

# Efecto Faraday: determinación de la constante de Verdet

Kuperman, Martín; Sandá Seoane, Rosa

Laboratorio 5, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Abril de 2015

## Resumen

En el presente trabajo, se determinó la constante de Verdet para el efecto Faraday generado sobre un haz de luz proveniente un láser de He-Ne linealmente polarizado de 632,8 nm de longitud de onda, al someterlo a un campo magnético y atravesar como medio material agua destilada (colocada en un tubo dentro de la bobina que se utilizó para generar el campo magnético necesario para producir el efecto), todo esto a una temperatura  $T = (26,5 \pm 0,5)C$ . A través de la obtención del ángulo de rotación del plano de polarización en función del módulo del campo magnético (que se fue variando), se obtuvo que la constante de Verdet para la longitud de onda de la luz y el medio material mencionados, es de  $V = (0,0041 \pm 0,0001) \frac{rad}{T \cdot m}$ .

## 1. Introducción

de polarización de la luz puede escribirse como[2]:

$$\theta = VBL \quad (1)$$

### 1.1. Generalidades teóricas

donde V es la constante de Verdet, L el largo del medio atravesado, y B el módulo de la componente de el campo magnético paralela a la propagación de la luz. La constante de Verdet depende de la longitud de onda de la luz, del medio atravesado y de la temperatura.

El *efecto Faraday* es la rotación del plano de polarización de la luz debido a un campo magnético impuesto dentro de un medio material particular. El campo magnético induce una birrefringencia circular en el medio, es decir, índices de refracción diferentes para polarización circular derecha e izquierda. Cabe destacar que luz linealmente polarizada, puede escribirse como superposición de luz con polarización derecha e izquierda. Al atravesar el medio, esta luz, presenta un desfase en sus componentes, cosa que sucede debido a los diferentes índices de refracción que hacen que el camino óptico recorrido por cada componente de polarización sea distinto. El resultado final de esto, es un cambio en el ángulo del plano de polarización. Este fenómeno puede observarse si se hace incidir un láser linealmente polarizado, complementándolo a un campo magnético con dirección paralela a la dirección de propagación del haz de luz.

Si se incide con luz polarizada linealmente en el eje x (que se supone que se propaga en dirección z) y se coloca un polarizador a la salida del medio, que forme un ángulo  $\phi$  con respecto al eje de polarización, el campo resultante puede escribirse como[1]

$$\vec{E} = A_o(Cos(\phi-\theta)Cos(\theta)\hat{x} - (\phi-\theta)Sen(\theta)\hat{y})e^{i(-wt+kz)} \quad (2)$$

donde  $\theta$  la variación angular del plano de polarización luego de pasar por el medio afectado por el campo magnético y  $\phi$  es el ángulo que forma el eje del polarizador con respecto al eje x.

A partir de la expresión del campo eléctrico, se obtiene la intensidad de la luz luego de pasar

La variación angular que experimenta el plano

por el polarizador:

$$I = A_o^2 \cos^2(\phi - \theta) \quad (3)$$

Analizando esta ecuación y considerando que en el laboratorio es  $\theta \ll 1$  vemos que la intensidad de salida alcanza un máximo para  $\phi = \pi/4$ . Tomando en cuenta estas consideraciones, haciendo un desarrollo de Taylor, la intensidad puede escribirse

$$I = \frac{1}{2}(1 + 2\theta)A_o^2 \quad (4)$$

Si se supone que  $B = B_0 \sin(\omega t)$  y que  $\theta$  es proporcional a B, obtenemos que  $\theta = \theta_o \sin(\omega t)$ . Luego tomando en cuenta esto, la intensidad puede escribirse como

$$I = \frac{1}{2}I_o(1 + 2\theta_o \sin(\omega t))A_o = I_o + \Delta I \sin(\omega t) \quad (5)$$

