

Polarización, ley de Malus y el misterio de las láminas retardadoras

Objetivos

Estudiar el fenómeno de polarización de la luz. Determinar experimentalmente la intensidad lumínica transmitida a través de un polarizador (Ley de Malus)[1]. Comparar el experimento real con una simulación. Caracterizar láminas retardadoras. Analizar la polarización de un láser.

Introducción

Una onda transversal es aquella en la que la propiedad que vibra u oscila es de carácter vectorial y lo hace en una dirección *perpendicular* a la dirección de propagación. Esta onda transversal puede estar polarizada. Esto consiste en que la propiedad que vibra lo haga de un modo predecible. Si la vibración es siempre paralela a una dirección fija se tendrá polarización lineal; si el vector que describe la vibración rota a una frecuencia dada perpendicular a la dirección de propagación la onda tendrá polarización circular o elíptica[3]. Obviamente, el concepto de polarización carece de sentido para una onda escalar como lo es, por ejemplo, una onda de presión.

Polarizadores

Un ejemplo de onda mecánica transversal es el caso de una onda viajando por una cuerda: el desplazamiento o elongación es perpendicular a la dirección de propagación. Si se intercala una rejilla en algún punto de la cuerda, es claro que sólo las oscilaciones en la dirección de las rejas podrán pasar. Este dispositivo (rejilla), que sólo deja pasar las vibraciones en un solo estado de polarización, se llama polarizador.

En el presente trabajo experimental, se estudiarán las propiedades análogas a las anteriormente descritas para el caso de la luz, en la cual lo que oscila son los campos eléctrico y magnético, que tienen carácter vectorial.

Un experimento clave para poner a prueba el carácter transversal de una onda, consiste en utilizar dos polarizadores en forma consecutiva, formando un ángulo θ entre sus direcciones

de polarización (Figura 1) y medir la intensidad de la onda que se transmite como función de θ .

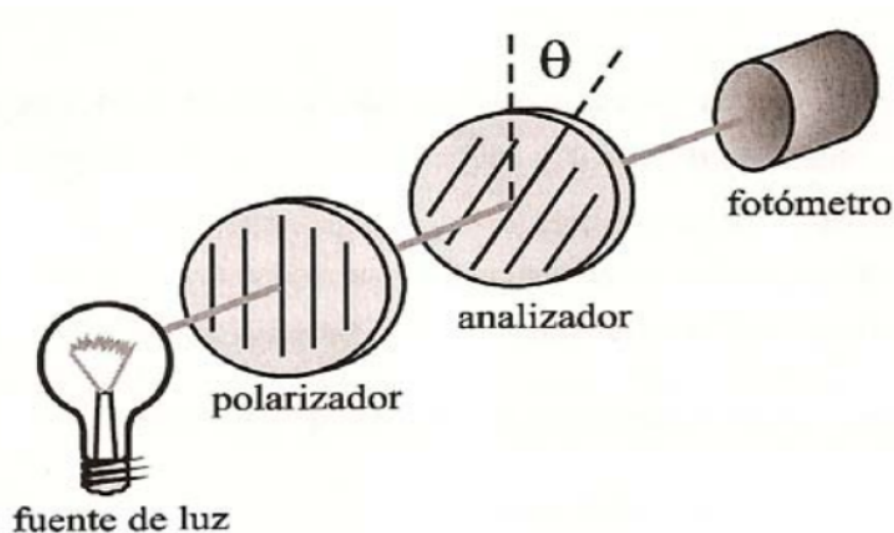


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental empleado para estudiar el fenómeno de la luz polarizada y la ley de Malus. Reproducido de [1]

El primer polarizador polariza linealmente la onda incidente mientras que el segundo polarizador se utiliza como analizador. Si la amplitud de la onda polarizada a la salida del primer polarizador la designamos como E_0 , la amplitud transmitida por el analizador será $E_0 \cos \theta$. Esto se debe a que sólo la componente del campo eléctrico en la dirección del eje de polarización del analizador será transmitida. Como la intensidad de la onda (energía por unidad de área y tiempo) es proporcional al cuadrado de la amplitud [3] tendremos que la intensidad transmitida variará con el cuadrado del $\cos \theta$, es decir

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

La relación (1) se conoce como Ley de Malus. Donde I_0 es la intensidad registrada a la salida del primer polarizador. Esta ley puede utilizarse como un ensayo para determinar en forma operacional si una onda es transversal o no.

