

Roteiro por: Edmar M. Nascimento

O EFEITO FARADAY

1. Objetivo do Experimento

Observação do Efeito Faraday e a determinação do ângulo de rotação do plano de polarização da luz que atravessa um vidro tipo flint como uma função linear do fluxo magnético no meio. Determinar a constante de Verdet como função do comprimento de onda e do índice de refração do meio.

2. Fundamentação Teórica

A rotação do plano de polarização da luz que passa através de um meio submetido a um campo magnético alinhado paralelamente à direção de propagação da luz foi descoberta por M. Faraday em 1845.

O Efeito Faraday se caracteriza pela mudança da direção de polarização de um feixe de luz linearmente polarizado quando esta se propaga ao longo do campo magnético a que está submetido um meio transparente. A luz transmitida é em geral elipticamente polarizada com o seu eixo maior girado em relação à direção do plano de polarização do feixe incidente. Para um dado material sentido de rotação com referencia ao campo magnético não depende da direção da luz.

Para materiais isotrópicos o ângulo de giro do plano de polarização da luz, θ , é proporcional à espessura do material, s , e a intensidade do campo magnético B .

$$\theta = V(\lambda, T) \cdot s \cdot B \quad (1)$$

onde $V(\lambda, T)$, que depende do comprimento de onda da luz e da temperatura, é denominada constante de Verdet¹ e é expressa no SI em [rad/T.m], mas também é freqüentemente encontrada na literatura expressa em [min. de arco/Gauss.cm].

¹ Emile Verdet (1824-1866), físico francês que editou os trabalhos de Fresnel e estudou fenômenos magnéticos.

2.1. Freqüência de Larmor e Birrefringência circular

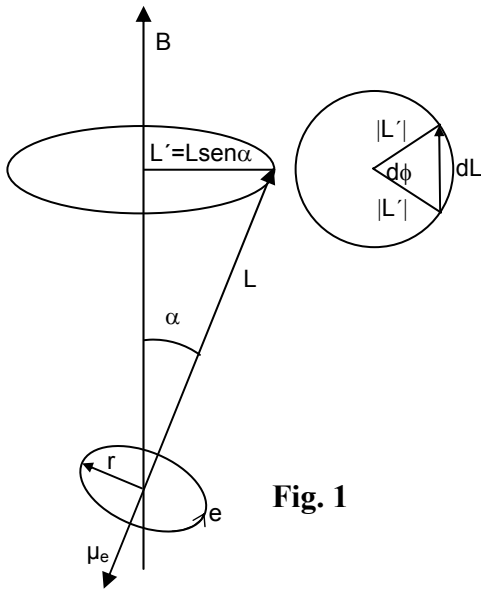


Fig. 1

A Fig. 1 mostra o efeito de um campo magnético, B , aplicado sobre um elétron que se move em uma órbita circular de raio r , cujo plano está inclinado de um ângulo arbitrário α , com relação à direção do campo. Nesta figura L é o momento angular do elétron e μ_e o seu momento magnético.

A interação do campo magnético externo com o momento magnético do elétron na órbita circular, produz um torque sobre a órbita eletrônica,

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu}_e \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

ao qual corresponde um impulso angular que modifica o momento angular L por,

$$\boldsymbol{\tau} dt = d\mathbf{L} \quad (3)$$

Isto faz com que a órbita, e conseqüentemente o momento angular associado, executem um movimento de precessão no sentido anti-horário ao redor da direção do campo magnético. O ângulo de rotação, $d\phi$, associado a dL é dado por:

$$d\phi = dL/L' = \tau dt/L \sin\alpha \quad (4)$$

de modo que a velocidade angular de precessão é dada por:

$$\omega_p = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\tau}{L \sin\alpha} = \frac{\mu_e B \sin\alpha}{L \sin\alpha} = \frac{\mu_e B}{L} \quad (5)$$

