

Ley de Snell, polarización, ley de Malus y el misterio de las láminas retardadoras

Objetivos

Estudiar el fenómeno de reflexión y refracción de la luz. Determinar experimentalmente las leyes de refracción y reflexión [1]. 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. Comparar los experimentos reales con experimentos simulados.

Introducción: Reflexión y Refracción

Cuando un haz de luz incide sobre la superficie que separa dos medios en los cuales la luz se propaga con diferentes velocidades, parte de la misma se transmite y parte se refleja. Para un medio cualquiera, el índice de refracción n se define como

$$n = \frac{c}{V} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y V la velocidad de la luz en ese medio.

La idea de esta parte del trabajo práctico es estudiar experimentalmente la relación entre los haces incidente, reflejado y refractados. Para estos investigaremos la relación entre el ángulo de reflexión, θ_{rj} , y el ángulo de refracción, θ_{rf} , en función del ángulo de incidencia, θ_i , todos ellos definidos respecto de la línea normal de la superficie de separación entre los dos medios, como se muestra en la Figura 1

La ley de reflexión establece que

$$\theta_i = \theta_{rj} \quad (2)$$

mientras que la ley de refracción o también conocida como ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia y refracción de la siguiente forma

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_{rf} \quad (3)$$

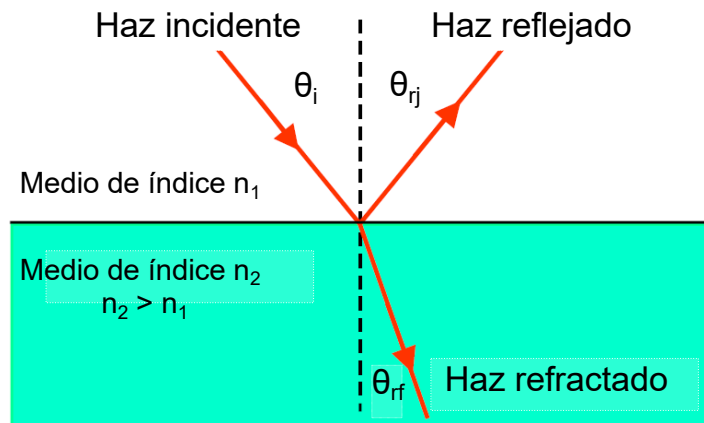


Figura 1: Esquema de la reflexión y refracción de un haz de luz que incide sobre una superficie que separa dos medios con índices de refracción diferentes

1. Actividades

Refracción y reflexión: La venganza de los alfileres

Para la realización de este experimento se sugiere usar el dispositivo indicado esquemáticamente en la Figura 2. Tomamos el punto O como origen de coordenadas. Elegimos el eje x coincidiendo con la cara plana del mismo y tomamos la normal a dicha cara como el eje y, respecto del cual medimos los ángulos. El semicilindro se apoya sobre una superficie plana, sobre la que colocamos un papel milimetrado o un papel con una impresión de un transportador para determinar las coordenadas o el ángulo de cada punto.

Un modo simple de determinar la dirección de los rayos de luz consiste en usar tres alfileres, uno de los cuales se mantiene fijo en el centro O: Para determinar la dirección de los rayos incidentes y refractados, se coloca un alfiler en la posición A, cuyas coordenadas son (x,y) , otro en O (centro del semicilindro, justamente fuera del mismo) y el tercero en la posición C, cuyas coordenadas son (x',y') . La posición de este último alfiler se elige de modo tal que al observar horizontalmente los tres alfileres todos aparezcan alineados. Para facilitar el posicionamiento de los alfileres, puede colocarse el semicilindro encima de una tabla blanda, corcho o cartón blando, que permitan la penetración de alfileres fácilmente.

