

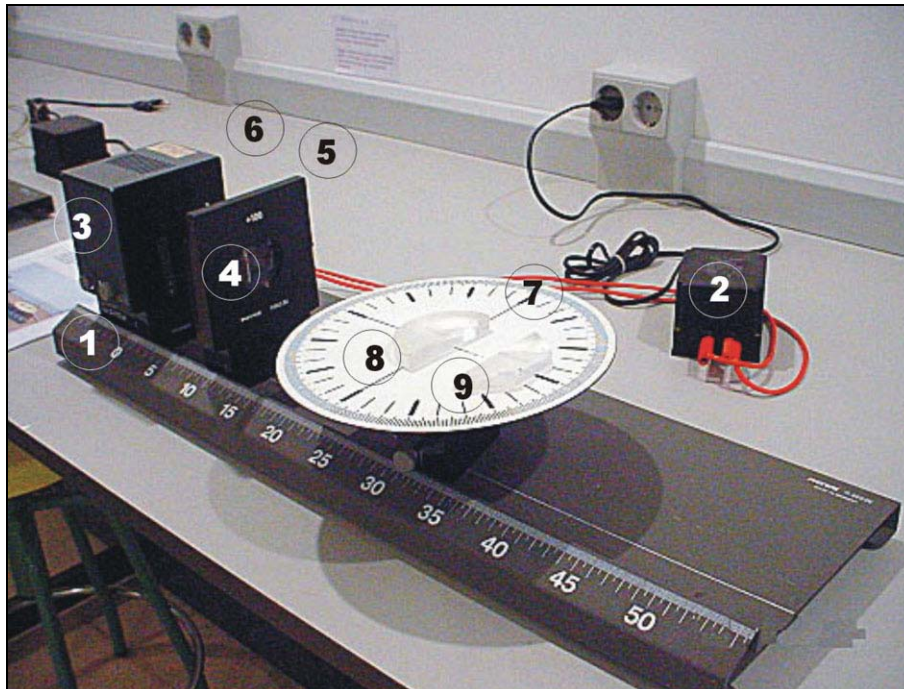
22. DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE REFRACCIÓN

OBJETIVOS

- Determinación del índice de refracción de un cuerpo semicircular, así como del ángulo límite.
- Observación de la dispersión cromática . Determinación del ángulo de desviación mínima para un prisma óptico.

MATERIAL

- (1) Banco óptico (metálico) con regla graduada.
- (2) Fuente de alimentación.
- (3) Lámpara de experimentación con pie magnético.
- (4) Lente convergente con pie magnético ($f = 0.1 \text{ m}$).
- (5) Porta-diafragmas.
- (6) Diafragmas de rendija.
- (7) Disco óptico graduado con pie magnético.
- (8) Cuerpo semicircular de índice de refracción desconocido.
- (9) Prisma óptico de índice de refracción desconocido.



FUNDAMENTO TEÓRICO

Definición de índice de refracción de un medio A:

Se trata de la relación existente entre la velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), respecto a la velocidad que lleva la luz en dicho medio A.

$$n_a = \frac{c}{v_a} \quad [22-1]$$

Por tanto, el índice de refracción de la luz en el vacío es 1 (ya que $v_{\text{vacío}} = c$). El valor del índice de refracción del medio es una medida de su "densidad óptica": La luz se propaga a velocidad máxima en el vacío pero más lentamente en los demás medios transparentes; por tanto en todos ellos $n > 1$. Ejemplos de valores típicos de n son los del aire (1.0003), agua (1.33), vidrio (1.46 – 1.66) o diamante (2.42).

¿Qué le pasa a la luz al llegar a la superficie de separación de dos medios transparentes?

Cuando un rayo luminoso incide sobre la superficie de separación entre dos medios diferentes, el haz incidente se divide en tres: el más intenso penetra en el segundo medio formando el rayo refractado, otro es reflejado en la superficie y el tercero se descompone en numerosos haces débiles que emergen del punto de incidencia en todas direcciones, formando un conjunto de haces de luz difusa.