Sabendo que o momento angular do elétron pode ser dado por

$$|\mathbf{L}| = |\mathbf{r} \times \mathbf{p}| = mvr = mr^2\omega \quad (6)$$

e que o momento magnético do circuito circular de corrente é dado por,

$$\mu_e = i(\pi r^2) = \frac{dQ}{dt}(\pi r^2) = e \cdot f = \frac{e\omega}{2\pi}, \quad (7)$$

Obtemos a freqüência de precessão da órbita eletrônica no campo magnético, *freqüência de Larmor*², substituindo (6) e (7) em (5).

$$f_L = 2\pi\omega_p = \frac{eB}{4\pi m} \quad (8)$$

² Sir Joseph Larmor (1857-1942), físico e matemático irlandês, realizou estudos em eletricidade, dinâmica e termodinâmica.

Portanto a interação do campo magnético com os circuitos de correntes formados pelos elétrons resulta na rotação desses circuitos ao redor da direção do campo aplicado.

O feixe luminoso linearmente polarizado, propagando-se através do meio pode ser visto como a superposição de duas ondas circularmente polarizadas, à direita e à esquerda, de mesma amplitude. Por sua vez a rotação ótica pode ser entendida em termos da birrefringência circular, ou seja a existência de índices de refração diferentes para as ondas circularmente polarizadas à direita e à esquerda, de modo que cada componente se propaga com velocidades diferentes. Como resultado os feixes emergente estarão defasados entre si e a sua superposição resultará em uma onda elípticamente polarizada com a direção do eixo maior girado com relação à onda incidente. Com relação à estrutura eletrônica formada pelos circuitos de elétrons, as componentes à direita (d) e à esquerda (e) da onda giram com frequências $f + f_L$ e $f - f_L$ e uma vez que em um meio dispersivo o índice de refração depende da frequência podemos escrever:

$$n_d = n(f + f_L) \text{ e } n_e = n(f - f_L) \quad (9)$$

As fases de cada onda (direita e esquerda) após atravessar o meio de espessura s são dadas por,

$$\phi_d = (n_d s / \lambda) 2\pi \text{ e } \phi_e = (n_e s / \lambda) 2\pi \quad (10)$$

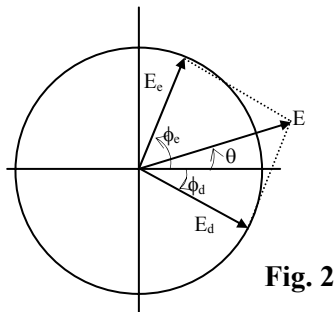


Fig. 2

A Fig. 2 mostra as duas fases (ϕ_d e ϕ_e) tomadas com relação à fase inicial $\phi = 0$; nesta figura o campo elétrico emergente é mostrado girado de um ângulo θ com relação à sua orientação inicial. As relações angulares na figura permite-nos concluir que, $\theta = \frac{1}{2}(\phi_e - \phi_d)$, de modo que substituindo as relações em (10)

teremos:

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right) (n_e - n_d) \quad (11)$$

A quantidade $(n_e - n_d)$ podemos calcular, aproximadamente, por:

$$\begin{aligned} n_e - n_d &= n(f - f_L) - n(f + f_L) \\ &= \left(n(f) - \frac{dn}{df} f_L \right) - \left(n(f) + \frac{dn}{df} f_L \right) \\ &= -2f_L \frac{dn}{df} \end{aligned} \quad (12)$$

Nesta última expressão colocando-se $dn/df = -(\lambda^2/c)dn/d\lambda$ e a frequência de Larmor dada em (8), obtemos

$$n_e - n_d = 2 \left(\frac{eB}{4\pi m} \frac{\lambda^2}{c} \right) \frac{dn}{d\lambda} \quad (13)$$

Substituindo então (13) em (11) podemos escrever:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\pi s}{\lambda} \left(\frac{eB}{2\pi m} \right) \left(\frac{\lambda^2}{c} \frac{dn}{d\lambda} \right) \\ &= \left(\frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} \right) \cdot s \cdot B \end{aligned} \quad (14)$$