Refracción: Para realizar el experimento, es importante mantener fijo el alfiler del centro de semicilindro (O). El alfiler en la posición A define el ángulo de incidencia. Mirando desde el **lado curvo** del semicilindro, se procede a colocar el tercer alfiler en la posición C de modo de ver a los **tres alfileres** alineados (A, O y C). Cuando se haya logrado tal alineación, se registran los valores de las coordenadas (x,y) y (x',y') o ángulos. Es conveniente repetir este

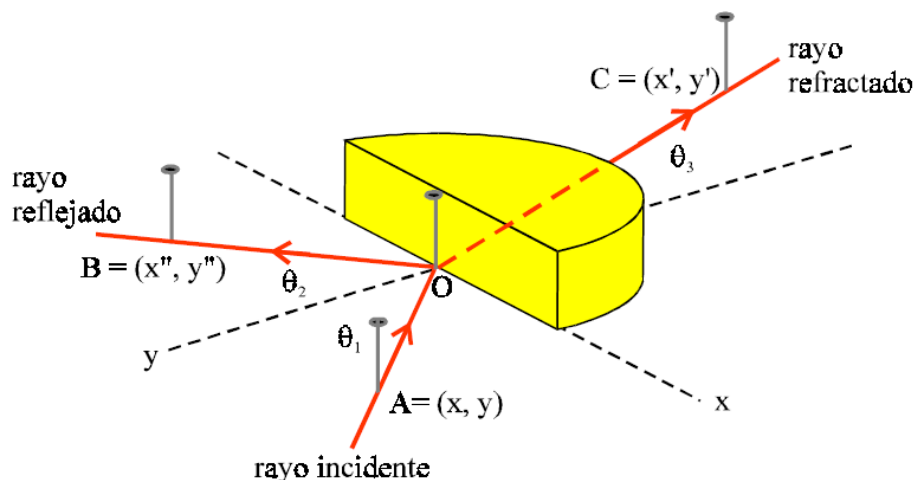


Figura 2: Esquema del dispositivo experimental empleado para estudiar la refracción y la reflexión de la luz. Reproducido de [1]

último experimento de modo que el ángulo de incidencia θ_1 varía desde 0° hasta 80° en pasos de aproximadamente 10° y registrar el ángulo refractado θ_3 .

Reflexión: Mirando desde ahora del lado plano del semicilindro, se procede a colocar el cuarto alfiler en la posición B de modo de ver nuevamente **tres alfileres** alineados (A, O y B). Para la reflexión este método es un poco más difícil. Es conveniente repetir este último experimento de modo que el ángulo de incidencia θ_1 varía desde 0° hasta 80° en pasos de aproximadamente 10° y registrar el ángulo reflejado θ_2 .

Refracción y reflexión: Láser y alfileres

Ahora estudiemos la refracción y reflexión de la luz con el mismo dispositivo experimental anterior pero usando un láser que nos provea el haz de luz incidente.

Coloque el láser de modo que el haz incida con cierto ángulo en la cara plana del semicilindro. Con un alfiler busque donde puede ubicar el rayo **refractado**, es decir mueva un alfiler en la zona que da al lado curvo del semicilindro hasta que vea que el haz impacta sobre el alfiler y fije la posición del mismo de modo de poder medir el ángulo refractado. Proceda del mismo modo en la zona donde supone que debe estar el rayo **reflejado** frente a la cara plana del semicilindro y así poder determinar el ángulo reflejado. Por último con un tercer alfiler detecte el ángulo de incidencia. Repita para al menos ocho ángulo de incidencia.

