

## **Práctica 5. Polarización de ondas electromagnéticas planas**

### **1.- OBJETIVOS**

- Estudiar las características de la luz polarizada, comprobar experimentalmente las leyes de Brewster y Malus.
- Como aplicación, comprobar la ley de Biot.

### **2.- MATERIAL**

- Filtros polarizador y analizador con soporte.
- Cubeta de vidrio con soporte.
- Espejo, vidrio.
- Láser.
- Fuente de luz blanca.
- Pantalla.

### **3.- FUNDAMENTO TEÓRICO**

La luz es una onda electromagnética transversal, es decir, la vibración (los campos eléctrico y magnético) es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Consideraremos en lo sucesivo el campo eléctrico. Si una onda luminosa que se propaga en la dirección  $z$  no está polarizada, el campo eléctrico puede tener cualquier dirección contenida en el plano perpendicular al eje  $z$ . Pero si la dirección del vector campo es siempre paralela a una línea fija del espacio, se dice que la onda está polarizada linealmente (ver figura 1,  $E$  siempre tiene dirección  $y$ ).

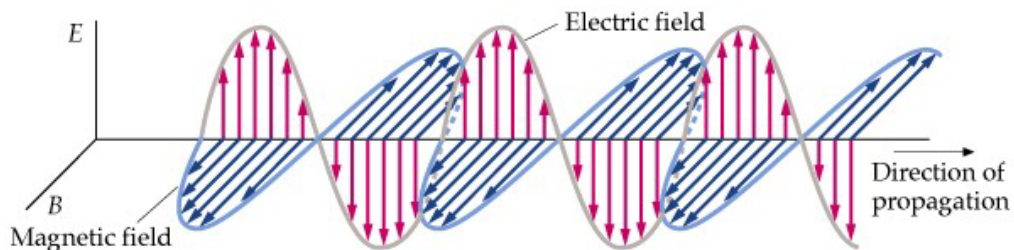


Figura 1

Se puede obtener luz polarizada a partir de una luz no polarizada debido a alguno de estos cuatro fenómenos: absorción, dispersión, reflexión o birrefringencia. En este contexto nos interesa aclarar el fundamento de dos de ellos.

a) *Polarización por absorción*

Existen materiales denominados *polarizadores* (algunos cristales, las láminas Polaroid...) que no absorben la energía luminosa cuando el vector campo eléctrico incide sobre ellos en una determinada dirección, pero que si la absorben para otras direcciones. La dirección para la que el material no absorbe luz se denomina *eje de transmisión* del polarizador. En la práctica se estudia la polarización haciendo pasar la luz a través de dos polarizadores (el segundo se denomina *analizador*) cuyos ejes de transmisión forman entre sí un ángulo  $\theta$ , según el montaje de la figura 2.

