



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 31 JUNIO DE 2010

“DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN MEDIANTE REFRACTOMETRÍA”

AUTORÍA MARÍA FRANCISCA OJEDA EGEA
TEMÁTICA REFRACTOMETRÍA, DETERMINACIÓN ÍNDICE DE REFRACCIÓN
ETAPA BACHILLERATO

Resumen

Determinar experimentalmente el índice de refracción no es trivial, pues determinar la velocidad de la luz en un medio material no es factible de forma directa. El índice de refracción puede determinarse experimentalmente de un modo sencillo mediante el estudio de la reflexión total, estudiando el efecto Pffund en láminas de caras planas y paralelas.

Palabras clave

Experiencias de Óptica Geométrica, experiencias Física, determinación índice de refracción, reflexión total, refractometría, efecto Pffund.

1. INTRODUCCIÓN

En 2º de Bachillerato se aborda con profundidad desde el punto de vista teórica el estudio de las ondas y de las ondas electromagnéticas. Se aborda el estudio cuantitativo de las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz, describiéndose el fenómeno de la reflexión total.

Consecuencia de la reflexión total se produce el efecto Pffund, que se produce cuando una fuente luminosa difunde luz sobre una lámina plano-paralela. Se producen diversas reflexiones totales en la superficie de separación entre el medio material de la lámina y el aire y se acaban produciendo anillos luminosos de distinto tamaño e intensidad. Usando este fenómeno se puede determinar el índice de refracción de la lámina.

El método empleado y el material necesario exceden del nivel de un laboratorio de Bachillerato, aunque no es excluyente, pues se suele usar un haz láser.

2. FUNDAMENTO.

2.1. Reflexión total.

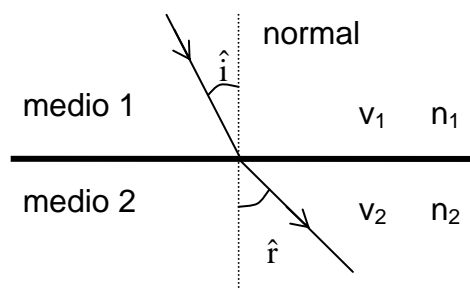
Cuando la luz, o cualquier onda, viaja por un medio homogéneo lo hace con una trayectoria recta que se puede especificar mediante un rayo, que es la línea imaginaria que marca la dirección de propagación de la luz. Cuando la luz viaja en un medio 1 a una velocidad “ v_1 ” se define el índice de refracción n_1 como el cociente c/v_1 , donde c es la velocidad de la luz en el vacío o en el aire donde aproximadamente es igual.

Si la luz incide hacia un segundo medio transparente, de índice de refracción n_2 , la luz sufre un cambio de dirección, debido a que en ese nuevo medio la luz viaja con una velocidad diferente “ v_2 ”. Este cambio de dirección que experimenta la luz cuando pasa de propagarse de un medio a otro, debida a que la velocidad de propagación de la luz es diferente, recibe el nombre de refracción.

La refracción de la luz cumple las mismas leyes que la de cualquier onda o ley de Snell, determinadas en 1620:

- 1ª El rayo incidente, el reflejado y la recta normal a la superficie refractante están en el mismo plano.
- 2ª El ángulo de incidencia y el de refracción tienen la siguiente relación:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{v_i}{v_r}$$

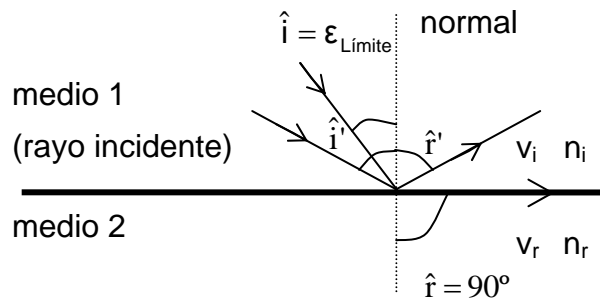


Esta última expresión implica que el ángulo respecto a la normal es mayor en el medio en que la luz tiene mayor velocidad. Esta ley, en el caso de la luz, puede expresarse en función del índice de refracción n , de los medios, lo que nos proporciona:

$$n_i \text{sen } \hat{i} = n_r \text{sen } \hat{r}$$

Escrita la ley de la refracción de la luz en función del índice de refracción, diríamos que el ángulo respecto a la normal es mayor en el medio en el que el índice de refracción es más pequeño (que es donde la velocidad es mayor, pues $n=c/v$).

