

Refracción de la luz



Cuando un haz de rayos de luz se propaga por un medio homogéneo, transparente y toma contacto con otro medio transparente, se observa que parte de la luz, se refleja o sea regresa al mismo medio (reflexión) y parte pasa al otro medio. Al fenómeno físico que se produce cuando la luz cambia de medio de propagación se denomina refracción.

Refracción es el fenómeno físico que se produce cuando la luz cambia de dirección, al pasar de un medio transparente a otro medio también transparente con diferentes características.

Si los medios son diferentes, se observa que al pasar el rayo al nuevo medio, éste cambia su dirección. (Fig. 1)

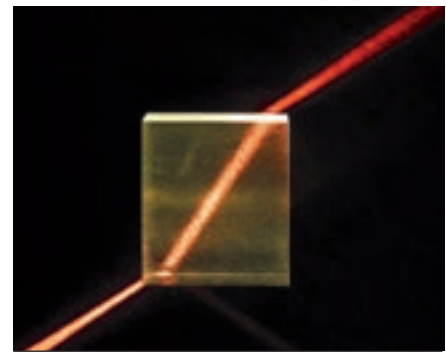


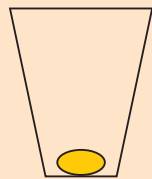
Fig. 1. Refracción da luz. La dirección del rayo incidente cambia, cuando cambia de medio.

Experimento

Para observar dicho fenómeno con claridad, te proponemos que realices el siguiente experimento en tu domicilio.

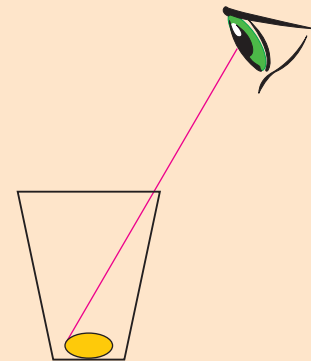
Primer paso.

Coloca una moneda en el fondo de un vaso vacío. Puede ser de cualquier material, lo importante es que sea opaco.



Segundo paso.

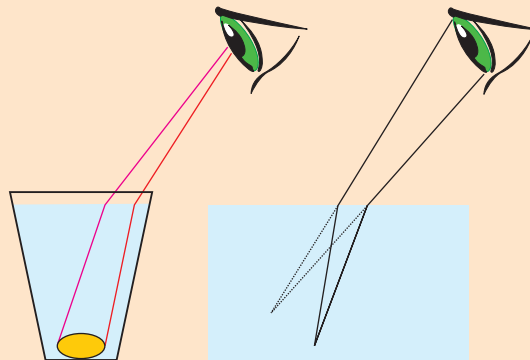
Mirando la moneda por encima del vaso, baja tu cabeza hasta que dejes de verla.



Tercer paso.

Dejando tu cabeza en la posición del paso anterior, o sea sin ver la moneda, comienza a llenar el vaso de agua.

¿Qué observas a medida que se llena el vaso de agua?
¿Ves ahora la moneda?



La refracción de la luz nos hace ver el fondo de una piscina más cerca de la superficie de lo que en realidad se encuentra

¿Esto tiene alguna relación con el experimento propuesto?

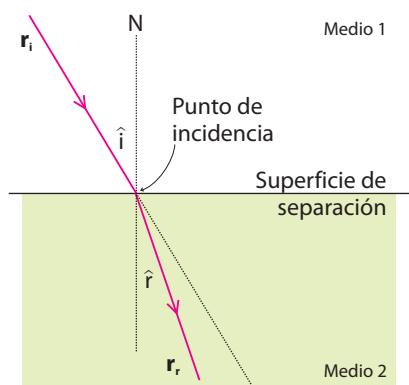


Fig. 2. Rayo de luz que se refracta, cambia de dirección al pasar del medio 1 al medio 2. (Omitimos dibujar el rayo reflejado, para centrar nuestra atención únicamente en el fenómeno de refracción y visualizarlo con mayor claridad).