Luego, se puede concluir que:

$$\theta_o = \frac{1}{2} \frac{\Delta I}{I_o} \quad (6)$$

En un laboratorio, se puede utilizar un fotodiodo para obtener  $I_o$  y  $\Delta I$  a la salida del polarizador. Dicho fotodiodo, devuelve una corriente que es proporcional a la intensidad incidente. Si se considera además de que el mismo debe conectarse a un instrumento de medición para poder realizar la medición, para asignar un valor de voltaje el mismo multiplicará dicha corriente por su propia impedancia interna (por Ley de Ámpere). Pero por hipótesis, podemos afirmar que la intensidad es proporcional a la corriente que sale del fotodiodo, independientemente del instrumento que la sense. Si se mide la  $I_o$  con un osciloscopio por ejemplo, y la  $\Delta I$  con un Lock-in, esto se resume en que:

$$I_o = \alpha_o \cdot i_{osciloscopio} = \alpha_o \cdot \frac{V_{osciloscopio}}{R_{osciloscopio}} \quad (7)$$

$$\Delta I = \alpha_o \cdot i_{lock-in} = \alpha_o \cdot \frac{V_{lock-in}}{R_{lock-in}} \quad (8)$$

Y por lo tanto, la ecuación (6) puede reescribirse como:

$$\theta_o = \frac{1}{2} \frac{i_{lock-in}}{i_{osciloscopio}} = \frac{1}{2} \frac{V_{lock-in} \cdot R_{osciloscopio}}{V_{osciloscopio} \cdot R_{lock-in}} \quad (9)$$

Cabe destacar, que el campo magnético puede ser generado por una bobina de largo  $l$  mucho

mayor a su radio. Bajo esta aproximación (es decir, despreciando efectos de borde), la amplitud del campo aplicado puede escribirse como

$$B_o = \frac{\mu i N}{l} \quad (10)$$

donde  $\mu$  es la permeabilidad del medio,  $i$  la corriente que circula por la bobina, y  $N$  la cantidad de vueltas de la misma.

## 1.2. Objetivos

Con la motivación generada por lo desarrollado en las Generalidades Teóricas, el objetivo de este trabajo fue medir la constante de Verdet para el efecto Faraday. Este se pudo generar sobre la luz proveniente de un láser de He-Ne linealmente polarizado de 632,8 nm de longitud de onda, al hacerlo atravesar agua destilada, medio sobre el cual se aplicó un campo magnético -generado por medio de una bobina- de dirección paralela a la dirección de propagación del haz de luz. Para ello, midiendo la intensidad de la luz con un fotodiodo a la salida del medio, sin campo magnético ( $I_o$ ), así como el  $\Delta I$  para cada valor de B generado, con las consideraciones de las ecuaciones (7) y (8), teniendo en cuenta además las impedancias internas de los instrumentos de medición conectados al fotodiodo en cada caso, se obtuvo la variación angular experimentada por el plano de polarización de la luz según la ec. (9). Teniendo en cuenta además el largo del medio material utilizado ( $L$ ) y el módulo del campo magnético en cada punto (dado por la ec. (10)), se halló la constante de Verdet en cuestión, mediante la ec. (1).

## 2. Desarrollo experimental

### 2.1. Armado del dispositivo

Un esquema del dispositivo experimental utilizado se encuentra en la Fig.1.

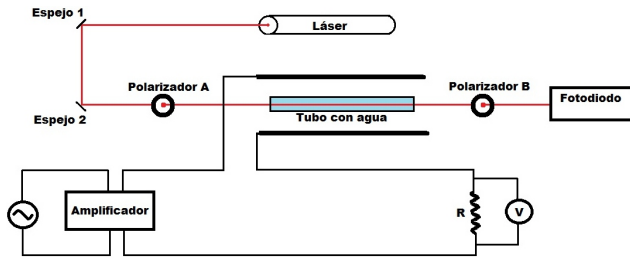


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental utilizado. En rojo se representa el camino óptico del haz del luz.