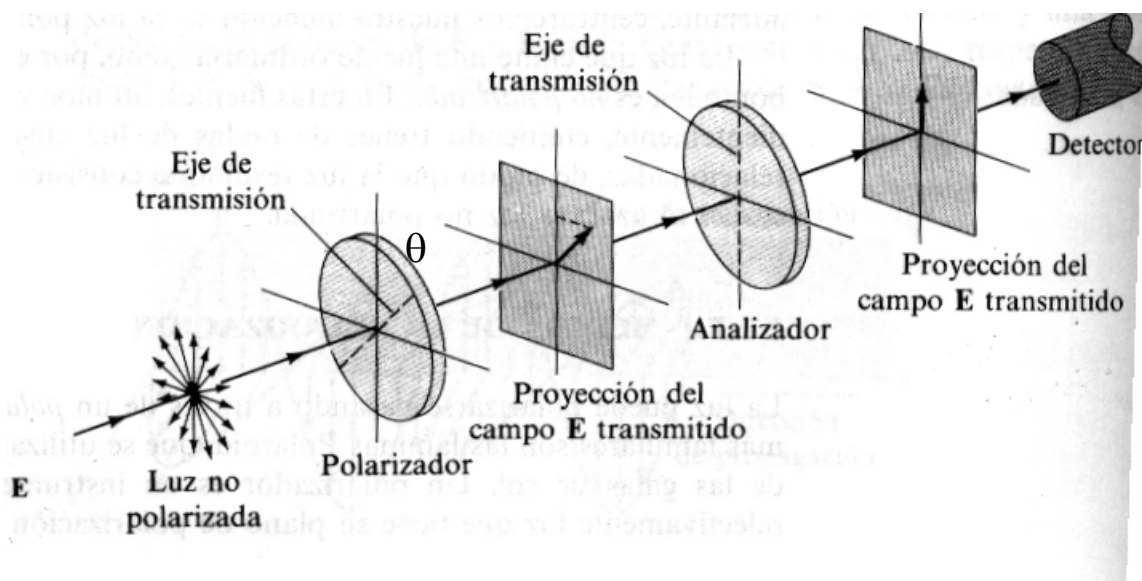


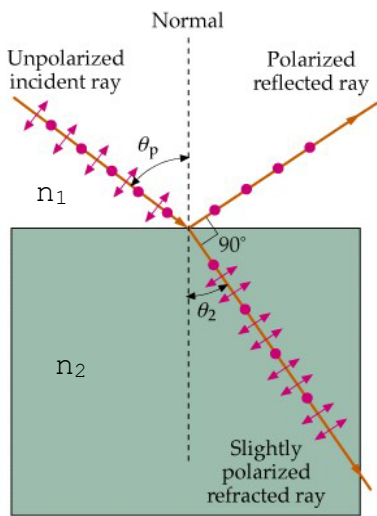
Figura 2

La intensidad  $I$  de la luz transmitida (proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico) obedece la *ley de Malus*:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

b) *Polarización por reflexión*

La luz reflejada en una superficie plana que separa dos medios transparentes está parcialmente polarizada, y el grado de polarización depende del ángulo de incidencia y de los índices de refracción de ambos medios. Como se indica en la figura 3, la luz reflejada está completamente polarizada cuando el ángulo de incidencia ( $\theta_p$ ) es tal que los rayos reflejado y refractado son perpendiculares entre sí. La luz reflejada con ángulo  $\theta_p$ , denominado ángulo de polarización o ángulo de Brewster, está totalmente polarizada en un plano perpendicular



al plano de incidencia.

En la figura 3 el plano de incidencia es el del dibujo, y la dirección de polarización del rayo reflejado es perpendicular al plano del dibujo. La luz reflejada está totalmente polarizada, cumpliéndose la *ley de Brewster*:

$$\text{tg } \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \tag{2}$$

siendo  $n_1$  y  $n_2$  los índices de refracción de los medios 1 y 2, respectivamente.

Figura 3

### ACTIVIDAD ÓPTICA

Se denominan sustancias ópticamente activas a aquellas que producen un giro en el plano de polarización de la luz polarizada linealmente que pasa a su través. Serán dextrógiras si, mirando hacia la fuente luminosa, el giro se produce en el sentido de las agujas del reloj, y levógiras en caso contrario. El ángulo girado por el plano de vibración es proporcional al espesor de sustancia atravesado y depende de la longitud de onda de la luz. En general se considera como referencia la raya amarilla D del sodio.

Un ejemplo de sustancia ópticamente activa es una disolución de sacarosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ , constituyente principal del azúcar). Cuando la sustancia ópticamente activa es una disolución, el ángulo  $\alpha$  girado por el plano de vibración es proporcional al espesor atravesado  $l$  (en dm) y a la concentración  $c$  (en  $gr/cm^3$ ) de la disolución, obedeciendo la *ley de Biot*:

$$\alpha = [\alpha] \cdot l \cdot c \tag{3}$$

donde  $[\alpha]$  depende de la sustancia empleada y de la longitud de onda de la luz que la atraviesa (depende muy poco de la temperatura y la concentración) y se denomina *rotación específica* o *poder rotatorio*. Para una disolución de sacarosa y la raya D del sodio,  $[\alpha] = 66'4^\circ \text{ dm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3$ .

La ley de Biot permite calcular a partir de medidas experimentales la concentración de una disolución. Constituye un importante procedimiento para determinar, por ejemplo, la cantidad de azúcar contenido en la orina.

#### 4.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En esta experiencia se estudiará el comportamiento de la luz a partir de una luz polarizada. La luz blanca, o el láser utilizado en el laboratorio no están polarizados. Un polarizador (P) realizará esta operación. Con un analizador (A) se puede determinar la dirección de polarización.

##### I.- Determinación de los ejes de transmisión. Ley de Brewster.

La luz que sale de un láser prácticamente no está polarizada (la dirección de los vectores campo eléctrico es variable y aleatoria). Por reflexión en una interfase la luz se polariza parcialmente, para un ángulo de incidencia cualquiera. Si el ángulo de incidencia es  $\theta_p$ , la luz reflejada está totalmente polarizada: la polarización es rectilínea y la dirección de vibración del campo eléctrico es paralela al plano del espejo (recordar figura 3).

- Preparar el montaje de la figura 4. Calcular aproximadamente el valor de  $\theta_p$  según (2), sabiendo que el índice de refracción del vidrio del espejo es  $n_2 = 1.5$ . Hacer incidir el láser con ángulo  $\theta_p$ : la polarización de la luz reflejada es completa.

- Girando el analizador hasta obtener la extinción sobre la pantalla, determinar la dirección del eje de transmisión del analizador.