Definiciones importantes

A continuación definiremos términos, los cuales deberás tener claro desde el comienzo para comprender el fenómeno de la refracción.

Denominaremos:

- **Superficie de separación de los medios**, al límite de separación entre los medios. (Fig. 2)
- **Rayo incidente**, al rayo que viaja por el medio 1 e incide sobre la superficie de separación con el otro medio. Lo representaremos r_i , de igual manera que en el fenómeno físico anterior (reflexión). (Fig. 2)
- **Rayo refractado**, al rayo que viaja por el medio 2 y que surge de la refracción del rayo incidente. Lo escribiremos r_r . (Fig. 2)

Punto de incidencia, al punto de la superficie de separación donde entra en contacto el rayo incidente. (Fig. 2)

• **Normal**, a la recta perpendicular a la superficie de separación que pasa por el punto de incidencia. La representamos con la letra **N**. (Fig. 2)

• **Ángulo de incidencia o ángulo incidente**, al ángulo formado entre el rayo incidente y la normal. Se representa \hat{i} .

• **Ángulo de refracción o ángulo refractado**, al ángulo formado entre la normal y el rayo refractado. Lo escribiremos \hat{r} .

Generalmente el rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en un mismo plano (en muy pocas sustancias cristalinas esto no sucede).

Observando en la figura se aprecia claramente que la dirección del rayo incidente y refractado no es la misma y que **los ángulos de incidencia y refracción son diferentes**.

$$\hat{i} \neq \hat{r}$$

Recuerda

Para simbolizar la **velocidad de la luz** en el vacío, universalmente se utiliza la letra **c** y su valor con tres cifras significativas es:

$$c = 3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Índice de refracción

Hemos visto que la luz tiene una velocidad finita y que su medición se logró después de muchos intentos por parte de varios científicos. Su valor es enorme para la escala de velocidades que manejamos habitualmente, aproximadamente tres millones de veces superior que la velocidad de un coche de fórmula 1.

La velocidad de la luz es diferente de acuerdo al medio en el cual se propaga y **siempre** será menor al valor de la velocidad de la luz en el vacío, "c". (Fig. 3)

Definimos el índice de refracción absoluto de un medio, al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en ese medio. Lo representamos con la letra "n" minúscula

$$n = \frac{c}{v}$$

Ejemplo 1: Cálculo del índice de refracción (n) del agua

Conociendo la velocidad de la luz en el agua $v = 2,25 \times 10^8 \frac{m}{s}$, calcularemos el índice de refracción del agua. Utilizaremos la ecuación de definición del índice de refracción $n_{H_2O} = \frac{c}{v_{H_2O}}$

$$n_{H_2O} = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}}{2,25 \times 10^8 \frac{m}{s}} = 1,33 \quad \boxed{n_{H_2O} = 1,33}$$

Medio	Velocidad (m/s)
Aire	$3,00 \times 10^8$
Agua	$2,25 \times 10^8$
Vidrio	$2,00 \times 10^8$
Diamante	$1,24 \times 10^8$

Fig. 3. Velocidad de propagación de la luz en diferentes medios.

Al realizar el cociente entre las velocidades, la unidades se cancelan. Por lo tanto **el índice de refracción no tiene unidad.**

El índice de refracción absoluto es un propiedad característica. Por lo tanto a partir de él, podemos identificar a una sustancia. En la tabla adjunta (fig. 4) observamos los valores de dicho índice correspondientes a algunos medios.

Ley de Snell

Como ya vimos el ángulo de incidencia \hat{i} es diferente del ángulo de refracción \hat{r} . Por lo tanto se nos plantea la siguiente pregunta.

¿Existirá alguna relación entre los valores de dichos ángulos ?

El matemático y astrónomo holandés W. Snell realizando experimentos, encontró que el cociente entre los senos de dichos ángulos, es constante. Expresado matemáticamente:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \text{cte}$$

Esta constante depende de las características de los medios y está relacionada con las velocidades de propagación.