Se utilizó un generador de funciones *Tektronix AFG 3021B*, el cual se seteó que emitiera una señal senoidal de frecuencia fija de 1KHz (basado en el trabajo de otros grupos en esta experiencia) y amplitud variable, para así variar la intensidad del campo magnético dentro de la bobina. Debido a que se necesitaban grandes variaciones en el campo magnético para que el efecto a medirse fuera apreciable, y como el generador de funciones no genera la corriente que se necesitaba, se agregó un amplificador de tensión de 50W. Se verificó, mediante el uso de un osciloscopio *Tektronix TDS 1002B*, que el mismo amplificaba la tensión en un factor  $5,7 \pm 0,1R$ , factor que se sacó del ajuste lineal de la tensión amplificada en función de la tensión del generador que se observa en la Fig. 2 (datos recogidos sólo con el generador y el amplificador como elementos circuitales).

Se utilizó una bobina de alambre esmaltado de Cobre de un largo de  $(1,075 \pm 0,001)m$  y una densidad de vueltas  $n=(512 \pm 5)$ vueltas/m, con una resistencia interna de  $(1,6 \pm 0,2)\Omega$ . La resistencia utilizada fue de  $(1,0 \pm 0,1)\Omega$ , y de una potencia máxima de 5W, por lo que se estimó que la misma soportaba una corriente máxima de 2,2 A aproximadamente (de un orden menor que la tolerada por la bobina, de 15 A), límite de la corriente a utilizarse a lo largo de la experiencia. Dado que este límite es alto para cuestiones de seguridad en el laboratorio, se tuvo especial cuidado en el cableado y el cuidado de los equipos. En particular, al amplificador se le colocó un cooler para evitar que sobrecaliente, el cual se alimentó con una fuente DC *LG GP-4303D* seteada con un voltaje de  $(12,6 \pm 0,1)V$ .

El láser utilizado fue un *Melles Griot LHP-111* de He-Ne de 5mW de potencia (máximo nominal) y  $\lambda = 632,8nm$ . El mismo se dejó estabilizar obturado (por cuestiones de seguridad) por aproximadamente media hora. El tubo con agua destilada,

de longitud  $L=(1,015 \pm 0,005)m$ , se colocó en el centro de la bobina, y con sus extremos equidistantes de los extremos de la misma (de manera de poder despreciar en el posterior cálculo del campo B los efectos de borde, y poder hacer valer la hipótesis de que fue uniforme a lo largo de todo el medio material).

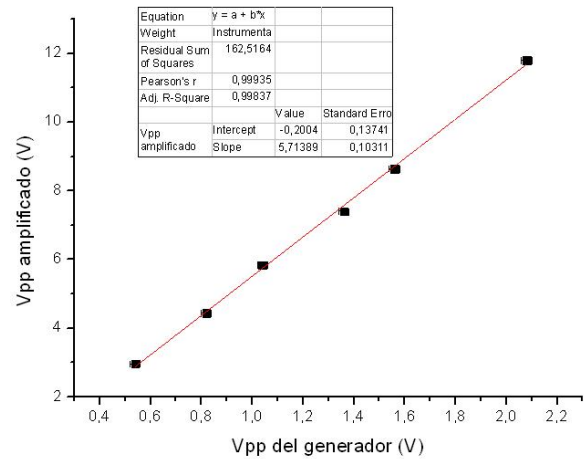


Figura 2: Ajuste lineal del voltaje entregado por el generador en función del voltaje a la salida del amplificador.

Para el alineamiento del haz de luz, que se observa en la Fig.1, ayudándonos con las líneas de la mesa óptica, se colocó el espejo 1 de manera de que el haz del láser incida directamente en su centro. A continuación, se colocó el segundo espejo a la misma altura del primero, y se lo fue moviendo hasta lograr que el haz ingresara por el centro del tubo, siguiendo su eje central (paralelamente al campo que se generaría en la bobina). Es importante hacer la salvedad de que la altura del sistema se fue modificando para lograr esto último (pero respetando que ambos espejos estuvieran a la misma altura y que el láser incidiera en el centro del primero). Todo este proceso fue sin duda lo más trabajoso del desarrollo experimental.

