

Introducción a la Física Experimental

Guía de la experiencia

Reflexión y refracción de la luz

Departamento de Física Aplicada.
Universidad de Cantabria.

Febrero 28, 2005

Tenga en cuenta que la lectura previa de esta guía y la comprobación de las ecuaciones le llevará del orden de dos horas, incluyendo la consulta de las palabras clave, y que la lectura de la bibliografía específica en inglés le llevará entre una y dos horas.

Resumen

Se describe cómo llevar a cabo experiencias para medir el índice de refracción de diferentes medios utilizando las leyes de la reflexión y de la refracción. Se indica cómo la medida del ángulo límite de refracción entre un medio y el vacío permite obtener el índice de refracción del primero.

Introducción

Un medio es transparente cuando la luz lo atraviesa –prácticamente– sin ser absorbida. La relación entre la velocidad v de la luz en un medio y la velocidad de la luz en el vacío, c , se conoce como *índice de refracción*, n , de dicho medio,

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

El índice de refracción de un medio puede depender de la frecuencia de la luz que lo atraviesa. Por ejemplo, para luz azul de longitud de onda en el vacío $\lambda_A = 486$ nm, el índice de refracción de un cierto tipo de vidrio es $n_A = 1,521$, mientras que para luz roja de longitud de onda en el vacío $\lambda_R = 656$ nm, el índice de refracción en el mismo vidrio es $n_A = 1,504$. Este tipo de cuerpos, que no son transparentes por igual para todas las longitudes de onda si no que muestran una absorción selectiva, se denominan *medios dispersivos*. La interpretación física de la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda se basa en las posibles formas de interacción de la radiación electromagnética con la materia. Si la frecuencia de la radiación ν es tal que la energía

$E = h\nu$ no corresponde a una transición entre estados electrónicos del átomo, entonces la nube electrónica se polariza y el átomo emite como un dipolo, con la misma frecuencia que lo excita.

Cuando un rayo de luz incide sobre la superficie de separación de dos medios transparentes diferentes, parte de la luz incidente se refleja en esa superficie y vuelve al medio y parte de la luz incidente se refracta, penetrando en el segundo medio.



Willebrord Snell
(1580-1626)

Figura 1: Retrato de Willebrord Snell

De acuerdo con el *principio de Fermat*, el *ángulo de incidencia* Φ de una onda sobre una superficie plana es igual al *ángulo de reflexión*. Este enunciado constituye la Ley de la Reflexión.

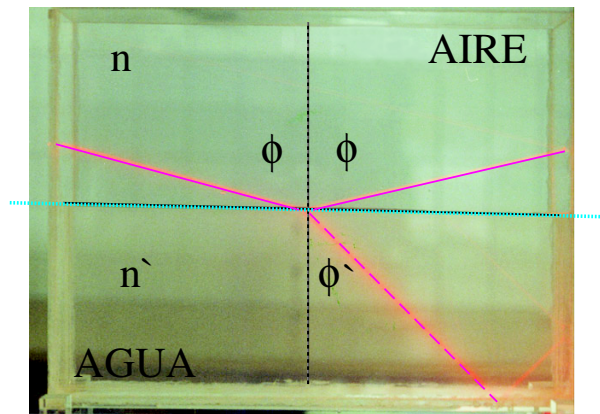


Figura 2: Reflexión y refracción de un rayo de luz sobre la superficie de separación de un gas de índice de refracción n y un líquido de índice de refracción n'

De acuerdo de nuevo con el principio de Fermat, el ángulo de incidencia

Φ de una onda en un medio de índice de refracción n que incide sobre la superficie de separación de otro medio, de índice de refracción n' , y el *ángulo de refracción* Φ' se relacionan según la expresión

$$n \operatorname{sen} \Phi = n' \operatorname{sen} \Phi'. \quad (2)$$

En la refracción, la razón entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre el índice de refracción del medio al que llega la luz y del índice de refracción del medio desde el que la luz incide.

Esta ley se conoce como *Ley de Snell* –aunque los franceses la denominan *ley de Descartes de la refracción*–.

