesta magneto-óptica por transmisión para un cristal de sal, una muestra de agua y un vidrio flint fueron de 7,06, 4,43 y 12,0 (± 0.01) rad / mT, respectivamente. El agua inmersa en un campo magnético paralelo a la dirección del haz fue el material que menos capacidad posee de alterar la manera de propagación de una onda plana. El campo magnético generado por el electroimán empleado, permitió generar campos magnéticos adecuados tanto en dirección como en magnitud, para una buena apreciación del efecto Faraday en muestras sólidas (cristal NaCl y vidrio flint) y líquidas (agua). El sensor de luz utilizado para medir las intensidades facilitó en sobremanera la toma de datos y permitió una buena certeza en los cálculos de las constantes de Verdet de los materiales empleados. Las discrepancias en las constantes de Verdet fueron del 2 %, 14%, y del 20%, para un vidrio flint, una muestra de agua y un cristal de sal, respectivamente. Posiblemente la causa de estas discrepancias, tenga que ver con el grado de pureza de los mismos y de la temperatura a la cual se efectuaron las mediciones. Podría darse un mejor aprovechamiento de la intensidad del campo magnético, si se aumenta la distancia recorrida por el haz inmerso en el campo. Esto se podría hacer haciendo reflejar el haz varias veces en espejos, cuidando que su trayectoria sea siempre paralela al campo magnético, obligándolo a recorrer una mayor distancia estando dentro de la muestra. Este montaje experimental es de gran utilidad para ilustrar conceptos y el efecto de los campos electromagnéticos en la materia, que se estudian usualmente en las áreas de física e ingeniería. Además los equipos utilizados por lo general están disponibles en las instituciones y por tanto para los estudiantes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración en facilitar algunos elementos para el arreglo experimental preliminar a los profesores: Julio E. Rodrigues y Jaime Torres.

REFERENCIAS

1. Hecht, *Optics*, Editorial Adisson Wesley Iberoamericana, Madrid 2000
2. S. Galindo y S Cruz, "Aparato para la medición del efecto Faraday", Rev. Mexicana de Física 48, pp. 475-484, 2002.
3. R. Serber, Phys Rev. 41 , pp. 489 , 1932
4. J.H. Van Vleck and M.H Hebb, Phys Rev. 57, pp. 835, 1930.
5. Efecto Faraday Laboratorio 5, Departamento de Física Universidad de Buenos Aires, 2008.
6. http://www.laseroptics.com.ar/Notas_tecnicas/Equipo%20de%20efecto%20FARADAY.pdf.
7. PHYWE, Laboratory Experiments Physics Applied Optics Faraday effect, 2008.
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Polariz>.
9. <http://www2.vernier.com/booklets/ls-bta.pdf>.
10. Vernier, Logger Pro[®] 3 Quick Reference Manual, 2008.
11. Thomas G. Spears, "The Verdet Constant of Light Flint Glass", The College of Wooster, Physics Department Wooster, Ohio 44691.
12. Marvin J. Weber, *CRC Handbook of Laser Science and Technology: Optical Materials*, CRC Press Inc., pp 406, U.S.A, 2000.