Analizando la ley de la refracción se ve que, **si la luz pasa de un medio a otro con índice de refracción más pequeño** (donde la velocidad de la luz es mayor) el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia, por lo que al aumentar el de ángulo incidencia aumenta el de refracción. Así, en el caso de que la luz pasa de un medio a otro con índice de refracción más pequeño, habrá cierto valor del ángulo de incidencia tal que el ángulo de refracción sea de 90° , por lo que esos rayos no pasarían al otro medio material, sino que saldrían tangentes a la superficie de separación de los dos medios. El ángulo de incidencia para el que ocurre esto se llama ángulo límite (ε_L):



ángulo límite es $\varepsilon_L = \hat{i}$ tal que $\hat{r} = 90^\circ \Rightarrow n_i \sin \varepsilon_L = n_r \sin 90^\circ \Rightarrow \boxed{\varepsilon_L = \text{arc sen}(n_r/n_i)}$

el ángulo límite sólo existe si $n_i > n_r$ o lo que es lo mismo $v_r > v_i$, pues sólo en ese caso la ecuación anterior tiene solución.

Si la luz incide con un ángulo \hat{i}' mayor que el ángulo límite la ley de la refracción nos dice que no hay rayo refractado, la luz no pasa al otro medio, por lo que la luz que llega a la superficie de separación de esos medios sólo se reflejará, con un ángulo respecto a la normal igual al de incidencia. Este fenómeno se llama reflexión total.

En la práctica, si uno de los dos medios implicados en la refracción de la luz es el aire o el vacío, donde la velocidad de la luz es mayor que en ningún otro medio y por tanto el índice de refracción más pequeño ($n_{\text{aire}}=1$), sólo puede producirse reflexión total si la luz pasa de un medio material hacia el aire (de mayor índice de refracción a más pequeño).

2.2. Efecto Pffund.

El efecto Pffund se produce cuando se tiene una lámina cuya superficie inferior es difusora de luz. Si conseguimos que en esa superficie inferior exista un punto difusor de luz, porque por ejemplo esté reflejado un haz de luz láser incidente perpendicularmente a la lámina, la luz se reflejará de forma difusa desde la superficie inferior en todas direcciones.

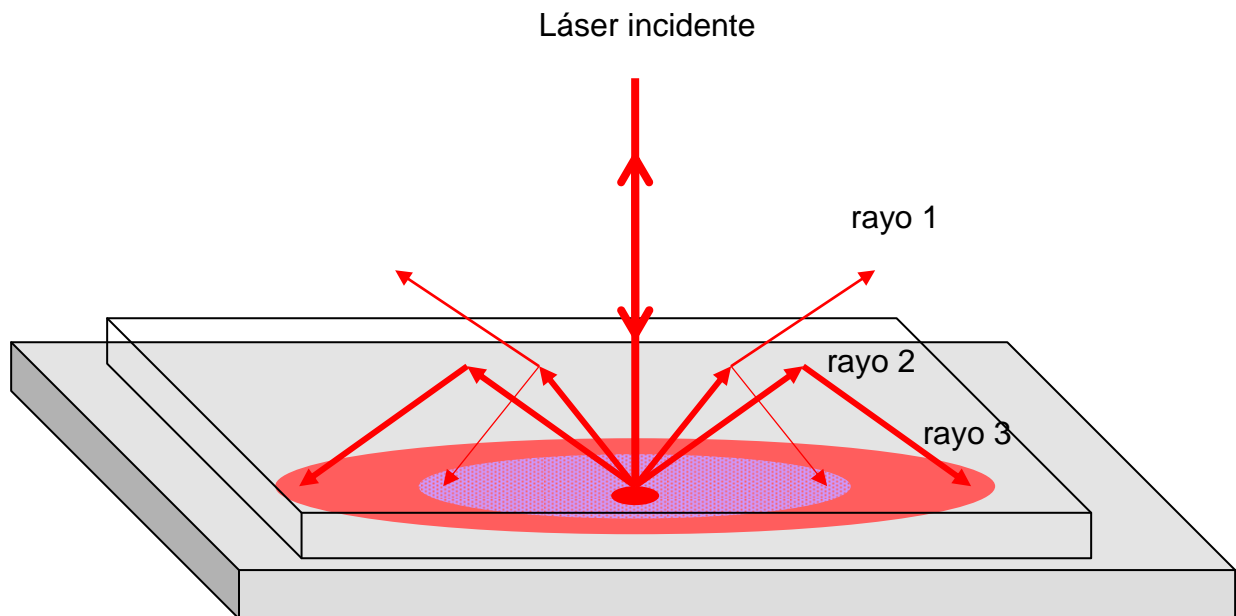
Al llegar a la cara superior de la lámina los diversos rayos reflejados de forma difusa, nos encontramos con que los diferentes rayos de luz tratan de pasar al aire, donde tenemos un índice de refracción más pequeño. Así:

-Algunos rayos de luz inciden en la superficie superior con ángulos de incidencia tales que la luz se refracta y salen al aire (1), aunque parte de ese mismo también se refleja y vuelve hacia la superficie difusora inferior con menos intensidad que la que incidió sobre la superficie superior.

-Otros inciden con ángulo límite y salen paralelos a la superficie superior de la lámina.

-Otros inciden en la cara superior con ángulo mayor que el ángulo límite (2), por lo que sufrirán reflexión total y rebotarán hacia la superficie inferior difusora de la lámina (3), con la misma intensidad que la que incidió sobre la superficie superior.

-Los respectivos rayos que vuelven hacia la superficie difusora se convierten en focos secundarios emisores de luz, aunque con una intensidad mucho más pequeña que la del punto difusor inicial o principal.



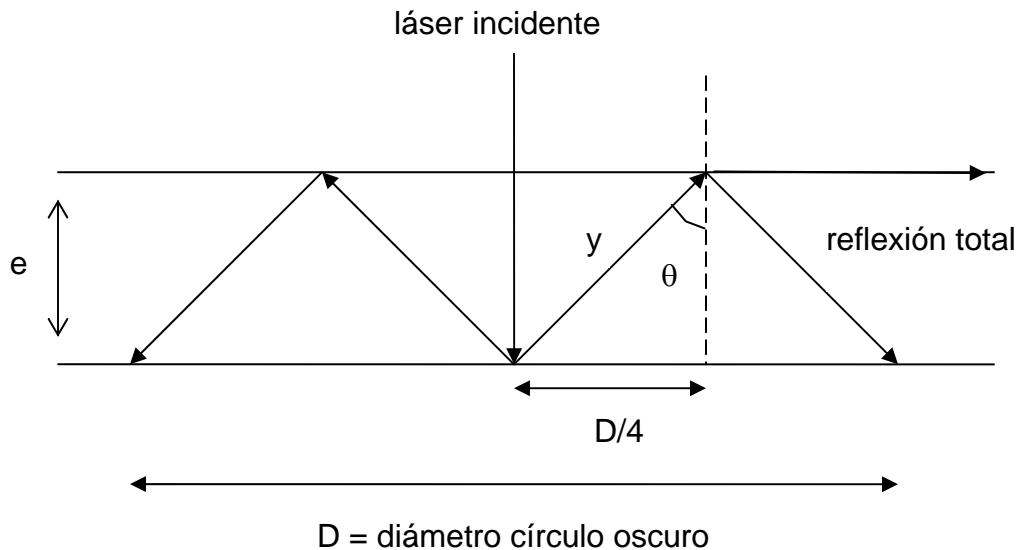
Lo que se observará, visto desde arriba, es un punto muy luminoso, sobre el que se hace incidir el haz láser y que actúa de foco difusor inicial o principal, rodeado de un "círculo oscuro" de diámetro "D" con intensidad muy inferior formado por la reflexión parcial de los rayos que incidieron en la superficie superior de la lámina con ángulo inferior al límite y que parcialmente consiguieron salir de la lámina. A continuación nos encontramos con un aro luminoso periférico que se forma por los rayos que sufrieron reflexión total en la superficie superior de la lámina.