Un fenómeno muy interesante en relación con el fenómeno de la refracción de la luz entre dos medios diferentes es el de *ángulo límite*. Si un rayo incide sobre una superficie de separación de dos medios con un ángulo Φ_L tal que se consigue que $\Phi' = \pi/2$, el rayo no llega a penetrar en el otro medio. A partir de aquí, se deduce de la Ec. (2) que

$$\frac{n'}{n} = \operatorname{sen} \Phi_L. \quad (3)$$

Si uno de los medios es el vacío, tal que $n = 1,000$, entonces se puede determinar n' mediante medidas geométricas realizadas con un goniómetro.

Descripción del material

- Cubeta de metacrilato llena de agua y con algo de detergente.
- Pie soporte, barra, y dos nueces.
- Puntero láser que se sujeta con una nuez y cuyo botón de encendido puede apretarse con la misma nuez.
- Varios espejos planos
- Varios goniómetros, de semicírculo y de círculo completo.
- Una pantalla blanca
- Un bloque prismático de metacrilato.

Consideraciones previas a la realización del experimento

Antes de comenzar la toma de datos en la experiencia, considere las siguientes cuestiones:

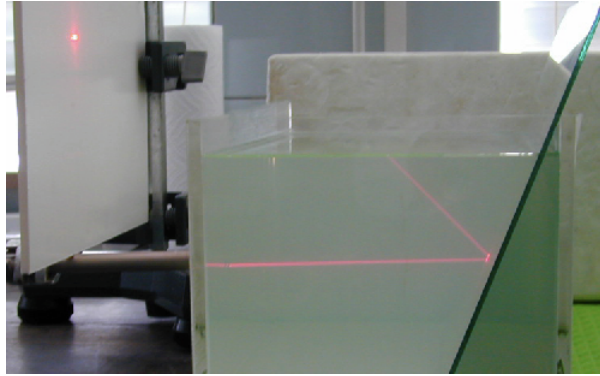


Figura 3: Ángulo límite. Montaje experimental. El rayo de luz procedente de un láser atraviesa el agua de un recipiente e incide sobre un espejo. Al reflejarse en el espejo incide sobre la superficie de separación del agua y el aire. Variando la inclinación del espejo se puede conseguir que el rayo incida sobre la superficie con su ángulo límite y no salga al aire.

1. Obtenga la definición de todos aquellos conceptos de la Introducción que estén señalados en *italica*.
2. ¿Cuál es el significado físico de la dependencia de n con la frecuencia? Investigue la interacción entre una onda electromagnética y el conjunto de átomos que forman un material *dieléctrico*. ¿Qué sucede si la frecuencia de la radiación incidente ν es tal que $E = h\nu$ es una diferencia de energía entre dos niveles electrónicos del átomo? ¿Y si esa energía E no corresponde a una diferencia de niveles del átomo?
3. Demuestre mediante consideraciones geométricas que de todos los caminos que conectan un punto A con otro B situados en el mismo o en distinto medio, aquél que verifica las leyes de la reflexión o refracción, respectivamente, es aquel camino que la luz emplea menos tiempo en recorrer. Consulte la Ref. [4]
4. Demuestre que de acuerdo con la Ec. (2) un rayo que incida sobre una superficie de separación de dos medios con ángulos mayores que uno dado, Θ_L , –conocido como ángulo límite– no penetra en el segundo medio. ¿Qué condiciones tiene que cumplir el índice de refracción del segundo medio respecto del índice de refracción del primer medio?

Modo operativo

Realice primero las experiencias en las que no se utiliza la cubeta con agua –espejos y papel milimetrado y experiencia con el prisma de metacrilato– y posteriormente las experiencias con el láser, la cubeta de agua y los espejos –reflexión y ángulo límite–.

Reflexión

Primera parte

Reflexión 1ª parte Sobre una hoja de papel milimetrado, trace un segmento de recta P_1P_2 , paralela a uno de los lados de la hoja y cerca del borde de la misma. Defina con dos alfileres (es decir, eligiendo dos puntos del plano del papel) una recta I_1 que forme un cierto ángulo con la recta P_1P_2 . Coloque el espejo sobre la recta P_1P_2 , de manera que el plano del espejo sea perpendicular al plano del papel. Con la ayuda de otros dos alfileres, defina la recta R_1 , prolongación en el espacio real de la imagen que de la recta I_1 proporciona el espejo. Para conseguirlo, buscará el efecto óptico de observar los 4 alfileres (es decir, los dos últimos y la imagen de los dos primeros) alineados. Marque las huellas de los dos últimos alfileres y retíelos, sin modificar la posición de los dos primeros, y repita el procedimiento tres veces. Así, fijado un rayo incidente, habrá determinado el correspondiente rayo reflejado (que es el que transporta la imagen de los dos alfileres iniciales que definen el rayo incidente). Retire el espejo y trace las rectas que pasan por los pares de puntos determinados por los alfileres. Mida los ángulos de incidencia y reflexión. Tabule los resultados. Realice el cálculo de errores. Contraste sus resultados con la teoría. ¿Ha observado algún resultado inesperado? ¿Se cortan los rayos incidente y reflejado en algún punto de la recta P_1P_2 ? ¿Puede explicarlo?