Una vez logrado el camino óptico deseado, se colocó el polarizador A de manera de que la intensidad del haz de luz a la salida del tubo de agua fuera máxima (esto se hizo a ojo pero luego se corroboró con el fotodiodo), momento en que el plano de polarización del láser coincide con el del polarizador, de manera de que la luz ingresante al medio estuviera libre de cualquier componente fuera del plano de polarización deseado. Dicho plano lo encontramos a los  $(117 \pm 2)^\circ$  (leídos con el

medidos de ángulos del polarizador, cuya mínima división coincide con error asignado). Luego, siguiendo con la condición que se deduce de la ec.(3) de la Intruducción, se colocó el polarizador B a  $45^\circ$  respecto del primero, es decir, a los  $(162 \pm 2)^\circ$ , ya que de esta forma obtendríamos intensidad máxima en el fotodiodo (cosa que se corroboró experimentalmente).

Finalmente, se colocó el fotodiodo a la salida del segundo polarizador, alineado con el resto del sistema.

Toda la experiencia se realizó a un temperatura de  $T = (26,5 \pm 0,5)C$  (medidos con termómetro).

## 2.2. Adquisición de datos

En primera instancia, se procedió a medir la intensidad de la luz que llegaba al fotodiodo sin campo magnético ( $I_o$ ) (es decir, con el generador de funciones apagado). Para ello, se conectó el fotodiodo al osciloscopio. Con la luz del laboratorio apagada (para evitar interferencias provocadas por la luz ambiente en nuestro experimento), antes que nada se verificó que la intensidad de luz que llegaba al fotodiodo no estuviera saturándolo. Para ello, mediante observación directa del voltaje registrado por el osciloscopio, se fue rotando el polarizador B desde su posición hasta el ángulo en el que se esperaba obtener intensidad mínima (a  $90^\circ$  del ángulo del ángulo de la máxima), y se verificó que efectivamente se observaba un máximo y un mínimo en el voltaje (con todo el paso intermedio hasta llegar a esos puntos). Una vez que se aseguró que la intensidad que llegaba al fotodiodo no estaba saturada, ya con el polarizador B en su posición inicial, se procedió a conectar el osciloscopio a su vez a la computadora. Para medir el voltaje en función del tiempo, se utilizó el programa *Osciloscopio.vi*. El mismo captura la pantalla completa del osciloscopio al momento de registrar la medición, devolviendo 2500 puntos equiespaciados temporalmente de voltaje con su unidad correspondiente. Pero el programa no guarda datos en el eje temporal. Por lo que considerando que al momento de hacerse la medición la escala del eje x del osciloscopio era de 500 us/división, y la misma tiene 10 divisiones, se supo que se capturaron 5000 us totales. La escala utilizada en el eje y fue de 500 mV/división, elegida de modo tal de que la señal no saturara los límites verticales de la pantalla (para no capturar datos por defecto con

el programa).

