

Fenómenos de reflexión y refracción en una interfaz

Objetivos

El objetivo general del laboratorio es estudiar los fenómenos de refracción y reflexión en una interfaz de dos medios, desde un punto de vista de la óptica de rayos y electromagnética. A continuación se detallan los objetivos específicos:

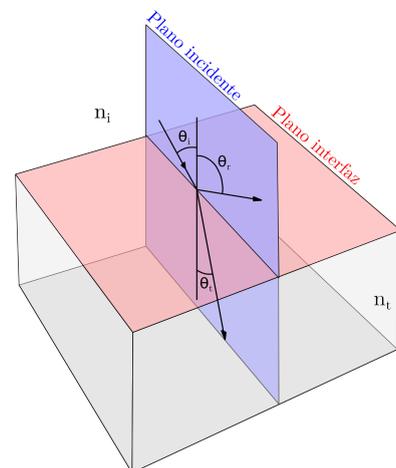
- Observar fenómenos de óptica geométrica: se utilizará la ley de Snell para calcular índice de refracción y ángulo de reflexión total interna.
- Observar fenómenos electromagnéticos: se utilizará la ley de Snell y las ecuaciones de Fresnel para calcular el ángulo de polarización, y se observará de forma cualitativo la reflectancia y transmitancia.

Marco teórico

Entre el siglo XVI y XVII varios inventos y descubrimientos revolucionaron la óptica y astronomía. Uno de los más importantes es la **ley de Snell** (también llamada ley de Snell-Descartes), la cual relaciona el ángulo de incidencia y refracción de la luz cuando atraviesa una superficie que separa dos medios con distinto índice de refracción. Esta formulación dio inicio a la óptica aplicada moderna. El nombre deviene del astrónomo y matemático holandés Willebrord Snel van Royen (1580-1626), quien en 1621 observó empíricamente el fenómeno y formuló la relación conocida en la actualidad. René Descartes (1596-1650) fue el primero en publicar la formulación ahora familiar en términos de senos en *La Dioptrique* (1637). Sin embargo, varios científicos habían trabajado anteriormente con esa formulación: Ibn Sahl (940–1000) en el siglo X y Thomas Harriot (1560-1621) en 1601.

La ley de Snell supone que los haces de luz se propagan siguiendo trayectorias en forma de rayos, y en consecuencia forma parte de los modelos considerados pertenecientes a la **óptica geométrica**. En esta representación, un rayo de luz se esquematiza como una línea y la interfaz entre dos medios distintos, por ella atravesados, como una superficie que puede ser identificada por medio de su vector normal. En este sentido se definen dos planos, el plano incidente es el plano que contiene todos los rayos: incidente, reflejado, refractado y el vector normal. El plano interfaz resulta perpendicular al plano incidente. En la figura se muestra una representación de los rayos y los planos.

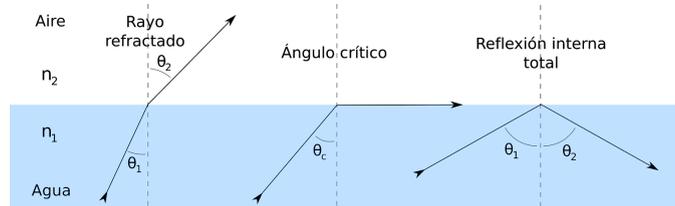
A partir de esta notación, la *ley de Snell* es:



$$n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t),$$

donde n_i es el índice de refracción del medio incidente, n_t es el índice de refracción del medio transmitido, θ_i es el ángulo del rayo incidente y θ_t es el ángulo del rayo transmitido. Estos ángulos deben medirse a partir de la normal a la superficie. El significado físico del índice de refracción está referido a un cociente entre la velocidad del haz en el vacío y la velocidad del haz en el medio. Una discusión más profunda de esta magnitud, excede el marco de la **óptica geométrica**, y pertenece al ámbito de la **óptica física**.