Láminas retardadoras

Además de los polarizadores existen otros elementos que permiten modificar la polarización de la luz. Hay materiales que por su anisotropía permiten modificar la diferencia de fases entre las componentes de una onda transversal. El caso más fácil de pensar es que tenga

índices de refracción diferente para la componente que esté polarizada en una dirección (paralela) y en la dirección ortogonal (o perpendicular). Es decir, esperamos tener una respuesta diferente de la componente de la onda incidente que viaja en una dirección y la que viaja en la otra. Recuerden que los índices de refracción están relacionados con la velocidad de propagación de la onda en el medio ($n = \frac{c}{v}$). En otras palabras, una de las dos componentes viajará más rápido y la otra componente viajará más lento, de modo que al atravesar el material habrá un desfase adicional al que traían inicialmente. A estos objetos se los llama láminas retardadoras.

Se puede demostrar que el la diferencia de fase adicional debido a la lámina es:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d|n_r - n_l| \quad (2)$$

Donde n_r y n_l los índices de refracción del material en las direcciones rápida y lenta respectivamente, d es el espesor de la lámina y λ la longitud de onda de la onda incidente [5].

Dos ejemplos paradigmáticos de las láminas retardadoras son las que se conocen como lámina de media onda y lámina de cuarto de onda (las verán en los ejercicios 9 a 12 de la práctica 5).

Sin resolver las cuentas, lo dejamos para la práctica, describiremos brevemente el efecto de cada una de estas láminas sobre la polarización de la luz incidente.

Si una onda linealmente polarizada incide sobre una lámina de media onda se introduce un desfase en la componentes de la onda de modo que la luz de salida sigue estando linealmente polarizada pero el eje de polarización está rotado respecto de la onda incidente como se esquematiza en la Figura 2.

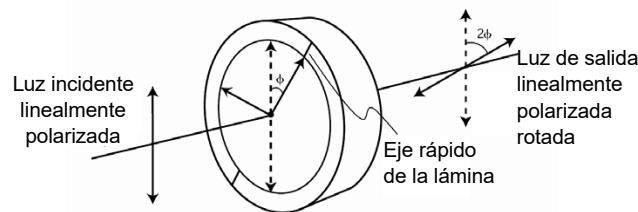


Figura 2: Esquema del efecto de una lámina de media onda sobre una onda incidente linealmente polarizada. Si el eje de la polarización incidente forma un ángulo ϕ con el eje rápido de la lámina, el eje de polarización a la salida forma una ángulo de 2ϕ con el eje de polarización inicial. Figura adaptada de [2]

Si una onda linealmente polarizada incide sobre una lámina de cuarto de onda, en este caso se introduce un desfase en ambas componentes de la onda. Si el ángulo entre la

polarización y el eje rápido de la lámina es de 45° , como se ve en la Figura 3 la onda de salida está polarizada circularmente. Si no se conoce con exactitud el eje de la lámina y se incide con otro ángulo, la polarización a la salida será elíptica.

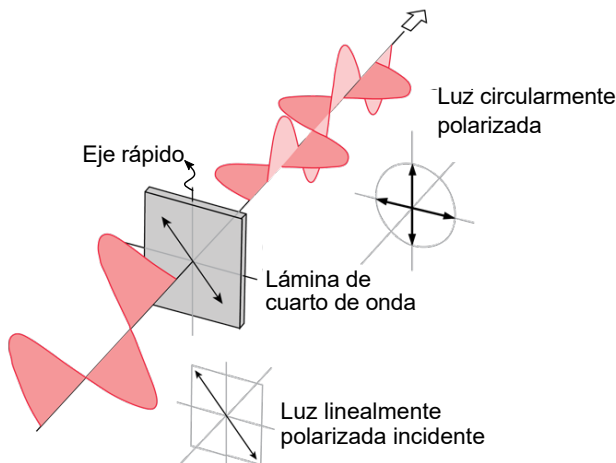


Figura 3: Esquema del efecto de una lámina de media onda sobre una onda incidente linealmente polarizada. Si el eje de la polarización incidente forma un ángulo de 45° con el eje rápido de la lámina, la polarización a la salida es circular. Figura adaptada de [4]

Actividades

Ley de Malus

Construya un dispositivo similar al de la Figura 1. Como fuente utilice en primera instancia un láser, preste atención a que ni el haz ni sus reflexiones puedan dar en los ojos de las personas que participan en el experimento. El primer polarizador (más cercano a la fuente) se denomina simplemente polarizador y el más alejado se denomina analizador. La función del primer polarizador es definir un estado de polarización lineal en la luz que transmite al analizador. Uno de los dos polarizadores debe tener un goniómetro para medir su posición angular, θ , relativa a la dirección de transmisión del otro. Debe cuidarse de que exista una buena alineación de todos estos elementos.