Ley de Snell

Nosotros nos vamos a centrar en el rayo refractado que penetra en el medio. La recta perpendicular a la superficie de separación entre medios diferentes, el rayo incidente, y el rayo refractado están en el mismo plano (Figura [22-1]).

La ley de Snell establece que:

$$n_1 \cdot \text{sen } \alpha = n_2 \cdot \text{sen } \beta \quad [22-2]$$

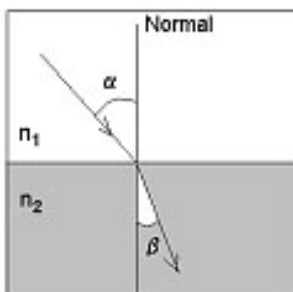


Figura [22-1]

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del primer y segundo medio, respectivamente; y α y β son los ángulos de incidencia y de refracción medidos respecto a la normal a la superficie.

Observa que si $\alpha = 0$, entonces $\beta = 0$, por lo que el rayo no se desvía si incide perpendicularmente a la superficie de separación de los dos medios.

(En el caso del rayo reflejado, $n_1 = n_2$, por lo que $\beta = \alpha$, y el ángulo de reflexión es por tanto, igual al de incidencia).

En este experimento se aplicará la Ley de Snell para dos casos particulares: el de la refracción aire \rightarrow vidrio y el de la refracción vidrio \rightarrow aire.

NOTA: Como aproximación, tomaremos el índice de refracción del aire igual a 1.00.
Ángulo límite¹

Cuando se estudia el caso en que la luz pasa de un medio menos refringente a otro más refringente (esto es, $n_2 > n_1$, como p. ej. aire \rightarrow vidrio o aire \rightarrow agua), el ángulo de incidencia va a ser siempre mayor que el de refracción ($\alpha > \beta$). Sin embargo, cuando se produce la refracción entre un medio cualquiera y otro menos refringente que él (o sea, $n_1 > n_2$, como p. ej. vidrio \rightarrow aire o agua \rightarrow aire), el ángulo de refracción va a ser siempre mayor que el incidencia ($\beta > \alpha$).

Se define el *ángulo límite*, α_{lim} , como el ángulo de refracción a partir del cual desaparece el rayo refractado y toda la luz se refleja. Como el valor máximo del ángulo de refracción, a partir del cual todo se refleja, es $\beta_{m\acute{a}x} = 90^\circ$, podremos conocer el ángulo límite por la ley de Snell (ec. [22-2]) :

$$\beta_{m\acute{a}x} = 90^\circ \Rightarrow n_1 \cdot \text{sen} \alpha_{lim} = n_2 \Rightarrow \text{sen} \alpha_{lim} = \frac{n_2}{n_1} \quad [22-3]$$

En el caso particular de refracción vidrio \rightarrow aire se tiene:

$$\text{sen} \alpha_{lim} = \frac{1}{n_{vidrio}} \quad [22-4]$$

Espectro visible

No existen límites en las longitudes de onda de la radiación electromagnética: todas las longitudes de ondas son teóricamente posibles, desde los rayos gamma ($\lambda < 10^{-2}$ nm) hasta las ondas de radio ($\lambda > 10^6$ nm). (*1 nanómetro = 1 nm = 10^{-9} metros*).

El ojo humano sólo es sensible a un pequeño intervalo de longitudes de onda de la radiación electromagnética, denominado espectro visible, formado por los diferentes colores componentes² de la luz visible. La combinación conjunta de todos estos colores es el color blanco. El espectro visible está comprendido entre los 400 nm (longitud de onda del color violeta) y los 700 nm (longitud de onda del color rojo).

Dispersión cromática

El índice de refracción n de un medio material es una función de la longitud de onda, λ , de la radiación incidente sobre él. Esto quiere decir que los distintos colores que forman la luz blanca viajan en el medio a distinta velocidad en función de su longitud de onda λ característica. Por consiguiente, el ángulo de refracción, β , también depende de dicha longitud de onda λ : este fenómeno recibe el nombre de *dispersión*.