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Medio	Índice de refracción
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Benceno	1.50
Aire (1 atm y 20°C)	1.0003
Ambar	1.55
Diamante	2.42
Vidrio (crown)	1.52
Vidrio (flint denso)	1.66
Cloruro de sodio	1.53

Fig. 4. Tabla de índice de refracción de algunas sustancias.

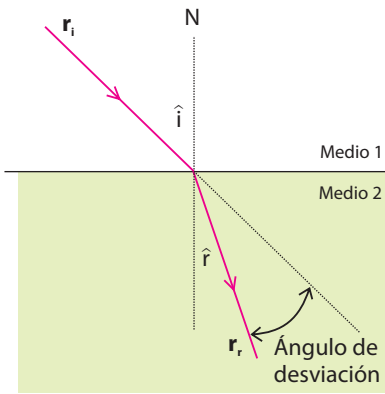


Fig. 5. Científicos anteriores a Snell no llegaron a enunciar la ley por él descubierta ya que centraban su estudio en el ángulo de desviación.

Al cociente $\frac{n_2}{n_1}$ lo definimos: **índice de refracción relativo del medio 2 con respecto al 1**, o sea $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$

También podemos relacionar la constante de proporcionalidad del cociente de los senos de los ángulos, con la velocidad de propagación de la luz en los medios. Recordando la definición de índice de refracción.

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Entonces
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}}$$

Para simplificar la expresión, invertimos el denominador, realizamos el producto de las fracciones y cancelamos "c":

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{c}{v_2} \times \frac{v_1}{c} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Entonces nos queda:
$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Estas ecuaciones son diferentes expresiones de la Ley de Snell.

Aplicaciones de la Ley de Snell

Utilizando esta ley, estamos en condiciones de analizar qué ocurrirá con la dirección de un rayo cuando pasa de un medio transparente a otro.

En todos los casos que vamos a trabajar los ángulos \hat{i} y \hat{r} variarán entre 0° y 90° . $0^\circ \leq \hat{i} < 90^\circ$, $0^\circ \leq \hat{r} < 90^\circ$

Si $n_2 > n_1$ implica que $\text{sen } \hat{r} < \text{sen } \hat{i}$ por lo tanto $\hat{r} < \hat{i}$, entonces el rayo refractado se acerca a la normal. (Fig. 6)
La velocidad de la luz en el medio 1 es mayor que en el 2.

Si $n_2 < n_1$ implica que $\text{sen } \hat{r} > \text{sen } \hat{i}$ por lo tanto $\hat{r} > \hat{i}$, entonces el rayo refractado se aleja de la normal. (Fig. 7)
La velocidad de la luz en el medio 2 es mayor que en el 1.

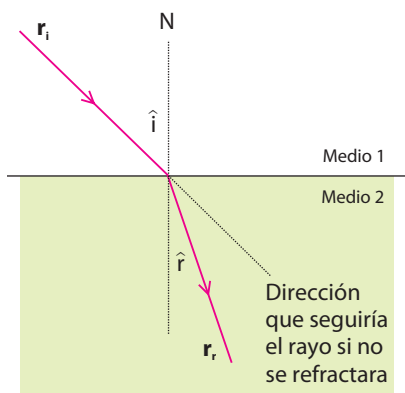


Fig. 6. Refracción de la luz cuando $n_2 > n_1$. El rayo refractado se acerca a la normal.

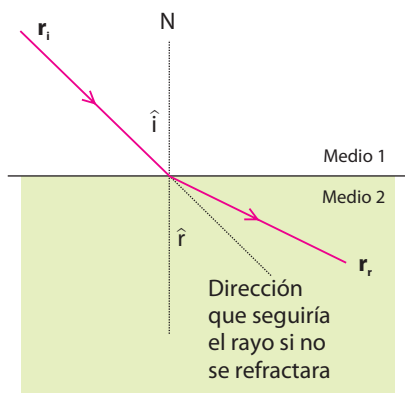


Fig. 7. Refracción de la luz cuando $n_2 < n_1$. El rayo refractado se aleja de la normal.

Ejemplo 2

Un rayo de luz incide desde el aire en la superficie del agua de una piscina, desviándose como muestra el dibujo.