Para ambas actividades Represente gráficamente θ_3 en función de θ_1 y θ_2 en función θ_1 . También represente $\sin \theta_3$ en función de $\sin \theta_1$. Analice las distintas dependencias y discuta

ventajas y diferencias entre los métodos

1.1. Reflexión total interna

Investigue el fenómeno de reflexión total interna. Para ello haga incidir un láser por el lado la superficie curva de la Figura 2 y que pase por el punto O (dirección radial). La luz llegará a la cara plana del semicilindro radialmente desde un medio que tiene índice de refracción mayor a otro de índice menor, el del aire. Observe la transmisión de la luz del semicilindro al aire mientras va cambiando el ángulo θ_3 de incidencia de la luz sobre la interfase acrílico–aire. ¿Encuentra algún ángulo para el cual la luz deja de transmitirse al aire? Si encuentra dicha condición, esto significa que para dicha incidencia, la reflexión es total en la superficie plana interna del semicilindro. *Sugerencias*

- Usando el puntero láser, estime en forma directa el valor del ángulo crítico (o límite) θ_{crit} , para el cual deja de existir el rayo transmitido.
- Otro modo de determinar el valor de θ_{crit} consiste en representar gráficamente $\sin \theta_3$ en función de $\sin \theta_1$. A partir de la recta que mejor ajusta los datos experimentales, determine el valor de θ_3 para el cual $\sin \theta_1 = 1$. En ese caso $\theta_3 = \theta_{crit}$
- Antes de llegar a θ_{crit} la refracción es tal que el rayo transmitido es casi paralelo a la cara plana del simicirculo

Experimento virtual

Estudie ahora “experimentalmente” la relación entre los haces incidente, reflejado y transmitido utilizando un simulador e interprete los resultados con lo aprendido en la guía 4. El link al simulador es https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bendinglight_en.html

El funcionamiento del simulador es bastante sencillo, permite cambiar el ángulo de incidencia y ver como varían los ángulos y la intensidad de los rayos reflejado y transmitido. El simulador permite el uso de un transportador para medir los ángulos. Realice actividades similares a las actividades que hizo en la realidad. Note que en este caso puede controlar los índices de refracción de los medios.

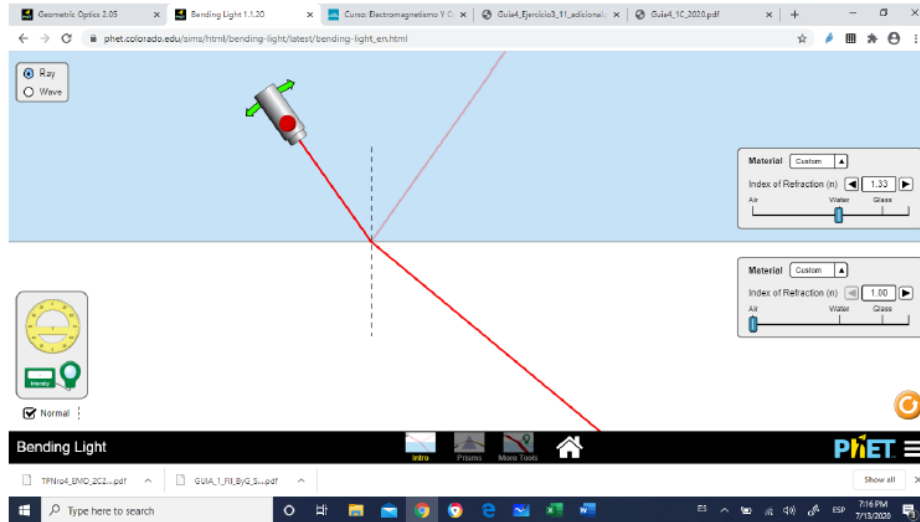


Fig. 1: Interface del simulador.

Figura 3: Esquema del dispositivo experimental empleado para estudiar la refracción y la reflexión de la luz mediante una simulación

Introducción Ondas

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 rejillas 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 4) y medir la intensidad de la onda que se transmite como función de θ .