¹ En esta página web puedes encontrar más información y aplicaciones sobre el ángulo límite en distintos medios. <http://enebro.pntic.mec.es/~fmag0006/Prism200.html>

² Los siete colores del arco-iris

<http://www.ucm.es/info/Geofis/practicas/prac22.pdf>

La dependencia del índice de refracción n de los vidrios ópticos con la longitud de onda λ en la zona del espectro visible puede representarse con bastante exactitud según la expresión:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$$

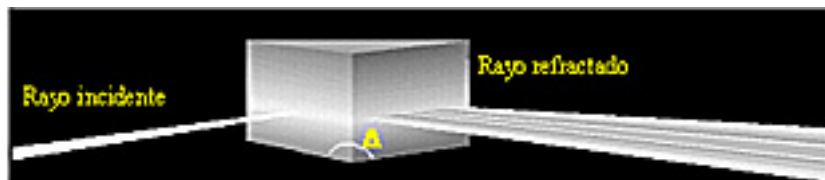
[22-5]

Cuando sobre un prisma óptico incide luz no monocromática (como es el caso de la luz blanca procedente de una lámpara de incandescencia), en cada una de las interfaces vidrio-aire cada una de las componentes de la luz se refracta con un ángulo distinto, saliendo en abanico.

En este experimento se observará el fenómeno de la dispersión cromática en un prisma óptico: al incidir la luz sobre él, aparecen franjas luminosas de diferentes colores, refractadas a distintos ángulos.

Dispersión en prismas

Un *prisma óptico* es un medio transparente limitado por dos superficies planas que se cortan en una arista, formando un ángulo diedro A .



El rayo de luz que incide en una de las dos caras con ángulo i (desde el aire al vidrio), sale por la otra con un ángulo e (de vidrio a aire). Se denomina *desviación total* δ a la desviación del rayo que sale respecto de la dirección del rayo incidente, y vale:

$$\delta = i + e - A$$

[22-6]

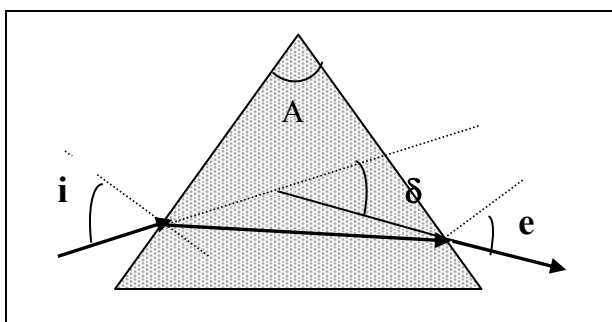


Figura [22-2]

Para cada prisma óptico, existe un ángulo de incidencia para el cual la desviación total es mínima. Tal situación se da cuando se cumple la condición $i = e$. En esta situación:

$$n = \frac{\text{sen}[(\delta_{\min} + A)/2]}{\text{sen}(A/2)}$$

[22-7]

Este ángulo δ_{\min} se denomina ángulo de **desviación mínima**.

En la práctica, δ no se puede calcular haciendo uso de la fórmula 22-6, ya que los ángulos de incidencia y refracción (i y e) se miden respecto a la perpendicular a la cara del prisma, cosa que no puede determinarse fácilmente en el laboratorio. Sin embargo, considerando que δ es la desviación que sufre el ángulo de incidencia i , podremos medir directamente su valor haciendo uso del disco óptico.

MÉTODO

1.- Determinación del índice de refracción del cuerpo semicircular.

Coloca el diafragma de rendija solidario con la lámpara de experimentación en la posición "0 cm" del banco óptico, como indica la foto inicial.

Coloca la lente convergente (de distancia focal $f=10$ cm) a unos 10 cm de la fuente de luz, junto con el otro diafragma de rendija en posición vertical sobre el portadiafragma. De esta manera, la lámpara queda en el plano focal de la lente. La posición de este conjunto debe ajustarse (en distancias y en alineación) de forma que el haz luminoso, tras atravesarlo, sea lo más fino posible (y menor que la precisión del disco óptico graduado).