A continuación, se procedió a medir  $\Delta I$  para cada valor de  $B$  a generarse en la bobina (con el  $I_o$  medido en primera instancia, se obtendría  $\theta_o$  en cada caso). En esta ocasión, el fotodiodo se conectó a un Lock-in *Stanford SR810*, debido a que la señal que llegaba del fotodiodo era ruidosa, y los  $\Delta I$  a registrarse podrían verse afectados (teniendo en cuenta que se esperaban  $\theta \ll 1^\circ$ ). El Lock-in no se utilizó para medir  $I_o$  por la sencilla razón de que el mismo necesita una señal de referencia de una frecuencia determinada para limpiar el ruido, y en la medición de  $I_o$  no había señal senoidal alguna contra la cual permitirle comparar al Lock-in para eliminar las componentes de frecuencias parásitas (debido a que dicha medición se hace con el campo magnético apagado). Para medir el  $\Delta I$  en cada caso, la señal de referencia utilizada fue la del generador, que se conectó directamente al Lock-in mediante un conector tipo T, sin hacerla pasar por el amplificador de tensión del circuito de la Fig. 1 (para evitar quemar el Lock-in). Dado que la frecuencia fijada en el generador era de 1KHz, se estableció que el tiempo de integración del Lock-in fuera de 300 ms (se recomienda como mínimo que sea 10 veces mayor al período de la señal a integrar, pero se optó que sea 300 veces mayor para que el filtrado del ruido sea más fino). Se optó que el Lock-in midiera "R", que es el módulo de la señal ya filtrada en voltaje RMS, es decir, el módulo de la señal ya sin ruido proveniente desde el fotodiodo. Se notó que al prender el campo, la señal medida en el Lock-in era del orden de los uV (que teniendo en cuenta la consideración hecha sobre las impedancias de los instrumentos de medición en la Intruducción, en las ecuaciones (7) y (8), no era de extrañar, si se la compara con la señal que se medía en el osciloscopio al medir  $I_o$ , que era del orden de los 100 mV). Para poder capturar el voltaje medido por el Lock-in en función del tiempo, se lo conectó a uno de los canales del osciloscopio, para poder seguir capturando los datos con el programa *Osciloscopio.vi*. Se notó que lo que el Lock-in registraba en uV, el Osciloscopio lo devolvía en V (no se pudo hacer una calibración como corresponde en un caso así entre los valores medidos por ambos instrumentos por una cuestión de tiempo, pero pese a eso se verificó a ojo que eran exactamente los mismos valores, pero en unidades distintas). Simultáneamente, con el otro canal del osciloscopio, se midió el voltaje en

función del tiempo sobre la resistencia R del circuito con la bobina, para poder obtener por Ley de Ohm la corriente en función del tiempo, y así el valor del campo B en cada caso (señal del tipo senoidal). La pantalla de datos de ambos canales fueron capturados, para 6 valores distintos de campo B, esto es, para 6 valores distintos de voltaje seteados desde el generador, los cuales fueron, en  $V_{pp}$ , de 800, 600, 500, 400, 250 y 100 mV (estos datos de tomaron sin error desde la pantalla del generador, por no necesitarse para este trabajo en cuestión). No se superaron los 800 mV porque por encima de este valor se alcanzaba peligrosamente el valor de corriente que podía quemar la R de nuestro circuito, debido a la presencia del amplificador (ya seteando el sistema en 800 mV la R calentaba bastante). Para el eje x del osciloscopio en todas las pantallas capturadas, se usó la misma escala, por lo que siempre se capturaron 5000 us totales. Las escalas en el eje y de ambos canales, se eligieron nuevamente teniendo en cuenta que no se saturaran los límites verticales de la pantalla del osciloscopio.

### »3. Resultados y discusiones

»Una vez colectados los datos, se buscó determinar el valor de la intensidad sin campo magnético  $-I_{\sigma}$ . Para esto se utilizó la ec. (7) con  $R_{osciloscopio}=1\text{ M}\Omega$ [4]. Luego, mediante la ec.(8) y considerando  $R_{Lock-in} = 10\text{ M}\Omega$  [3] se determinó  $\Delta I$  para cada una de las 6 mediciones realizadas. Mediante la ec.(6) se obtuvo el ángulo  $\theta$  para cada una de las mediciones.

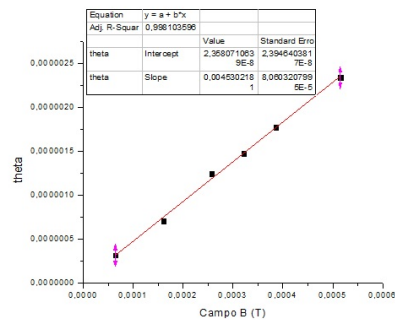
»Para determinar el campo magnético, se utilizó que la permeabilidad magnética del agua es  $\mu=4\pi\cdot 10^{-7}\frac{N}{A^2}$ . La corriente circulante por la bobina, se obtuvo mediante la ley de Ohm, conociendo la caída de tensión -sobre la resistencia R- luego de ser amplificada. A partir de esto, y mediante la ec.(10) se obtuvo el campo magnético para cada una de las 6 mediciones.