Comparando-se esta expressão com a equação (1) concluímos que a constante de Verdet é dada por:

$$V = \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} \quad (15)$$

3. Equipamentos

- Eletroímã CENCO, pólos cônicos perfurados, “gap”=1,9cm (1)
- Fonte de alimentação CENCO 50 VDC, 5A (1)
- Multiteste Minipa ET-2080, 0-20A, DC (1)
- Placas Polarizadoras (2)
- Lâmpada de halogênio (1)
- Fonte de alimentação para lâmpada de halogênio (1)
- Vidro tipo Flint baixa densidade (LF) ($s=1,85$ cm) (1)
- Vidro tipo Flint extra denso (EDF) ($s=1,85$ cm) (1)

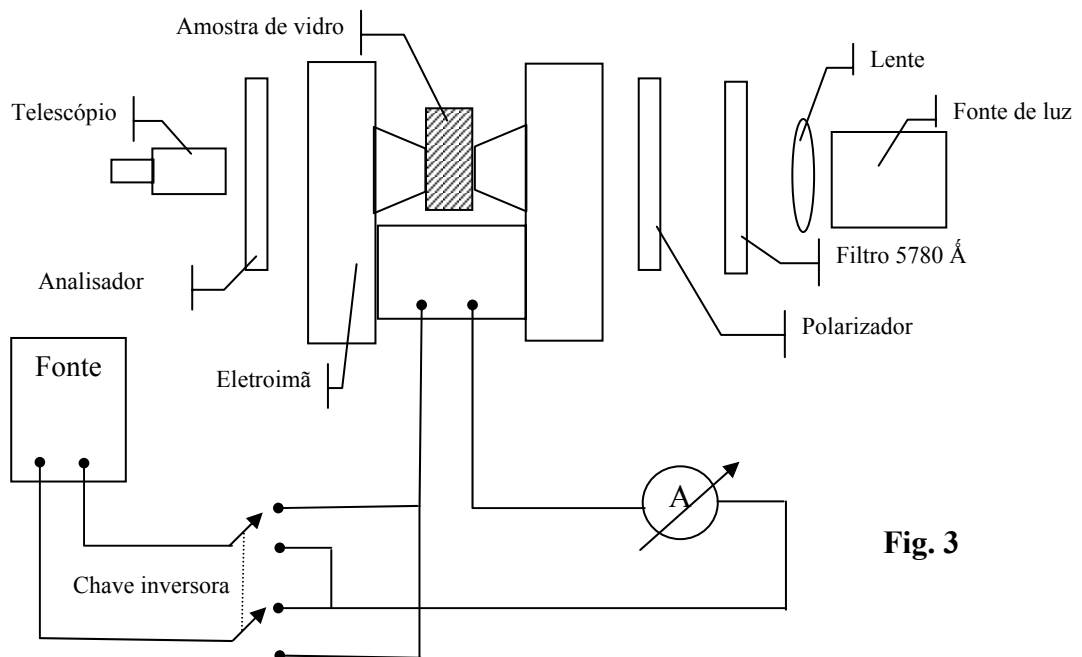


Fig. 3

4. Dados do experimento

λ (Å)	LF	EDF
3610	1,614	1,705
4340	1,594	1,675
4860	1,585	1,664
5890	1,575	1,650
6560	1,571	1,644
7680	1,567	1,638

Tabela 1 - Índices de refração para vidros Flint LF e EDF

Substância	T (° C)	V (min/G.cm)	V (rad/T.m)
Água	20	0,0131	3,8108
Vidro Flint LF	18	0,0317	9,2215
Vidro Flint EDF	18	0,0442	12,8578

Tabela 2 - Valores da Constante de Verdet de algumas substâncias para $\lambda=5893\text{Å}$ [2]

5. Medidas

Faremos aqui a medida da constante de Verdet para amostras de vidro tipo flint de baixa densidade (LF) e extra denso (EDF) usando luz de comprimento de onda $\lambda=5780\text{Å}$. O campo magnético médio no espaço entre os pólos do imã, esta indicado no gráfico da Fig. 01.