Tras la lente con su diafragma, coloca el disco óptico graduado, con el pie magnético ligeramente inclinado de manera que el haz incida a ras con el disco. Asegúrate de que dicho haz pase exactamente por el centro de giro del disco óptico. De esta forma, aparecerá una traza luminosa o "rayo de luz" sobre el disco graduado, alineada con uno de sus diámetros.

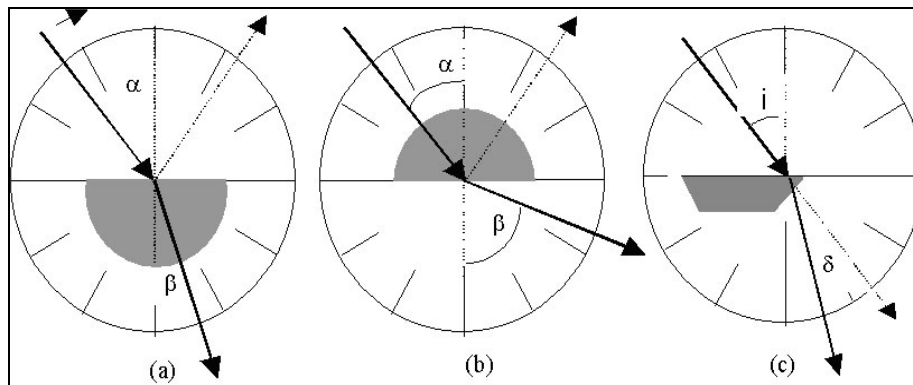


Figura [22-3]

(a) Refracción aire \rightarrow vidrio

Coloca el cuerpo semicircular sobre el disco graduado con su borde plano enfrentado a la fuente luminosa (figura [22-3.a]). Gira ligeramente el disco graduado de modo que el haz de luz quede perpendicular a la cara plana del cuerpo semicircular: en esta situación $\alpha = \beta = 0$, ya que coinciden las direcciones de los rayos incidente y refractado. La dirección del rayo incidente define entonces la dirección del eje óptico y con ello el origen de medida de ángulos de incidencia y refracción.

Gira 5° el disco óptico, sin desplazar el objeto de vidrio, leyendo los ángulos de incidencia α y de refracción β . Repite esta operación, variando el ángulo de incidencia α de 5° en 5° . Rellena la tabla correspondiente junto con los valores calculados del índice de refracción del cuerpo semicircular, n , usando la ecuación [22-2] y utilizando la aproximación $n_{\text{aire}} = 1.00$.

(b) Refracción vidrio → aire

Se procede como en el caso anterior, pero colocando el cuerpo semicircular como se indica en la figura [22-3.b]. (También ha de buscarse primero la posición correspondiente a $\alpha = \beta = 0$, para la cual no hay desviación del rayo refractado).

Rellena la tabla correspondiente junto con los valores calculados del índice de refracción del cuerpo semicircular, n , usando la ecuación [22-2] y utilizando la aproximación $n_{\text{aire}} = 1.00$.

Observa que, al ir aumentando el ángulo de incidencia, llegamos a una situación en que se produce el fenómeno de reflexión total, cuando el ángulo de incidencia coincide con el ángulo límite (ec. [22-3]). Nótese que la reflexión total sólo puede producirse al pasar de un medio a otro menos refringente, como es del vidrio al aire y no al revés.

Anota el ángulo límite experimental y comprueba que se cumple la ecuación [22-4].

2.- Ángulo de desviación mínima e índice de refracción del prisma.

Para hallar el ángulo de desviación mínima δ_{min} producido por un prisma óptico se procede igual que en el apartado 1, sustituyendo el disco de vidrio por el prisma, el cual se coloca como indica la figura [22-3.c].

Los valores de los dos ángulos diedros del prisma son 45° y 60° . El estudio de esta desviación se hará sólo para el ángulo $A = 45^\circ$ y considerando las componentes roja y violeta del espectro de refracción.