Un caso particular es el efecto conocido como **reflexión total interna**. Este fenómeno solo se produce para ángulos de incidencia superiores a un cierto valor crítico θ_c . Para ángulos mayores la luz deja de atravesar la superficie y es reflejada internamente de manera total. La reflexión interna total solamente ocurre en rayos viajando de un medio



de alto índice refractivo hacia medios de menor índice de refracción ($n_t > n_i$). El ángulo crítico se obtiene a partir de la ley de Snell, despejando el ángulo incidente e igualando el ángulo transmitido a cero. Está dado por la siguiente expresión:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_t}{n_i}\right).$$

Si bien esta teoría explica muchos de los fenómenos ópticos cotidianos, la comunidad científica se encontró con efectos que no podían ser explicados bajo estos preceptos, como por ejemplo patrones de interferencia coloreados. La resolución la propuso Robert Hooke (1635-1703), quien fue el primero que propuso la idea de que la luz correspondía a un movimiento vibratorio rápido del medio propagándose. Sin embargo, como es repetido a lo largo de la historia de la humanidad, esta teoría tenía críticos y adeptos. Entre los científicos más pujantes de esta nueva teoría se puede mencionar a Christiaan Huygens (1629-1695), Thomas Young (1773-1829) y Augustin Jean Fresnel (1778-1827), entre otros. En particular, uno de los aportes más importantes es la descripción mecánica de las oscilaciones realizada por Fresnel en el año 1825, la cual demostró que la ley de Snell es un caso particular de esta.

Las conocidas ecuaciones de Fresnel son un conjunto de relaciones matemáticas que relacionan las amplitudes de las ondas reflejadas y refractadas (o transmitidas) en función de la amplitud de la onda incidente. Estas permiten obtener un coeficiente llamado de reflexión que vincula el campo incidente con el reflejado. Las gráficas obtenidas toman diferentes valores según sea la polarización perpendicular o paralela al plano de incidencia. El coeficiente se puede calcular en función de los índices de refracción de las sustancias que componen la interfaz. Los gráficas muestran que la representación del coeficiente versus el ángulo de incidencia presenta un mínimo para el caso de polarización paralela (ángulo de Brewster). En el caso en que se pasa de un medio de mayor índice a otro menor ($n_1 > n_2$), conforme se va aumentando el ángulo de incidencia, ocurre un máximo para ambas representaciones, para el mismo ángulo. Este es conocido como ángulo crítico y físicamente corresponde a la reflexión total interna, es decir, la onda no se transmite. Estas observaciones son válidas si la permeabilidad μ , es igual a la permeabilidad del vacío μ_0 , en ambos medios. La suma de los cuadrados de los coeficientes de reflexión y transmisión es

la unidad. Como resultado de interpretar las ecuaciones de Fresnel se deduce que este ángulo ocurre cuando se incide con un haz de luz con polarización paralela sobre una superficie y el campo reflejado es nulo.

La reflectividad mide la relación entre la amplitud del campo reflejado electromagnético respecto a la amplitud del campo incidente, mientras que la reflectancia se refiere a la relación entre la potencia electromagnética incidente con respecto a la potencia que es reflejada en una interfase. Por lo tanto la magnitud de la reflectancia es el cuadrado de la magnitud de la reflectividad. La reflectividad puede expresarse como un número complejo como queda demostrado por las ecuaciones de Fresnel para una capa simple, mientras que la reflectancia es siempre un número real positivo.

Materiales

En este ítem podemos enumerar algunos dispositivos diseñados e implementados con una impresora 3D y otros comerciales.



Entre ellos podemos mencionar:

- Banco en forma de plato montado sobre un eje que permite desplazamientos angulares azimutales (goniómetro) provisto con una escala graduada en grados sexagesimales de resolución 1°
- Soporte para láser tipo puntero.
- Semidisco de radio 4 cm y espesor 7 mm de material acrílico.
- Pantalla adherida al plato para observar los haces reflejados y refractados.
- Puntero láser de longitud de onda 532 nm y potencia de salida 50 mW (dispositivo comercial).
- Lámina polarizada polaroid (dispositivo comercial).