- a) Determina el índice de refracción relativo del agua con respecto al aire.

Utilizando la Ley de Snell

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \text{ donde } \hat{i} = 41,7^\circ \quad \hat{r} = 30,0^\circ$$

n_1 es el índice de refracción del aire, que podemos considerarlo 1,00. Sustituyendo

$$\frac{\sin 41,7^\circ}{\sin 30,0^\circ} = \frac{n_2}{1,00} \quad \frac{0,665}{0,500} = n_2 \quad \boxed{n_2 = 1,33}$$

Un resultado ya conocido. ¡Verifícalo en la tabla!

- b) Determina la velocidad de la luz en el agua.

Recordando que $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$

Sustituyendo $1,33 = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}}{v_2}$

Despejando queda $v_2 = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}}{1,33}$

$$v_2 = 2,25 \times 10^8 \frac{m}{s} \quad \text{Velocidad de la luz en el agua}$$

- c) Otro rayo incide en la misma piscina con un ángulo de incidencia de $65,2^\circ$. Determina el ángulo de refracción.

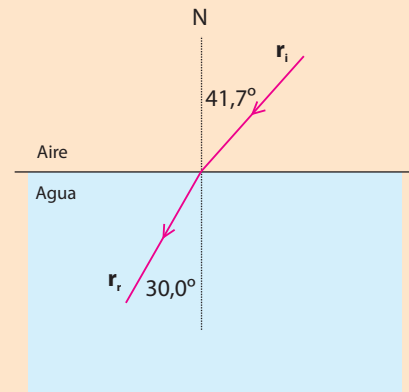
Nuevamente utilizamos a Snell $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$

Sustituimos $\frac{\sin 65,2^\circ}{\sin \hat{r}} = \frac{1,33}{1,00}$

Despejamos y queda $\frac{\sin 65,2^\circ}{1,33} = \sin \hat{r}$

$\frac{0,908}{1,33} = \sin \hat{r} \quad 0,683 = \sin \hat{r}$

$\sin^{-1} 0,683 = \hat{r} \quad \boxed{\hat{r} = 43,1^\circ}$



Exceptuando aquellos casos donde se requiera mucha precisión (5 cifras significativas), **consideraremos el mismo valor para los índices de refracción de un medio con respecto al aire y al vacío.**

Recordando Matemática

\sin^{-1} , también llamada arc sen o arcoseno es la función inversa a $\sin \alpha$.

Nos permite saber qué ángulo corresponde a determinado valor de la función seno.

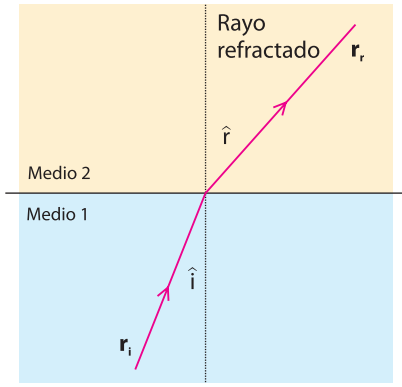


Fig. 8. Refracción común

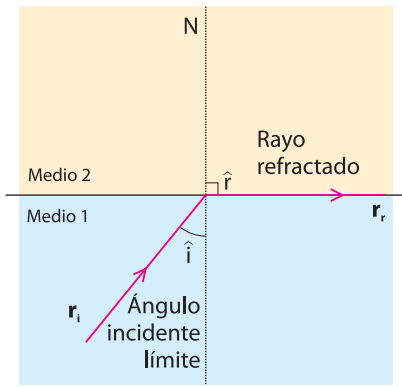


Fig. 9. El rayo refractado queda paralelo a la superficie de separación.

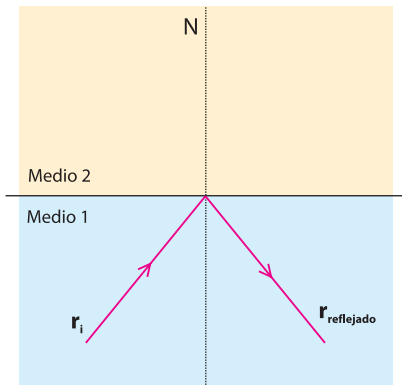


Fig. 10. Reflexión total interna. No hay refracción.