Trace otro segmento de recta P_1P_2 tal que se corte con el segmento P_1P_2 , en el centro del mismo, aproximadamente, y forme un pequeño ángulo α con éste. Coloque el espejo de la misma forma que antes, pero ahora sobre P_1P_2 . Defina con dos alfileres la recta R_2 , prolongación en el espacio real de la imagen que de la recta I_1 proporciona el espejo. Haga esto tres veces, marcando en cada caso el par de huellas que dejan los alfileres. Retire el espejo y trace las rectas pertinentes. Mida el ángulo que forman las rectas R_1 y R_2 y compárelo con el ángulo que ha girado el espejo. Contraste sus resultados con la teoría.

Segunda parte

En una cubeta casi llena de agua se han puesto unas gotas de detergente para poder visualizar el rayo de luz que proviene de un puntero láser. Coloque un espejo plano en el fondo de la cubeta (debe tomar la precaución de colocar, a su vez, algo debajo del espejo que impida que toda la superficie del espejo esté en contacto con la superficie del fondo), lo más cerca posible de una de las paredes de la cubeta. Haga llegar un rayo de luz hasta la superficie del espejo y mida con un goniómetro el ángulo que forma el rayo de entrada y la superficie del espejo y ángulo que forman el rayo de salida y la superficie del espejo.

Sin mover el rayo anterior, haga que el espejo deje de ser horizontal —eleve uno de los lados del recipiente que contiene el agua— y forme un pequeño ángulo con la horizontal. Determine de nuevo el ángulo entre el rayo que incide y el espejo y el ángulo entre el rayo que se refleja y el espejo.

Analice sus resultados. Compárelos con los que ha obtenido en la primera parte.

Refracción

Cuando sobre un prisma de caras planoparalelas, hecho de un material de índice de refracción n , incide por una de sus caras un rayo formando un cierto ángulo $\Phi \neq 0$ con la normal a dicha cara, el rayo que emerge por la cara opuesta, lo hace según una recta paralela a la dirección del rayo incidente y a una cierta distancia d .

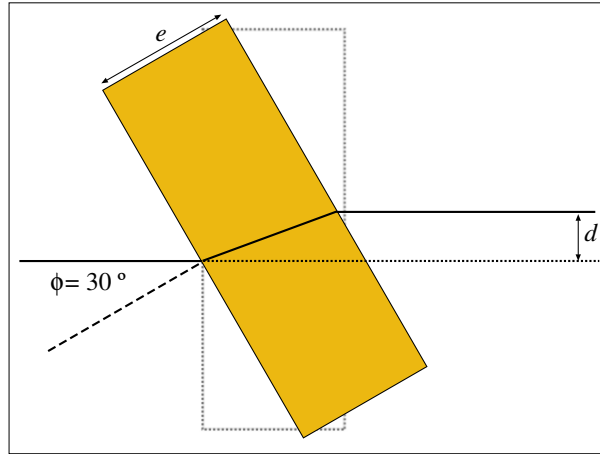


Figura 4: Disposición experimental para medir el índice de refracción de un sólido transparente de espesor e . Cuando la luz incide con un ángulo ϕ , el rayo emergente se desvía una distancia d respecto de la dirección cuando incide con ángulo $\phi = 0$ –perpendicular a la superficie del cuerpo.

Cuando el ángulo de incidencia es de $\phi = 30^\circ$, entonces el índice de refracción viene dado, en función del espesor e del prisma y de la distancia d de separación entre rayos como (Fig. 4), por la expresión

$$n = \frac{\sqrt{e^2 - ed + d^2}}{e - 2d}. \quad (4)$$

La medida del ángulo límite permite determinar el índice de refracción de un medio si se conoce el índice de refracción del medio en el que la luz no llega a penetrar.

El índice de refracción de un medio puede obtenerse determinando su correspondiente ángulo límite.