- Una vez determinada ésta, sustituir el analizador por el polarizador y determinar del mismo modo su eje de transmisión.

- Sustituir el espejo por un vidrio de índice de refracción  $n$  y ajustar el ángulo de incidencia de la luz para que sobre la pantalla se tenga la extinción total (es decir, buscar la incidencia de Brewster). Medir dicho ángulo y calcular el índice de refracción del vidrio.

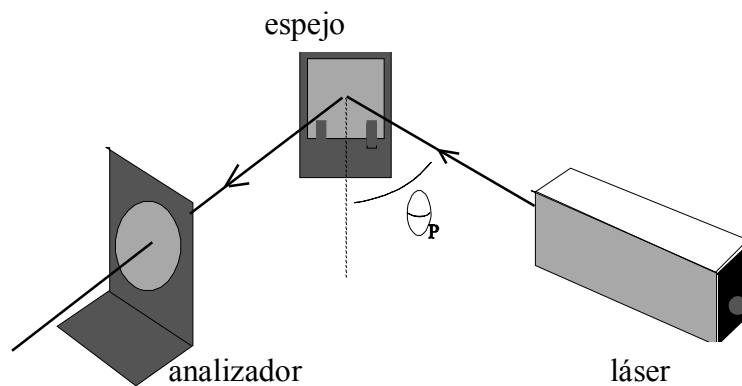


Figura 4

**Resultados:**

- 1) Cálculo de  $\theta_p$ .
- 2) Dibujar un esquema del polarizador indicando la dirección del su eje de transmisión. Dibujarlo también para el analizador.
- 3) Cálculo, con su error, del índice de refracción del vidrio.  
NOTA: ver cuestión 1.
- 4) Observar la luz natural (directa y reflejada en el vidrio o en el mar) a través del polarizador y a través de los dos polarizadores cruzados. Anotar las observaciones.

**II.- Comprobación de la ley de Malus.**

Realizar el montaje de la figura 5.

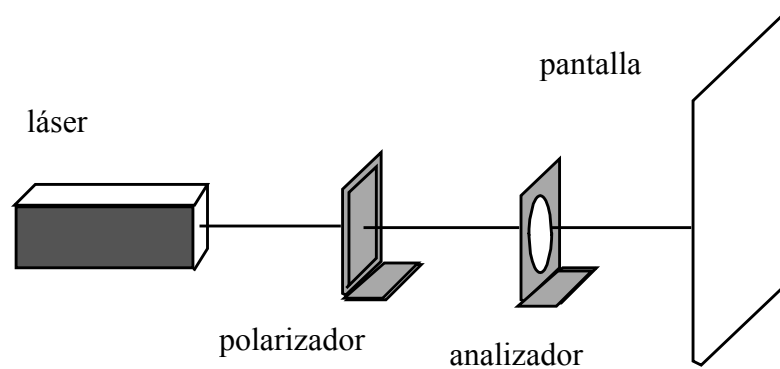


Figura 5

La intensidad luminosa que llega a la pantalla al girar el analizador varía con el ángulo  $\theta$  que forman las direcciones de polarización del polarizador y el analizador (ver figura 2) según la ley de Malus (1). Para verificar esta ley se dispone de una fotorresistencia que permite detectar los cambios en intensidad. La resistencia que medimos es inversamente proporcional a la intensidad luminosa que llega al detector. Una vez localizada la luz en la pantalla, sustituir ésta por la fotorresistencia, de manera que reciba toda la luz (puede ser necesario colocar una lente de distancia focal corta que abra el haz). Girar el analizador, comprobando que existe un máximo y un mínimo en la intensidad de luz detectada. Anotar los valores de  $R$  para distintos valores de  $\theta$ , girando el analizador de 10 en 10 grados.

**Resultados:**

- 5) Tabular las medidas de este apartado.
- 6) Representar gráficamente  $1/R$  frente a  $\theta$ .

**Nota:** normalmente el ángulo que indica el analizador no es el ángulo que forman los ejes de transmisión de los dos polarizadores, por lo que la gráfica  $I$  vs  $\theta$  será de la forma

$$I \propto \cos^2(\theta + \varphi)$$

### III.- Polarización rotatoria de un jarabe de azúcar (sacarosa).

- En primer lugar se prepara una disolución de sacarosa cuya concentración ha de ser conocida (del orden de 0.4 g/ml). Para ello pesar una cantidad de azúcar y disolverla en agua destilada. Teniendo en cuenta la cantidad de soluto pesada y el volumen total de la disolución, calcular la concentración en gr/ml.

- Ahora realizar de nuevo el montaje de la figura 5 y cruzar polarizador y analizador hasta obtener la extinción en la pantalla.