Reflexión total interna

En la figura 8 vemos un rayo de luz que pasa de un medio de mayor índice de refracción a uno de menor, $n_1 > n_2$. Recuerda que al darse esta situación, **los rayos refractados se alejan de la normal**.

En estas condiciones el ángulo de refracción \hat{r} es mayor que el ángulo de incidencia \hat{i} . Si vamos aumentando el ángulo \hat{i} también irá aumentando el ángulo \hat{r} , hasta que llega un momento en que el ángulo de refracción se hace igual a 90° , quedando el rayo refractado paralelo a la superficie de separación. (Fig. 9)

Para el ángulo máximo de refracción $\hat{r} = 90^\circ$, le corresponde un ángulo de incidencia \hat{i} , al que llamaremos ángulo incidente límite \hat{i}_L .

Si un rayo incide sobre una superficie, de tal manera que el ángulo incidente es mayor \hat{i}_L que **no se produce refracción**, toda la luz se refleja. O sea toda la luz incidente en la superficie cambia de dirección sin cambiar de medio. A este fenómeno físico se le denomina Reflexión Total Interna. (Fig. 10).

La reflexión total interna, se produce cuando el ángulo incidente es mayor que el ángulo límite.

En síntesis a medida que va aumentando el ángulo de incidencia el fenómeno de reflexión es cada vez más importante. Por el contrario el fenómeno de refracción es cada vez menor hasta que no se produce.

Determinación del ángulo incidente límite \hat{i}_L

Recordando la Ley de Snell: $\frac{\text{sen } \hat{i}_L}{\text{sen } 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ como $\text{sen } 90^\circ = 1$

$$\text{sen } \hat{i}_L = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Por lo tanto} \quad \hat{i}_L = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Ejemplo 3

a. ¿Cuál es el mayor ángulo de incidencia posible para que un rayo de luz que incide desde el agua al aire se refracte?

El mayor ángulo de incidencia posible en este caso es el ángulo límite \hat{i}_L correspondiente a los medios agua-aire.

Utilizando $\text{sen } \hat{i}_L = \frac{n_2}{n_1}$

Sustituimos $\text{sen } \hat{i}_L = \frac{1,00}{1,33} \quad \text{sen } \hat{i}_L = 0,752$

Ya conocemos la función sen^{-1} , entonces $\text{sen}^{-1} 0,752 = \hat{i}_L$

$$\hat{i}_L = 48,8^\circ$$

- b. ¿Qué le ocurre al rayo refractado si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo calculado en la parte a)?

Si el ángulo de incidencia supera los $48,8^\circ$, se producirá reflexión total interna. No habrá rayo refractado y si rayo reflejado (Fig. 11).

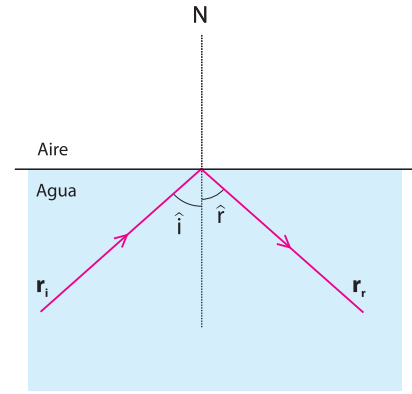


Fig. 11. Ejemplo 3

Fibras ópticas

Una importante aplicación de la reflexión total interna son las fibras ópticas. (Fig. 12). Están formadas por un núcleo de plástico o vidrio, rodeado de una "vaina" de material con un índice de refracción ligeramente inferior. Un rayo de luz que ingrese al núcleo "viajará" dentro de él sufriendo sucesivas reflexiones totales internas (Fig. 13). De esta forma se puede enviar información utilizando la luz como vehículo, en lugar de utilizar las variaciones de una corriente eléctrica a través de un cable de cobre. Entre las ventajas que ofrece, podemos resaltar el gran "ancho de banda", o sea que la fibra óptica permite un flujo mayor de información que el cable de cobre. También son muy flexibles y livianas, y la transmisión de información en su interior ocurre con muy baja atenuación.