El diámetro del círculo oscuro "D" tiene un diámetro que depende del espesor "e" y del índice de refracción de la lámina "n. Como el espesor de la lámina y el diámetro del círculo oscuro son fácilmente medibles, podemos calcular el índice de refracción mediante la relación existente entre estas tres magnitudes que demostramos a continuación", suponiendo que la luz pasa posteriormente hacia el aire.

El primer rayo que limita el círculo oscuro es el primer rayo que sufre reflexión total, lo que se producirá para un ángulo de incidencia en la cara superior θ , unos “segundos” de grado mayor que el ángulo límite ε_L , por lo que podemos decir que en la condición límite, teniendo en cuenta la ecuación que permite obtener el ángulo límite:

$$\text{sen}\theta = \text{sen } \varepsilon_L = 1/n$$

pues la luz trata de pasar del medio material de índice de refracción $n=n_i$ al aire, donde $n=1=n_r$.



De la geometría del fenómeno se tiene que:

$$\text{sen}\theta = \frac{D/4}{y} = \frac{D/4}{\sqrt{(D/4)^2 + e^2}}$$

Por el teorema de Pitágoras:

$$y = \sqrt{(D/4)^2 + e^2}$$

Con lo que

$$n = \frac{1}{\text{sen}\theta} = \frac{\sqrt{(D/4)^2 + e^2}}{D/4} = \frac{(\sqrt{D^2 + 16e^2})/4}{D/4} = \frac{\sqrt{D^2 + 16e^2}}{D}$$

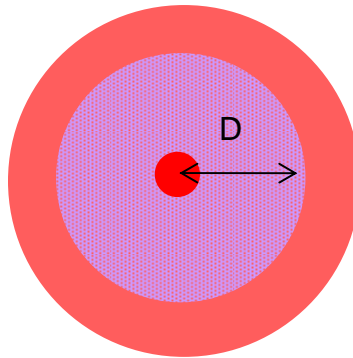
Por lo que finalmente se obtiene:

$$n = \frac{\sqrt{D^2 + 16e^2}}{D}$$

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Se coloca una lámina plano paralela de vidrio, cuyo índice de refracción se pretende determinar., sobre un papel humedecido en agua de modo que el contacto entre ambas superficies sea perfecto.

Se toma el haz láser y se proyecta perpendicularmente a la lámina, lo que producirá que observemos como se forman los círculos explicados anteriormente: un “círculo oscuro” de diámetro “D” con el centro muy iluminado, delimitado por un aro de intensidad alta, aunque no tanto como el centro de la figura.



Teniendo en cuenta la expresión obtenida para determinar el índice de refracción del medio, en este caso del vidrio, simplemente hemos de medir el diámetro del círculo oscuro y el espesor de la lámina plano-paralela, lo que se hace con un calibre de sensibilidad $s=1/20 \text{ mm} = 0.005 \text{ m}$.

4. MEDIDAS EXPERIMENTALES Y CÁLCULO DE ERRORES.

Usando el calibre realizamos tres medidas para el espesor de la lámina y tres mediciones del diámetro de la mancha luminosa. Teniendo en cuenta la teoría de errores, el valor más probable será la media aritmética de las medidas y su error el máximo de entre la sensibilidad del calibre y el error cuadrático medio de las medidas realizadas:

ESPESOR:

$x_i \text{ (m)}$
0.915 ± 0.005
0.920 ± 0.005
0.925 ± 0.005

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} = 0.920 \text{ m}$$

Se considera que el error absoluto de la medida directa es el máximo entre la sensibilidad del instrumento de medida y el error cuadrático medio, que habrá que calcular:

$$\Delta \bar{x} = \text{máximo} \{s, \overline{E^2}\}$$

$$\overline{E^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)} = 0.003 \text{ m} \quad \Delta \bar{x} = \text{máximo} \{s, \overline{E^2}\} = \text{máximo}\{0.005, 0.003\}$$

