

# Polarización I: polarización lineal y ángulo de Brewster.

## Versión 1.0

Héctor Cruz Ramírez<sup>1</sup>  
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM  
<sup>1</sup>hector.cruz@ciencias.unam.mx

octubre 2018

## Índice

<b>1. Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2. Teoría</b>	<b>2</b>
2.1. Ley de Malus . . . . .	3
2.2. Energía del haz reflejado . . . . .	3
<b>3. Experimento</b>	<b>5</b>
<b>4. Pormenores de la práctica</b>	<b>5</b>
<b>5. Agradecimientos</b>	<b>6</b>

## 1. Objetivos

Los objetivos de la práctica son los siguientes:

1. Implementar la Ley de Malus.
2. Mediante la implementación de que un haz de luz incida en el ángulo de Brewster, el haz de luz reflejado tiene un estado de polarización lineal (perpendicular al plano de incidencia).
3. Mediante la Ley de Malus comprobar que la luz generada del punto anterior es linealmente polarizada.

## 2. Teoría

La luz está determinada por las variaciones temporales y espaciales del campo magnético y el campo eléctrico, y que a su vez estos cumplen con las ecuaciones de Maxwell y son solución a la **ecuación de onda**[1, 2, 3]. En una primera aproximación la **luz monocromática** es representada por las **ondas planas armónicas** cuya variación temporal y espacial esta dada por  $e^{\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t}$ , donde  $\vec{k}$  es el vector de onda y  $(\vec{x}, t)$  son las coordenadas espaciales y temporales. La polarización está determinada por las variaciones espaciales y temporales del campo eléctrico asociado a la luz  $\vec{E} = \vec{E}(\vec{x}, t)$ . En la Figura (1) se muestran ejemplos de estados de polarización. Haciendo la aproximación de que  $\vec{E}$  solo tiene componentes en el plano perpendicular a  $\vec{k}$ , esto se traduce en que solo tiene componentes en  $x$  y  $y$  en el sistema de referencia de laboratorio (mesa óptica); y  $\vec{k}$  esta contenido en el plano de la mesa. Ahora bien, si fijamos la coordenada espacial  $(\vec{x}_0)$  y observamos la curva que describe  $\vec{E}$  en el tiempo tendremos que los estados de polarización estarán representados geoméricamente por estas curvas. En las Figuras (1 a y b) se muestra el estado de polarización lineal horizontal ( $\vec{E}_H$ ) y vertical ( $\vec{E}_V$ ). En las Figuras (1 c y d) se muestra el estado de polarización circular derecha ( $\vec{E}_D$ ) y izquierda ( $\vec{E}_I$ ). En las Figuras (1 e y f) se muestra el estado de polarización elíptica derecha ( $\vec{E}_D$ ) e izquierda ( $\vec{E}_I$ ). En las Figuras (1 g y h) se muestra el estado de polarización lineal antidiagonal ( $\vec{E}_A$ ) y diagonal ( $\vec{E}_D$ ). En la Figura (1 i) se representa luz no polarizada,  $\vec{E}_N$ . El hecho importante es que cualquier estado de polarización puede ser representado como una combinación lineal de la polarización lineal horizontal y vertical o de la combinación de la polarización circular derecha y izquierda y cualquiera otra combinación, esto es, si  $\vec{E}_\mu$  es cualquier combinación entonces

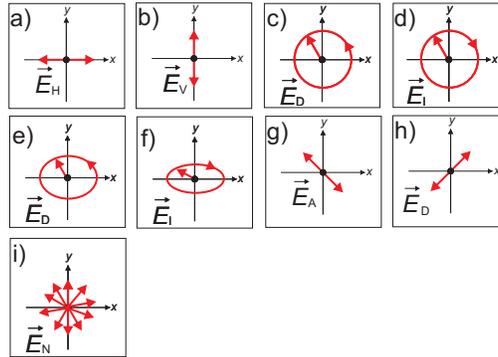


Figura 1: Estados de polarización de la luz.

$$\vec{E}_\mu = \vec{E}_V + e^{i\delta} \vec{E}_H, \quad (1)$$

donde  $\delta$  es la diferencia de fase entre la polarización lineal horizontal y vertical.