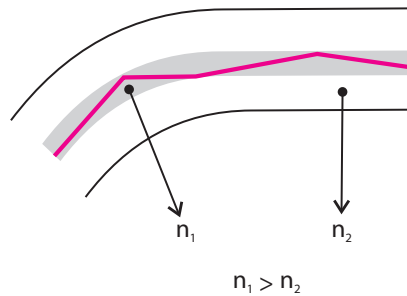


Fig. 13 Interior de una fibra óptica. El haz de luz (rojo) se propaga, realiza múltiples reflexiones en el medio N° 1 (interior) de mayor índice de refracción que el medio 2 (externo)



Fig. 12. Fibras ópticas.

El diámetro de la fibra óptica es similar al de un cabello humano.

El diámetro del núcleo que transmite la luz mide entre 10 y 50 micrómetros.

1 micrómetro es la millonésima parte de un metro.

La Refracción según Fermat

Otra manera de explicar el fenómeno de refracción, fue propuesta por **Pierre de Fermat**, a partir de su propio **principio de tiempo mínimo**, que sostenía:

La luz se propaga siempre a lo largo de aquella trayectoria que le suponga el mínimo tiempo, incluso si para lograrlo tuviera que desviarse del camino geoméricamente más corto.

¿Es una recta el camino más rápido entre dos puntos? No siempre. (Fig. 14)

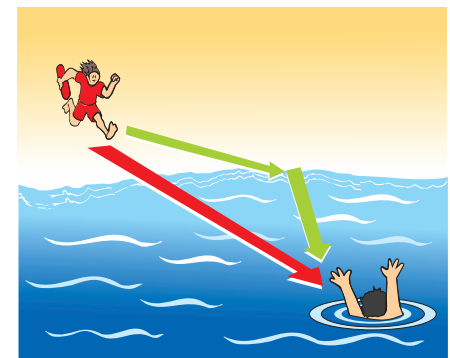


Fig. 14. El guardavidas debe llegar lo antes posible a rescatar al bañista en problemas. Como es más rápido corriendo que nadando, emplea menos tiempo siguiendo el camino verde, que si realizara el camino rojo.

El índice de refracción varía con el color de la luz

Si iluminamos con luz roja el vidrio crown y medimos los ángulos de incidencia y refracción para luego calcular el índice de refracción de dicho vidrio, se obtiene un valor de $n = 1,513$. En cambio si hacemos el experimento con el mismo vidrio, pero ahora iluminado con luz violeta, obtenemos que el índice de refracción es $n = 1,532$. Esto muestra que cada color se refracta con un ángulo levemente distinto. El violeta es el que más se desvía, el rojo el que menos.

Si un rayo de luz blanca incide sobre una de las caras de un prisma en el ángulo apropiado sufre dos refracciones que nos permiten "separar" la luz blanca en los colores que la forman. A este continuo de colores se le llama espectro de luz visible. (Fig. 15)