- Verter la disolución preparada en la cubeta e intercalar ésta (sobre su soporte) entre el polarizador y el analizador como se ve en la figura 6. La luz pasa ahora de nuevo y para que se vuelva a extinguir hay que girar el

analizador un cierto ángulo  $\alpha$  en el sentido de las agujas del reloj (situándonos en el lado de la pantalla). Una vez observado el fenómeno se procede a tomar una serie de medidas cuantitativas:

- Colocar la cubeta longitudinalmente, para que el haz atravesase toda su longitud. Medir ésta y anotar el ángulo girado, que se determina según se describe en el párrafo anterior.

- Girar la cubeta poniéndola perpendicularmente para que el espesor atravesado  $l$  disminuya; medir éste y el ángulo  $\alpha$ .

- Si el dispositivo experimental lo permite, repetir el proceso para unos 10 espesores distintos. En vez de la cubeta, puede disponerse un tubo vertical, como el indicado en la figura 6, y llenarlo a diferentes alturas, midiendo para cada altura la rotación del plano de polarización.

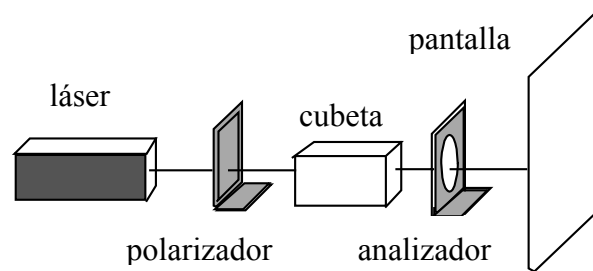


Figura 6

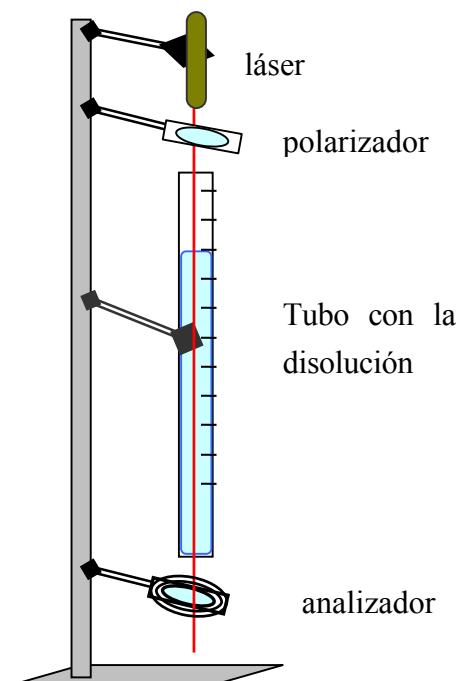


Figura 6

**Resultados:**

7) Cálculo de la concentración de la disolución.

8) Representar gráficamente  $\alpha$  frente a  $l$ . Realizar el ajuste lineal y obtener a partir de la pendiente el valor de la rotación específica para la longitud de onda utilizada.

**Nota:**  $[\alpha] = +66^\circ$  para  $\lambda = 589.3$  nm (línea amarilla del sodio), y  $c = 1$  g/ml. Existen datos tabulados para otras condiciones.

Como complemento se puede observar lo que sucede al hacer pasar luz polarizada blanca (no monocromática como en el caso anterior) por la disolución de sacarosa. Sustituir el láser por un proyector y girar el analizador para intentar producir la extinción en la pantalla. Lo que se observa realmente es una sucesión de colores, debido a que la rotación específica depende fuertemente de la longitud de onda.

**IV.- Aplicaciones.**

Otras de las posibles aplicaciones de la luz polarizada.

- Utilizando luz blanca de un proyector, si entre el polarizador y analizador se intercala un portaobjetos donde haya cristalizado azúcar o urea, los cristales, incoloros en luz natural, revelan variados colores en luz polarizada.

- En un montaje análogo a los precedentes se intercala un material plástico cualquiera, incoloro a la luz natural. Dicho material muestra, entre polarizador y analizador cruzados, colores ligados a las fuerzas mecánicas que ha recibido durante su fabricación. El fenómeno se denomina fotoelasticidad, y sirve como base de una técnica para estudiar los esfuerzos en estructuras mecánicas.

**5. CUESTIONES**

1.- En el apartado I se determina el índice de refracción de un vidrio a partir de la ley de Brewster. Si el error en la determinación del ángulo de incidencia de Brewster es de  $1^\circ$ , ¿cuál es la incertidumbre en el índice de refracción? ¿Es éste un método preciso para determinar un índice de refracción?

2.- Si luz linealmente polarizada atraviesa un espesor de  $10 \pm 1$  cm de una disolución de sacarosa y la dirección de polarización gira un ángulo de  $23'5'' \pm 0'1''$ , calcular la concentración de la disolución.

Dato:  $[\alpha] = 66'4'' \text{ dm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3$ .