Ayudas:

- Rotar el polarizador (o el analizador) hasta observar que la intensidad transmitida, $I(\theta)$, sea máxima (máxima respuesta del fotómetro). Tomar este ángulo como origen para medir el ángulo entre ellos, $\theta = 0^\circ$.

- Verificar que $I(180^\circ) \approx I(0^\circ)$. Si se observa una asimetría significativa revise el dispositivo; por ejemplo, viendo la alineación de los elementos, si no hay fuentes de luz espurias, etc.

Grafique, utilizando pasos de como mucho 15°

- a) $I(\theta)$ vs. θ
- b) $I(\theta)$ vs. $\cos \theta$
- c) $I(\theta)$ vs. $\cos^2 \theta$

Discuta, a partir estos gráficos, si se obedece la ley de Malus.

Láminas retardadoras: Misterio

En el laboratorio, después de mucho buscar encontramos una caja con láminas retardadoras. Lamentablemente, o no, estas no están rotuladas. Necesitamos que tomen al menos dos e intenten descubrir si son lámina de media onda, de un cuarto de onda.

Para lograrlo de nuevo utilizarán el dispositivo que usaron en para la ley de Malus con el láser, intercalando la lámina a caracterizar. Piense en dónde la colocaría.

Al estudiar la intensidad variando el ángulo del polarizador que denominamos analizador podrá en principio descubrir que tipo de lámina es. Por ejemplo si la lámina es de un cuarto de onda y el ángulo de incidencia es de 45° y la luz sale circularmente polarizada la intensidad que reciba el fotómetro no debería variar al cambiar el ángulo. ¿Qué sucederá si la luz está elípticamente polarizada? ¿Qué sucederá si la lámina es de media onda? Observe las Figuras 2 y 3.

Ley de Malus: la venganza

Ahora utilice el simulador que se encuentra en <https://www.uv.es/indoptic/applets/Malus/index.html> para simular el primer experimento que realizaron, ver Figura 4.

Realice nuevamente los gráficos de la primera actividad, compare los resultados experimentales con los simulados. Comente sobre las similitudes y diferencias. ¿Qué se puede aprender en uno y no en otro? ¿Qué se puede aprender en ambos?

Caracterizando el láser

Los láseres pueden emitir luz polarizada linealmente. Analice si el láser que utilizamos emite luz polarizada linealmente o no.

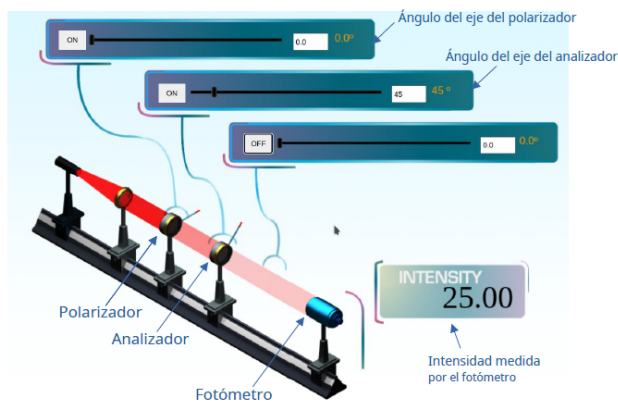


Figura 4: Captura de pantalla del simulador para estudiar la ley de Malus.

Ley de Malus: el regreso

Si queda tiempo, seguramente lo tendrán, cambie la fuente de láser por un led blanco e intente realizar nuevamente la experiencia de la primera actividad.

Referencias

- [1] Gil, Salvador and Rodriguez, Esteban. Física re-creativa, Prentice Hall Buenos Aires, 2001
- [2] Irsch, Kristina Polarization modulation using wave plates to enhance foveal fixation detection in retinal birefringence scanning for pediatric vision screening purposes, 2008
- [3] E. Hecht Óptica Addison Wesley, 1998
- [4] Nave, Carl Rod. HyperPhysics. 2000. 22 May 2022 <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>.
- [5] Laura Estrada, Actividades Semana #11 Polarización y Láminas, Buenos Aires, 2022
Material recopilado de guías de trabajos prácticos de los laboratorio básicos de alumnos del Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.