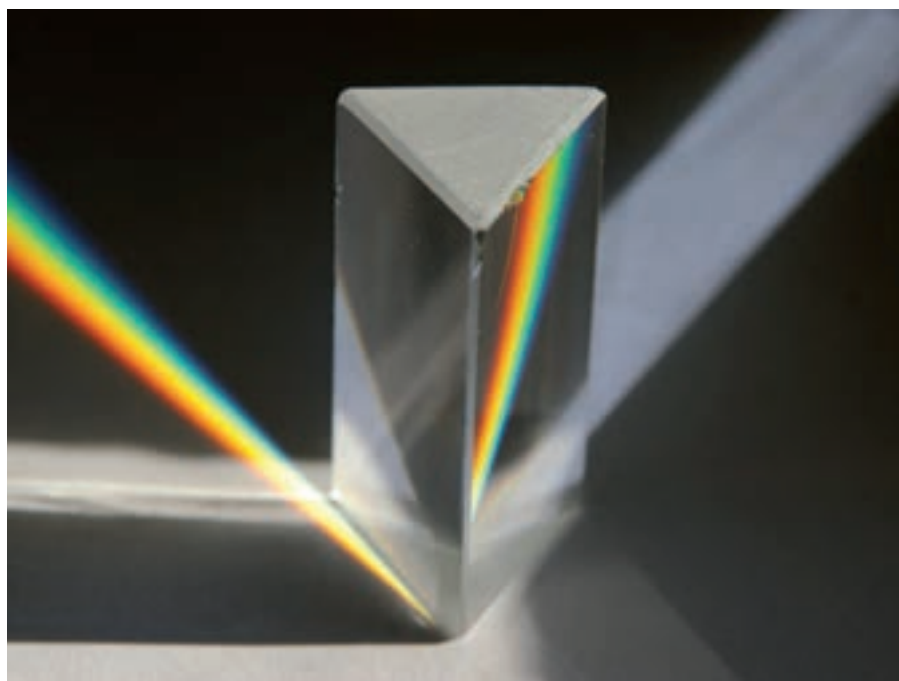


Fig. 15. Espectro de luz visible.

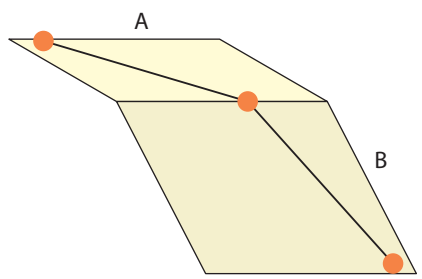


Fig. 16. Pelota que baja por el plano inclinado A, cuando pasa al plano B se desvía acercándose a la normal.

La refracción y el modelo corpuscular

El modelo corpuscular de propagación de la luz no explicaba satisfactoriamente la refracción, ya que preveía que un rayo (o un chorro de partículas) se debía acercar a la normal si la velocidad en el medio 2 era mayor que en el medio 1. Veamos este ejemplo para entenderlo un poco más. Una pelotita se mueve sobre el plano inclinado A como muestra la figura 16. Al llegar al borde, donde comienza el plano B aumenta su velocidad y se desvía, "acercándose a la normal". Puedes realizar este sencillo experimento si lo deseas.

O sea que la velocidad de propagación de la luz en el agua debía ser mayor que en el aire. La evidencia experimental demostró que esto no era así, lo cual fue un duro golpe para el modelo corpuscular.

PREGUNTAS

- 1) ¿En qué consiste la refracción? ¿Cuáles son las leyes que la rigen?
- 2) ¿Cómo se definen los índices de refracción absoluto y relativo? ¿Qué unidades tienen?
- 3) Cuando un rayo de luz pasa de un medio transparente a otro, ¿de qué depende que se acerque o aleje de la normal?
- 4) ¿Por qué el índice de refracción es una propiedad característica? Nombra otras propiedades características que hayas estudiado en cursos anteriores.
- 5) Explica la Ley de Snell. Escríbela en función de las velocidades y de los índices de refracción.
- 6) ¿Por qué el modelo corpuscular no explica satisfactoriamente la refracción de la luz?
- 7) ¿Qué es la reflexión total interna?
- 8) Para que se produzca la reflexión total interna, ¿la luz debe viajar más rápido en el medio 1 o en el medio 2?
- 9) ¿Qué es una fibra óptica? Menciona alguna de sus aplicaciones en el campo de la medicina.
- 10) ¿Qué es un crepúsculo y qué relación tiene con lo estudiado en este capítulo?



- 11) Explica por qué un remo parece quebrado cuando está sumergido parcialmente en el agua.
- 12) Sobre el asfalto en un día muy caluroso suele verse un poco "borroso" (Fig. 17) Esto ocurre porque
 - a) nuestros ojos se ven alterados por la excesiva temperatura.
 - b) la luz no se propaga en línea recta al atravesar capas de aire a diferentes temperaturas.
 - c) el vapor de agua deforma las imágenes.
 - d) la luz se refleja en la superficie del asfalto.
 Indica y justifica cuál de las anteriores afirmaciones es la correcta.