Gira el disco graduado, *sin tocar el prisma*, y observa cómo se modifican los diferentes ángulos de salida "e" de las componentes roja y violeta del haz de rayos emergente (figura [22-2]).

Rellena la tabla con los valores del ángulo i de incidencia y de los ángulos δ correspondientes a los colores rojo y violeta.

Representa en papel milimetrado el valor medio de los ángulos de desviación δ de ambas componentes (roja y violeta) frente a los valores de i . A partir de este gráfico, determina el valor mínimo de δ (es decir, el ángulo de desviación mínima, δ_{min}), tanto para el color rojo como para el violeta.

Con el valor de δ_{min} obtenido gráficamente para cada color y utilizando la ecuación [22-7], determina el valor del índice de refracción n del prisma. A partir de estos dos valores de n , muy parecidos, calcula el correspondiente valor medio del índice de refracción del prisma óptico.

Nombre		Apellidos	
Curso		Grupo	
Fecha		Letra de prácticas	

DATOS EXPERIMENTALES

Indica en la tabla la precisión de las medidas directas realizadas, tanto en unidades de grados como en radianes:

<i>APARATO DE MEDIDA</i>	<i>PRECISIÓN (unidades)</i>
Disco óptico graduado (grados)	
Disco óptico graduado (radianes)	

Rellena las siguientes tablas con tus medidas directas, expresadas en concordancia con su precisión e indicando siempre las unidades correspondientes:

1.- Determinación del índice de refracción del cuerpo semicircular.**(a) Refracción aire → vidrio**

Ángulo de incidencia ($\alpha \pm \Delta\alpha$)	Ángulo de refracción ($\beta \pm \Delta\beta$)

(b) Refracción vidrio → aire

Ángulo de incidencia ($\alpha \pm \Delta\alpha$)	Ángulo de refracción ($\beta \pm \Delta\beta$)

Ángulo límite experimental

--

2.- Ángulo de desviación mínima e índice de refracción del prisma.

($i \pm \Delta i$)	($\delta_{\text{rojo}} \pm \Delta\delta_{\text{rojo}}$)	($\delta_{\text{violeta}} \pm \Delta\delta_{\text{violeta}}$)

Nombre		Apellidos	
Curso		Grupo	
Fecha		Letra de prácticas	

RESUMEN DE RESULTADOS

NOTA: En los cálculos de la incertidumbre Δn , correspondiente a la medida indirecta del índice de refracción del cuerpo semicircular, los errores de medida directa de los ángulos de incidencia y refracción (es decir, $\Delta\alpha$ y $\Delta\beta$) deben expresarse en **radianes**.

1.- Determinación del índice de refracción del cuerpo semicircular.

Desarrolla, en esta hoja, la fórmula genérica de la incertidumbre de la medida indirecta del índice de refracción del cuerpo semicircular, Δn , haciendo uso de la ley de Snell, en los casos aire \rightarrow vidrio (A-V) y vidrio \rightarrow aire (V-A).

FÓRMULAS GENÉRICAS CALCULADAS

$\Delta n (A \rightarrow V)$	
$\Delta n (V \rightarrow A)$	

A partir de los datos de los ángulos de incidencia α y de refracción β tomados en el laboratorio, tanto para el caso de refracción aire \rightarrow vidrio como para el de vidrio \rightarrow aire, calcula los valores obtenidos para el índice de refracción n del cuerpo semicircular, y para sus incertidumbres Δn . Indica explícitamente el cálculo de n y de Δn para una misma pareja de valores (α, β) en los casos de aire \rightarrow vidrio y de vidrio \rightarrow aire.

Rellena la tabla siguiente, redondeando convenientemente los valores en la columna de $(n \pm \Delta n)$ y en los resultados finales de $(\bar{n} \pm \Delta \bar{n})$:

Nota: en el cálculo de $\Delta \bar{n}$, derivar la fórmula que has empleado para el cálculo de la media.