»Teniendo en cuenta la relación dada entre el campo B y el ángulo  $\theta$  por la ec. (1) se graficó dicho ángulo en función del campo B, realizándose un ajuste lineal. Dividiendo a la pendiente obtenida en el mismo por la longitud de el medio atravesado por el láser, se obtuvo la constante de Verdet. El ajuste puede observarse en la Fig.(3)

»El valor obtenido mediante este ajuste fue de  $V=(0,0041 \pm 0,0001)\frac{rad}{T\cdot m}$ . Esta constante es 3

órdenes de magnitud más pequeña que lo esperado, de  $3,808\frac{rad}{T\cdot m}$  a una temperatura promedio de  $14^{\circ}\text{C}$  [5]. Más que a las diferencias entre las temperaturas entre el experimento realizado en este trabajo y el citado, que suponemos que no pueden provocar tres órdenes de magnitud de diferencia entre las constantes de Verdet obtenidas en cada caso, se pueden atribuir estas discrepancias a 2 posibles factores. El primero de ellos es la posibilidad de que el campo magnético generado no haya sido paralelo al haz del láser, debido esto a la mala alineación del láser o a la aproximación de considerar la bobina infinita. En particular, sobre el camino óptico de la luz del láser, se puede afirmar que dado la dificultad sufrida en la alineación del sistema, el mismo no entró de manera perfecta sobre el eje central del tubo del agua, sino de una forma aproximada, lo que seguramente provocó reflexiones internas que puedan haber llegado a afectar nuestras mediciones.

»El segundo factor, quizás el más probable desde nuestra óptica, es algún error en la consideración del orden de magnitud del voltaje obtenido en el Lock-in a partir de lo que se registró en el Osciloscopio. Sin duda, no haber hecho una calibración entre los valores devueltos por ambos instrumentos sobre la intensidad que llegaba al fotodiodo en presencia del campo pone en jaque la veracidad de las unidades de cualquiera de nuestros resultados referidos a los  $\Delta I$ .



»

»Figura 3: Ajuste lineal de el ángulo  $\theta$  en función del campo magnético aplicado.

### »4. Conclusiones

»Mediante la relación lineal entre el ángulo  $\theta$  y el campo magnético en el efecto Faraday generado sobre el haz de luz de un láser de He-Ne de 632,8 nm de longitud de onda, al atravesar como me-

dio material agua destilada, se pudo determinar la constante de Verdet. El valor hallado fue de  $V = (0,0041 \pm 0,0001) \frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}}$  a  $T = (26,5 \pm 0,5)C$ . Este valor no es coincidente con el esperado, para el láser y el medio utilizado, el cual era de  $3,808 \frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}}$ , a una temperatura promedio de  $14^{\circ}C$ . [5].

»Lo que resultó más probable para entender el por qué del resultado, es notar que se puede haber cometido algún error en la consideración del voltaje obtenido en el Lock-in a partir de lo registrado en el osciloscopio durante las mediciones de los  $\Delta I$ , a partir de los cuales se obtenía el  $\theta$ . Para un próximo trabajo, es de vital importancia, por lo tanto, calibrar lo medido por el Lock-in con respecto a lo que mide el osciloscopio, para descartar o confirmar las presunciones realizadas. En menor medida, se puede atribuir esta discrepancia a inconvenientes en la alineación del láser (que no fue óptima y en futuras experiencias debe mejorarse) o a la aproximación de la bobina como infinita, así

como a la diferencia de temperaturas entre el experimento descrito en este trabajo y el experimento del trabajo tomado como referencia.

## »Referencias

- [1] »OSCAR E. MARTINEZ, *Ondas: Es física*, Primera edición, Pags. 71 a 73 , 2007.
- [2] »HECHT, OPTICS, EDITORIAL ADISON WESLEY IBEROAMERICANA, MADRID 2000 , *Ondas: Es física*, Primera edición, Pags. 60 a 61 , 2007.
- [3] »[http : //www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manual](http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manual)
- [4] »[http : //www.tek.com/datasheet/tds1000b-series](http://www.tek.com/datasheet/tds1000b-series)
- [5] »[unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home10/](http://unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home10/)