Fig. 17. Pregunta N° 12

$i(^{\circ})$	$r(^{\circ})$
0,0	
23,5	
	21,2
73,0	

Fig. 18. Problema 2.

PROBLEMAS

- Utilizando los índices de refracción que aparecen en la tabla correspondiente (Fig. 4), determina el valor de la velocidad de la luz en el ámbar, el alcohol etílico y el vidrio flint.
- Un rayo de luz incide sobre la superficie de separación entre el aire ($n=1,00$) y el vidrio ($n=1,52$). Utilizando la ley de Snell completa la tabla adjunta (Fig. 18).

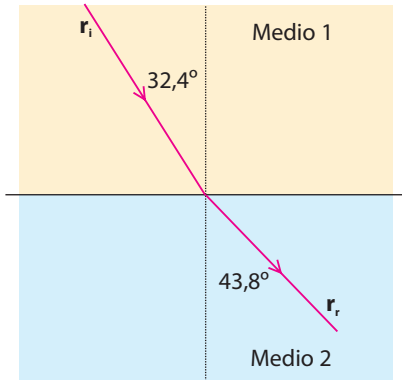


Fig. 19. Problema 3.

- Un rayo de luz sigue la trayectoria del dibujo al pasar del medio 1 al medio 2. (Fig. 19). Sabiendo que $n_1=1,40$ determina:
 - n_2
 - la velocidad de la luz en cada medio.
- Un rayo de luz se propaga en el aire e incide sobre la superficie de un vidrio crown, formando un ángulo de $60,0^{\circ}$ con respecto a la normal. Utilizando los datos que aparecen en el texto determina el ángulo de refracción para el color rojo
 - Determina el ángulo de refracción para la luz violeta. ¿son muy diferentes?

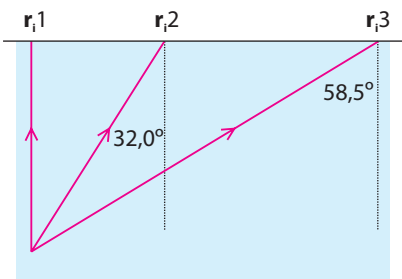


Fig. 20. Problema 5.

- Un foco debajo del agua emite luz en tres direcciones diferentes como muestra el dibujo. (Fig. 20). Continúa la trayectoria de cada rayo, calculando los ángulos correspondientes.
- Determina el ángulo límite para rayos de luz que van desde el diamante al agua.
- Dibuja la trayectoria seguida por el rayo de luz luego de incidir como muestra la figura 21 a y b. Determina los ángulos correspondientes.

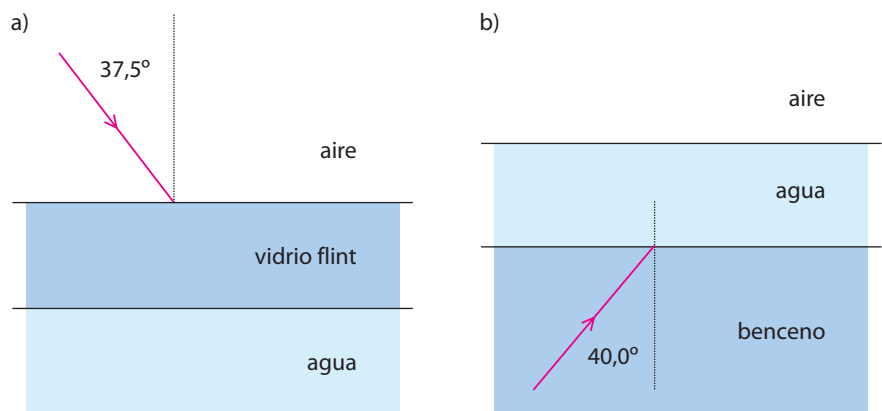


Fig. 21. Problema 7.