Como el error cuadrático medio es menor que la sensibilidad del instrumento, tomamos como error absoluto del espesor la sensibilidad del instrumento, luego para el espesor obtenemos finalmente:

$$e = (0.920 \pm 0.005) \text{ m}$$

DIÁMETRO:

x_i (m)
3.135 ± 0.005
3.160 ± 0.005
3.190 ± 0.005

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} = 3.162 \text{ m}$$

Se considera que el error absoluto de la medida directa es el máximo entre la sensibilidad del instrumento de medida y el error cuadrático medio, que habrá que calcular:

x_i (m)	\bar{x} (m)	$x_i - \bar{x}$ (m)
3.135	3.162	0.027
3.160	3.162	0.002
3.190	3.162	0.028

$$\Delta \bar{x} = \text{máximo} \{s, \overline{E^2}\}$$

$$\overline{E^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)} = 0.016 \text{ m}$$

$$\Delta \bar{x} = \text{máximo} \{s, \overline{E^2}\} = \text{máximo}\{0.005, 0.016\}$$

Como el error cuadrático medio es menor que la sensibilidad del instrumento, tomamos como error absoluto del espesor la sensibilidad del instrumento, luego para el espesor obtenemos finalmente:

$$D = (3.162 \pm 0.016) \text{ m}$$

donde tomamos el criterio de poder escribir dos cifras significativas para el error absoluto en el caso de que las cifras significativas tengan valor inferior a 25.

Finalmente estamos en condiciones de calcular el índice de refracción de la lámina empleada (vidrio en este caso):

$$n = \frac{\sqrt{D^2 + 16e^2}}{D} = 1.53443\dots$$



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 31 JUNIO DE 2010

El error cometido en la determinación de esta medida indirecta se calcula teniendo en cuenta la propagación lineal de errores:

$$\Delta n = \left| \frac{\partial n}{\partial D} \right| \cdot \Delta D + \left| \frac{\partial n}{\partial e} \right| \cdot \Delta e$$

Las derivadas parciales son:

$$\frac{\partial n}{\partial e} = \frac{32e}{2D \cdot \sqrt{D^2 + 16e^2}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial D} = \frac{\frac{2D}{2\sqrt{D^2 + 16e^2}} \cdot D - \sqrt{D^2 + 16e^2} \cdot 1}{D^2} = \frac{\frac{D^2}{\sqrt{D^2 + 16e^2}} - \sqrt{D^2 + 16e^2}}{D^2} = \frac{-16e^2}{\sqrt{D^2 + 16e^2} \cdot D^2}$$

$$\Delta e = 0.005 \text{ m} \quad \Delta D = 0.016 \text{ m}$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$\Delta n = 0.04946... \cong 0.05$$

Por lo que el resultado final de la experiencia junto con su error es:

$$n = 1.53 \pm 0.05$$

5. CONCLUSIONES.

Hemos obtenido un resultado para el índice de refracción del vidrio bastante razonable, teniendo en cuenta que en la bibliografía se suele dar un valor para dicho índice de 1.5, si bien todos los vidrios no son idénticos.

Por otro lado, el error relativo cometido en la determinación es del 3.27%, que no es un error muy elevado, por lo que podemos decir que el método empleado no es malo, pero que tampoco es un método que proporcione resultados excelentes, lo que sí podríamos decir si se obtuviera un resultado con error relativo por debajo del 2%.

Como experiencia resulta muy interesante la observación del fenómeno y su uso para medir indirectamente una propiedad de un medio material.

BIBLIOGRAFÍA.

-Casas, J. (1994) "Óptica". Zaragoza.

-Escofet, J., Millán, M.S., Pérez, E., Vila, N. (1997). "Principios de óptica geométrica". Terrasa: Cardellach Còpies.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 31 JUNIO DE 2010

- Felipe, A., Albarrán, C. (1998). *“Manual de óptica geométrica”*. Valencia: Universitat de València.
- Hecht, E. (1997). *“Óptica”*. Addison Wesley.
- Hecht, E. (1987). *“Óptica. Teoría y problemas resueltos”*. McGraw-Hill.

Autoría

- Nombre y Apellidos: María Francisca Ojeda Egea.
- Centro, localidad, provincia: IES Ángel Ganivet, Granada (Granada).
- E-mail: francisojedaegea@gmail.com