## 2.1. Ley de Malus

Todo **polarizador lineal** tiene asociado una orientación preferencial llamado **eje de polarizador**, y que representaremos por el vector  $\vec{c}$ , ver Figura (2). Ejemplos de polarizador lineal puede ser un polarizador polaroid o Glan-Thompson. Si  $\vec{E}$  tiene un estado de polarización lineal y que incide sobre un polarizador lineal, entonces el campo que se transmite es igual a su proyección sobre el eje del polarizador,  $\vec{c}$ . La proyección es proporcional a  $\cos(\theta)$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre el campo y el eje del polarizador; por lo cual, la Ley de Malus establece que la irradiancia a la salida del polarizador es igual a [1, 2, 3]

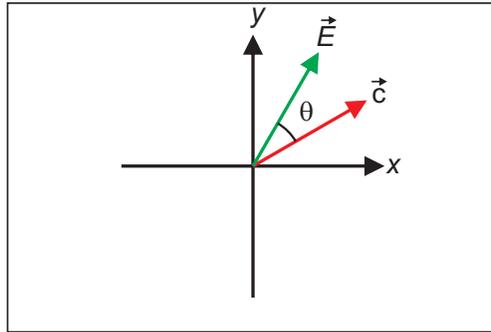


Figura 2: Esquema de la Ley de Malus.

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

## 2.2. Energía del haz reflejado

Un resultado importante es determinar que parte de la energía del haz incidente se transfiere al haz reflejado y que parte se transfiere al haz transmitido. Los coeficientes que medien tales transferencias se llaman **reflectancia**,  $R$  y **transmitancia**,  $T$ ; tal que  $R + T = 1$  [1, 2, 3]. Estos coeficientes son deducidos de los **coeficientes de Fresnel** [1, 2, 3]. Recordando que el haz incidente y el haz reflejado forman un plano, que es llamado **plano de incidencia**, tenemos que el campo eléctrico (polarización) tiene una componente paralela y perpendicular a este plano; y por lo cual, la parte de la energía que transporta es dividida en una parte paralela,  $R_{\parallel}$  y una parte perpendicular,  $R_{\perp}$ , asociados a los campos eléctricos paralelos y perpendicular. De los coeficientes de Fresnel tenemos que [1]

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}, \quad (3)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (4)$$

donde  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia y  $\theta_t$  es el ángulo transmitido. En la Figura (3) se muestra la gráfica para  $R_{\perp}$  y en la Figura (4) se muestra la gráfica para  $R_{\parallel}$ ; en ambas figuras tenemos que  $n_i = 1$  y  $n_t = 1,3$ . De la gráficas se concluye: existe un ángulo, llamado **ángulo de Brewster**, en que la componente paralela de  $R$  es igual a cero. Por lo tanto, la única componente del campo que permanece es la perpendicular. En otras palabras, en el ángulo de Brewster tenemos que el haz reflejado está linealmente polarizado y su estado es paralelo al plano de incidencia.

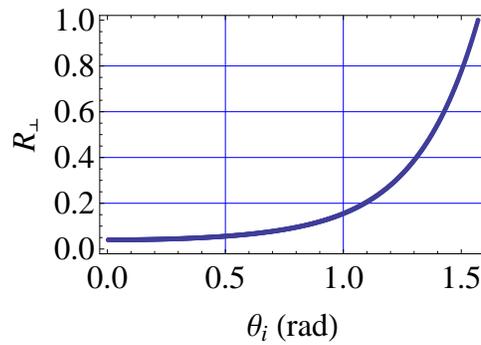


Figura 3: Componente perpendicular de la reflectancia.

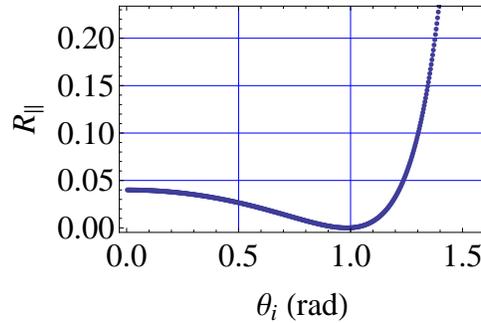


Figura 4: Componente paralela de la reflectancia.

### 3. Experimento

Este experimento se divide en cuatro partes.