Procedimientos

A continuación se detallan los pasos a seguir para la alineación del experimento. Lo primero que se debe realizar es posicionar correctamente el semidisco en referencia al goniómetro, a saber, colocar la pieza de acrílico en el banco de forma tal que el centro de la circunferencia coincida con el eje de giro del banco. En particular, es conveniente que la

parte plana del semidisco concuerde con la línea de 90° del goniómetro y además que sea normal a la línea de 0° del goniómetro. Luego, montar el soporte del láser en la base del banco giratorio y fijar el puntero láser en el soporte. Por último, el haz se deberá alinear de forma manual, para que el plano incidente sea paralelo al plano de rotación del banco, como así también atravesar por completo el semidisco.

Realizar las siguientes tareas:

1. Incidiendo en la parte plana del semidisco ($n_i < n_t$):
 - a. Verificar el comportamiento del ángulo reflejado (θ_r) respecto al ángulo incidente (θ_i).
 - b. Calcular el índice de refracción del acrílico (n_{acr}) a partir del ángulo transmitido (θ_t).
2. Calcular y verificar el ángulo crítico de reflexión total interna (θ_c), a partir del índice de refracción obtenido en el punto anterior. Notar que este efecto ocurre cuando ($n_t < n_i$).
3. Calcular y verificar el ángulo de polarización o de Brewster (θ_p) a partir del índice de refracción obtenido en el procedimiento anterior.
4. Representar en un gráfico la reflectancia y transmitancia para ambas polarizaciones de manera cualitativa.

Aclaraciones para realizar los experimentos:

1. Operaciones para determinar del índice de refracción del semidisco (n_{acr}).

- I. Registrar el ángulo que forma el haz respecto de la normal, al salir por la cara curva del semidisco de acrílico (ángulo de transmisión).
- II. Repetir la operación anterior para 10 ángulos incidentes diferentes y medir los correspondientes ángulos de los rayos transmitidos.
- III. Calcular el índice de refracción a partir de la ley de Snell para cada registro. Suponer que el índice de refracción del aire es 1.
- IV. Calcular la media, el desvío estándar y presentar los datos en forma de intervalo.

2. Determinación del ángulo de polarización (θ_p).

Determinar el ángulo para el cual el haz láser reflejado contra la cara plana del semidisco se extingue, teniendo en cuenta que el haz se hará incidir con luz polarizada. Los pasos a seguir son:

- I. Polarizar el haz con la lámina polarizadora junto con el soporte de montaje.
- II. Calcular el ángulo incidente de polarización utilizando los índices de refracción medidos anteriormente.
- III. Incidir de acuerdo al ángulo calculado y luego girar el polarizador hasta su total extinción. Recordar que este fenómeno ocurre solamente cuando el campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia.

3. Caracterización cualitativa de la reflectancia y transmitancia

- I. Polarizar el haz de forma "paralela" (campo eléctrico paralelo al plano de incidencia).

- II. Girar la base rotatoria desde 0° hasta 90° observando la intensidad del haz refractado, es decir, la transmitancia. Realizar un gráfico a mano alzada donde en el eje X sea el ángulo incidente (θ_i) y el eje Y la intensidad relativa. Recordar que la reflectancia es el complemento de la transmitancia.
- III. Repetir la operación anterior rotando el polarizador 90° , es decir, polarizar el campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia.

Resultados

	θ_i	$\theta_t (n_i > n_t)$	n_{acr}	θ_c	θ_p
Medida #1					
Medida #2					
Medida #3					
...					
Medida #10					
Promedio					
Desviación					

Discusión y conclusiones

Discutir las siguientes preguntas e investigar sobre:

- ¿Por qué la pieza de acrílico utilizada tiene forma de semidisco? ¿Se podrían realizar los mismos experimentos con una pieza rectangular?
- Buscar y verificar si el índice de refracción calculado se corresponde con los publicados en internet y/o manuales.
- ¿Qué relación existe entre el fenómeno de reflexión total interna y la fibra óptica?
- ¿Explica la ley de Snell el ángulo de polarización? ¿Por qué?
- ¿Se observa alguna similitud o tendencia para cada polarización en las curvas de reflectancia y transmitancia registrada?