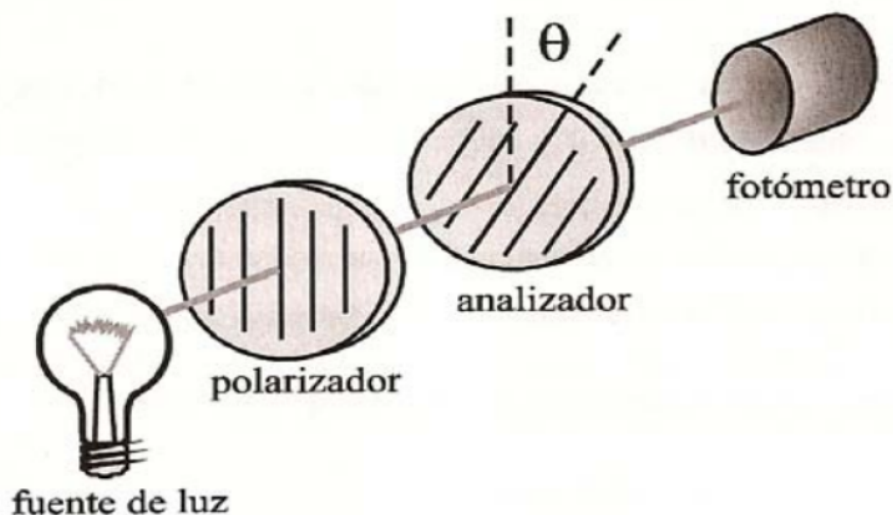


Figura 4: Esquema del dispositivo experimental empleado para estudiar el fenómeno de la luz polarizada y la ley de Malus. Reproducido de [1]

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

$$I = I_0 \cos^2 \theta \tag{4}$$

La relación (4) 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:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d|n_r - n_l| \quad (5)$$

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.

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

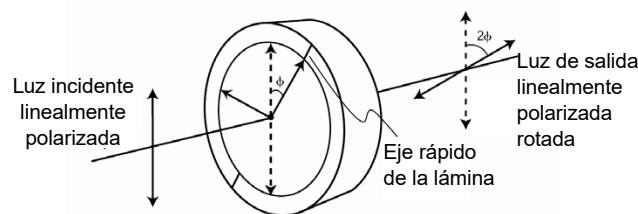


Figura 5: Esquema del efecto de una lámina de media onda sobre una onda incidente linealmente polarizada. Si el eje de la polarización incidente forma un ángulo ϕ con el eje rápido de la lámina, el eje de polarización a la salida forma un ángulo de 2ϕ con el eje de polarización inicial. Figura adaptada de [2]

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 5.

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 6 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.

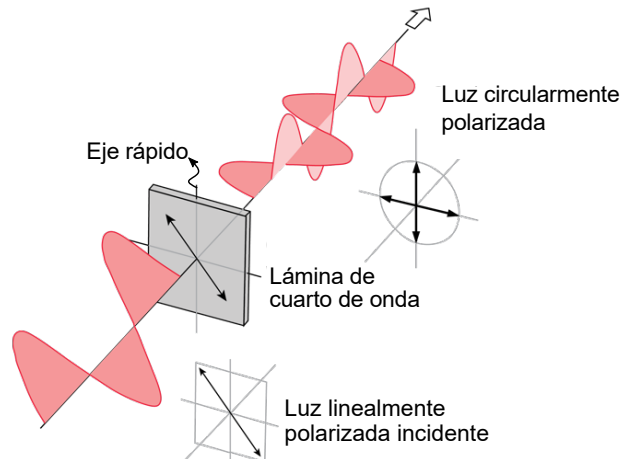


Figura 6: Esquema del efecto de una lámina de media onda sobre una onda incidente linealmente polarizada. Si el eje de la polarización incidente forma un ángulo de 45° con el eje rápido de la lámina, la polarización a la salida es circular. Figura adaptada de [4]

Actividades

Ley de Malus

Construya un dispositivo similar al de la Figura 4 . 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 5 y 6.

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 7.

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?



Figura 7: Captura de pantalla del simulador para estudiar la ley de Malus.

Caracterizando el láser

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

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.