1. En la primera parte es implementar la Ley de Malus mediante el arreglo experimental mostrado en la Figura (5 a); en donde se usa como fuente un láser (polarizado o no polarizado) y con el cual se determina el eje óptico con dos diafragmas. Se coloca después un polarizador lineal, P, cuyo eje se coloca arbitrariamente. Para determinar si la luz que se transmite después de P esta linealmente polarizado se coloca un segundo polarizador A, llamado analizador, de tal forma que la irradiancia medida con el detector D sigue la ley de Malus. Para esto se va rotando A un ángulo  $\theta$  respecto a la horizontal (mesa óptica) y se mide la irradiancia  $I$  para cada ángulo.
2. El siguiente paso es encontrar el ángulo de Brewster. Este experimento se basa en que si la luz incide en el ángulo de Brewster,  $\theta_B$ , se tiene que el haz reflejado y transmitido forman un ángulo recto, esto es

$$\begin{aligned}\theta_B + \theta_t &= \pi/2 \Rightarrow n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t) = n_t \sin(\pi/2 - \theta_i) = n_t \cos(\theta_i) \\ &\Rightarrow \tan(\theta_B) = \frac{n_i}{n_t}.\end{aligned}\tag{5}$$

El arreglo experimental se muestra en la Figura (5 b), en donde un haz incidente,  $\psi_i$  (láser) incide en el ángulo de Brewster sobre el cilindro de lucita con base semicircular, C; para determinar ese ángulo se debe establecer un ángulo recto entre la luz reflejada,  $\psi_r$ , y la luz transmitida,  $\psi_t$ . El alumno debe ayudarse de un goniómetro, G.

3. Dado las condiciones del punto anterior, tenemos que la luz reflejada  $\psi_r$  está linealmente polarizada. Para demostrar este hecho se coloca un polarizador lineal P como se muestra en la Figura (5 c), y se repite el experimento del primer paso. Esto es, se debe cumplir la Ley de Malus.
4. En el último experimento se deben obtener las reflectancias  $R_{\parallel}$  y  $R_{\perp}$  en función del ángulo de incidencia.  $\theta_i$ . Esto tiene la función de observar que en el ángulo de Brewster,  $\theta_B$ , se tiene que  $R_{\parallel} \approx 0$  y  $R_{\perp} \neq 0$ . El arreglo experimental es similar al mostrado en la Figura (5 c). Para cada ángulo de incidencia  $\theta_i$  se coloca el polarizador con su eje perpendicular al plano de incidencia y se mide la irradiancia  $I_{\perp}$  y después se oriente el eje del polarizador paralelo al plano de incidencia para medir  $I_{\parallel}$ . Finalmente, estas irradiancias se dividen con respecto a la irradiancia de incidencia y así se obtienen  $R_{\parallel}$  y  $R_{\perp}$ .

### 4. Pormenores de la práctica

La práctica es de dos sesiones de laboratorio.



## 5. Agradecimientos

Estas notas fueron realizadas con el apoyo del proyecto PAPIME PE107618 (versión 1). Agradecemos al estudiante Samuel Corona Aquino por su contribución a la elaboración de estas notas.

## Referencias

- [1] E. Hecht y A. Zajac, “Óptica 2da ed;” Addison-Wesley Iberoamericana, 1986.
- [2] M. Born and E. Wolf, “Principles of optics,” Cambridge University Press; 7 edition (1999).
- [3] B.D. Guenther, “Modern Optics,” Oxford University Press; 2 edition (2015).

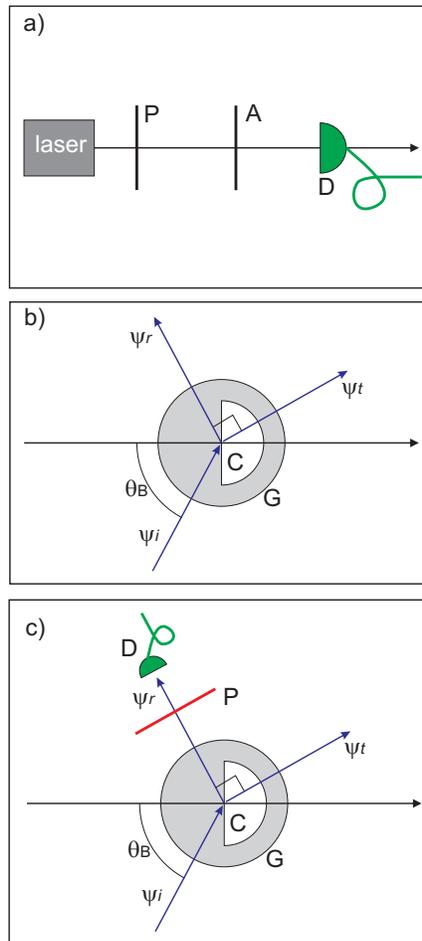


Figura 5: Arreglo experimental. la descripción se encuentra en el texto.