Quando o polarizador e o analisador estão cruzados³ a imagem no anteparo terá a intensidade mínima. Colocando-se a amostra do vidro entre os pólos do eletroímã e ligando-se o campo magnético nota-se que a imagem no anteparo torna-se mais brilhante. Girando-se o analisador de um ângulo θ_1 obtemos novamente intensidade mínima no anteparo. Se a direção do campo magnético é invertida, mudando-se a polaridade da corrente nas bobinas, o analisador deve ser ajustado na direção oposta (θ_2) para se obter novamente a intensidade mínima. A diferença. O valor de θ será então obtido pela relação

$$\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2} \quad (16)$$

³ As suas direções de máxima transmissão fazem 90° entre si.

Medidas para as amostras de vidro Flint.

Utilize o filtro de 5780 Å. Antes de colocar a amostra entre os pólos do imã gire o analisador para obter a intensidade mínima no anteparo.

Coloque a amostra de vidro LF entre os pólos do eletroímã. Meça os deslocamentos angulares θ_1 e θ_2 para valores da corrente do eletroímã entre 0,2 A e 1,4 A em intervalos de 0,2 A. Note que há uma magnetização remanescente no eletroímã quando a corrente é igual a zero.

Repita o procedimento acima para a amostra de vidro EDF.

Os valores do campo magnético para cada valor da corrente pode ser obtido no gráfico $B(mT) \times I(A)$, afixado no laboratório.

Não esqueça de anotar a espessura da amostra de vidro.

6. Sugestões para o tratamento dos dados e relatório

Organize para cada amostra uma tabela onde deve constar corrente: I (A), campo magnético B (Gauss), θ_1 , θ_2 , θ .

Para cada amostra trace o gráfico de θ versus o campo magnético B (Tesla). Determine então o valor da constante de Verdet V para cada amostra.

O valor da constante de Verdet pode também ser calculada a partir da derivada do índice de refração com respeito ao comprimento de onda e da formula empírica de Cauchy⁴ para o índice de refração de materiais.

$$n = C_1 + C_2 \frac{1}{\lambda^2} + C_3 \frac{1}{\lambda^4} + \dots \quad (17)$$

As constantes C_1, C_2, C_3 são determinadas ajustando-se a curva a valores conhecidos de $n(\lambda)$, A constante de Verdet é obtida substituindo os valores de λ_m e $dn/d\lambda|_{\lambda_m}$ na expressão (15).

Utilizando os valores de $n(\lambda)$ constantes na Tabela 1 e a expressão (17) com apenas dois termos (C_1, C_2) faça uma estimativa teórica do valor da constante de Verdet para os vidros utilizados e compare-os com as suas determinações efetuadas no experimento e aqueles constantes na Tabela 2.

⁴ Augustin Louis Cauchy (1789-1857), matemático francês que deu significativas contribuições ao cálculo, análise complexa e física matemática.

7. Bibliografia

- [1] Pedrotti, F. L., Bandettini, P. Am. J. Phys. **58** (6), 542-545 (1990)
- [2] CENCO. *Faraday Effect Attachements*, Manual do kit Cenco N° 79646
- [3] Pinheiro, F. Sampaio, L. C. *Introdução à Magneto-Ótica – Uma Abordagem Microscópica*, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, RJ. Publicação Interna. Internet: www.cbpf.br/~labmag/faraday.pdf
- [4] CRC Handbook of Physics and Chemistry 51st, Ed. Robert C. Weast, Ohio: The Chemical Rubber Co. (1971)
- [5] Smithsonian Physical Tables, (9th revised edition), <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=736>