Un rayo láser horizontal penetra en el agua contenida en una cubeta. Un espejo casi vertical refleja el rayo y lo hace incidir contra la superficie de separación agua-aire. Una pantalla indica dónde llega el rayo refractado. Varíe el ángulo que forma el espejo con la vertical hasta conseguir que el rayo que incide sobre la superficie de separación agua-aire no penetre en el aire.

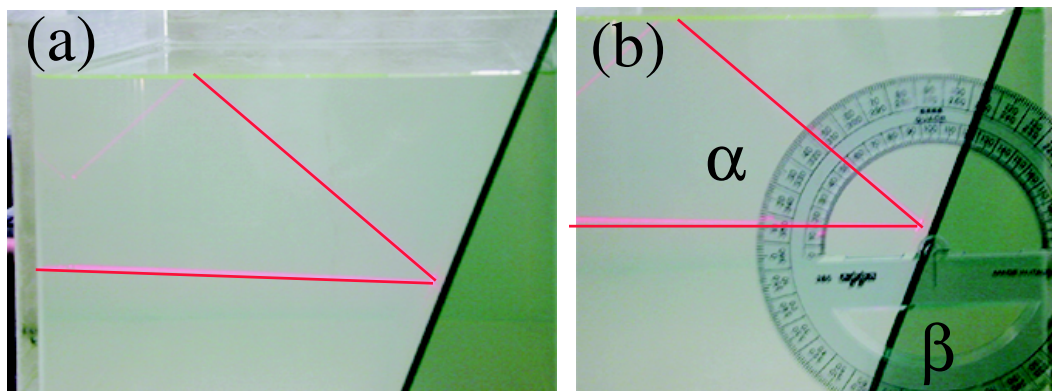


Figura 5: Ángulo límite. (a) Reflexión total en la superficie de separación entre agua y aire. (b) Medida del ángulo α formado por la dirección del rayo incidente sobre el espejo sumergido en el agua y el rayo reflejado que produce reflexión total sobre la superficie de separación de los dos medios. El ángulo β formado por la dirección del espejo con la horizontal también puede ser medido.

Una vez alcanzada esta geometría, mida el ángulo α que forman el rayo horizontal y el rayo reflejado en el espejo. Mida también el ángulo β que forma el espejo con la horizontal.

Demuestre que el ángulo límite de incidencia Θ_L

$$\Theta_L = 2\beta - \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Demuestre entonces que el índice de refracción n' del líquido puede ponerse como

$$n' = \frac{1}{\sin \Theta_L}. \quad (6)$$

Preguntas adicionales relacionadas con la experiencia

1. De la velocidad, frecuencia y longitud de onda de una onda luminosa, ¿qué magnitud no cambia cuando una onda pasa de un medio a otro?
2. ¿Es el agua un medio dispersivo para las ondas luminosas? Explique cuál es el fenómeno que está en el origen del arco iris.
3. ¿Qué sucede si un rayo incide sobre la superficie de separación de dos medios con un ángulo de incidencia mayor que su ángulo límite para ese segundo medio?
4. ¿Por qué hay que poner algo debajo del espejo que se coloca en el fondo de la cubeta?

Referencias

- [1] C. V. Bertsch and B. A. Greenbaum, *New apparatus for Snell's law*, Am. J. Phys. **26**, 340 (1957)
- [2] W. A. Hilton, *Index of refraction of air*, The Physics Teacher **6**, 176 (1968)
- [3] E. D. Noll, *Measuring the index of refraction of liquids with a laser*, The Physics Teacher **11**, 307-308 (1973)
- [4] Tipler P. A., *Física*, Ed. Reverté S.A., Barcelona (1999), 4^a Ed.
- [5] J I Katz, *Answer to Question 50. Temperature dependence of the index of refraction*, Am. J. Phys. **65**, 942- (1997); W Jauch, *Answer to Question 50. Temperature dependence of the index of refraction*, Am. J. Phys. **65**, 943- (1997); C F Bohren, *Answer to Question 50. Temperature dependence of the index of refraction*, Am. J. Phys. **65**, 943-944 (1997)
- [6] J F Weisz, *A particle interpretation of optical refraction*, Phys. Education **35**, 363-364 (2000)
- [7] R Newburgh et al, *Using the small-angle approximation to measure the index of refraction of water*, The Physics Teacher **38**, 478-479 (2000)