(a) Refracción aire \rightarrow vidrio		
n	Δn	$(n \pm \Delta n)$

(b) Refracción vidrio \rightarrow aire		
n	Δn	$(n \pm \Delta n)$

\bar{n}	
$(\bar{n} \pm \Delta \bar{n})$	

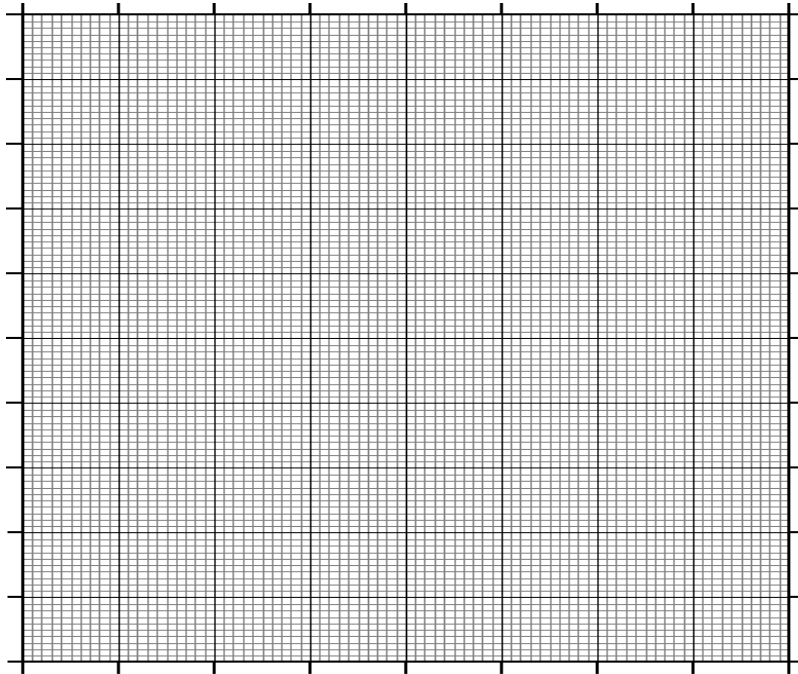
\bar{n}	
$(\bar{n} \pm \Delta \bar{n})$	

(c) Ángulo límite	
Experimental	
Teórico (ec. [22-3])*	

* Refleja a continuación el cálculo del ángulo límite que se obtiene según la ecuación [22-4], calculándolo a partir del valor medio \bar{n} del índice de refracción obtenido en (b):

2.- Ángulo de desviación mínima e índice de refracción del prisma.

Representa en papel milimetrado todos los valores de los ángulos de desviación δ (con símbolos diferentes para los casos del color rojo y del color violeta), frente a los correspondiente ángulos de incidencia (i).



A partir de la gráfica ($i-\delta_{rojo}$) e ($i-\delta_{violeta}$) determina el valor mínimo del ángulo de desviación, δ_{min} , y calcula el valor del índice de refracción n del prisma (ec. [22-7]). A partir de los dos valores obtenidos, muy parecidos, expresa el valor medio (n_{medio})

	δ_{min}	n
ROJO		
VIOLETA		

\bar{n}

CUESTIONES

(1) En el caso aire \rightarrow vidrio (figura 22-3-a), ¿por qué no puede existir reflexión total?

¿Por qué no se ve el rayo reflejado en la interfase semicircular vidrio \rightarrow aire?

(2) En el caso vidrio \rightarrow aire (figura 22-3-b) se observan dos rayos saliendo del objeto de vidrio. ¿Por qué?

¿Por qué uno de ellos sale con un ángulo $\beta = \alpha$?

(3) En el caso del prisma óptico (figura 22-3-c) ¿Cuál es el color del rayo emergente que sale con un ángulo β mayor?

¿Por qué?

¿Sabías que ...? Descartes demostró en 1637 (reduciendo el caso al estudio de la trayectoria de un rayo de luz dentro de una gota de agua esférica suspendida en la atmósfera), que el arco iris se observa, de espaldas al Sol, formando un radio angular de 42° con la línea que procede del Sol.

Observa que aunque el ángulo máximo que forma el rayo rojo es de 42° y el azul de 40° , vemos el color azul en el interior del arco y el rojo en el exterior. ¿Lo entiendes?

