11 LA LUZ Y SUS PROPIEDADES

11.1. NATURALEZA DE LA LUZ

1. Busca en la bibliografía información acerca de la controversia que mantuvieron Huygens y Newton acerca de la naturaleza de la luz.

Con esta actividad se pretende que los alumnos y las alumnas redacten un breve informe en el que se profundice en el perfil científico de Newton y Huygens. No deben faltar en él referencias a otros científicos que mantuvieran opiniones enfrentadas con la descripción de Newton acerca de la naturaleza de la luz, como es el caso, principalmente, de Hooke.

2. ¿Por qué se resistió tanto la mayoría de la comunidad científica a aceptar que la luz es una onda, de tipo electromagnético?

Newton era partidario del carácter corpuscular de la luz. Dado su gran prestigio en la época, muchos otros científicos se mostraron reticentes a aceptar el modelo ondulatorio, por contradecir la hipótesis de Newton.

11.2. PROPAGACIÓN RECTILÍNEA DE LA LUZ

1. Compara las velocidades de propagación, en el aire, de la luz y del sonido. ¿Son comparables estas dos velocidades?

El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, y la velocidad de la luz en el medio:

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

Dado que el índice de refracción del aire es la unidad, la velocidad de propagación de la luz en el aire es:

$$v_{luz}\,(\text{aire}) = \frac{c}{n_{aire}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La velocidad del sonido en el aire es:

$$v_{sonido}\,(\text{aire}) = 340 \text{ m/s}$$

La relación entre ambas velocidades es:

$$\frac{v_{luz}\,(\text{aire})}{v_{sonido}\,(\text{aire})} = \frac{3 \cdot 10^8}{340} = 882\,352{,}9$$

Es decir, la luz se propaga en el aire a una velocidad que es 882 352,9 veces la que le corresponde al sonido.

2. Si vas a ver un castillo de fuegos artificiales podrás comprobar que se ve antes la luz de las carcasas cuando estallan y, un tiempo después se oye el sonido de la carcasa que ha estallado. Diseña un experimento que permita medir la distancia a la que te encuentras del punto en que estalla una carcasa.

Teniendo en cuenta el valor de la velocidad de propagación de la luz en el aire, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, podemos considerar que el intervalo de tiempo que transcurre entre la explosión y la llegada de su imagen a nuestros ojos es descreciable, prácticamente cero.

Sin embargo, el intervalo de tiempo que transcurre entre la explosión y el instante en que el ruido de esta llega a nuestros oídos sí es apreciable. Si disponemos de un cronómetro, podemos obtener el tiempo que transcurre desde que se ve la luz hasta que el sonido de la explosión alcanza nuestros oídos.

Si t es el tiempo obtenido, y teniendo en cuenta que v_{sonido} (aire) = 340 m/s, podemos obtener la distancia a que nos encontramos del punto en que estalla una carcasa aplicando la ecuación del movimiento rectilíneo uniforme:

$$v = \frac{x}{t} \rightarrow x = v \cdot t \rightarrow x = 340 \cdot t \text{ m}$$

En ella, el tiempo debe expresarse en segundos.

3. Calcula el tiempo que tarda un rayo de luz en viajar desde el Sol a la Tierra. Busca información respecto al diámetro de la órbita terrestre.

El diámetro de la órbita terrestre (distancia Sol-Tierra) es, aproximadamente, 150 millones de kilómetros. Por tanto, el tiempo que necesita la luz para llegar hasta la Tierra es:

$$v = c = \frac{\Delta s}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta s}{v} = \frac{150 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} = 500 \text{ s} = 8 \text{ min } 20 \text{ s}$$

4. ¿Es significativa la influencia de la distancia que separa Io de Júpiter en las experiencias de Röemer?

Sí que influye, ya que la luz habrá de recorrer una distancia distinta dependiendo de la posición del satélite Io. Sin embargo, la influencia es totalmente despreciable, ya que la distancia Tierra-Júpiter es varios órdenes de magnitud superior a la distancia Júpiter-Io. Por tanto, la medida no se alterará.

11.3. REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

1. El índice de refracción del agua respecto al aire es 4/3. ¿Qué se puede decir sobre la velocidad de la luz en el agua? Razona la respuesta.

El índice de refracción, n, de un medio es la relación entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, y la que le corresponde en dicho medio, v:

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

Por tanto:

$$\frac{n_{agua}}{n_{aire}} = \frac{\dfrac{c}{v_{agua}}}{\dfrac{c}{v_{aire}}} = \frac{n_{agua}}{n_{aire}} = \frac{v_{aire}}{v_{agua}} \rightarrow v_{agua} = v_{aire} \cdot \frac{n_{aire}}{n_{agua}}$$

Teniendo en cuenta que, al ser el índice de refracción del aire la unidad, la velocidad de propagación de la luz en él es: $v_{aire} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, obtenemos, para la velocidad de la luz en el agua:

$$v_{agua} = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{4/3} = 2{,}25 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. El índice de refracción del diamante es 2,5, y el de un vidrio, 1,4. ¿Cuál es el ángulo límite entre el diamante y el vidrio?

El ángulo límite lo alcanzarán los rayos que pasen del diamante al vidrio (del material más refringente al menos refringente). De ese modo, el rayo refractado se alejará de la normal.

Al aplicar la ley de Snell de la refracción, sustituir los datos de que disponemos y operar, obtenemos el valor del ángulo límite:

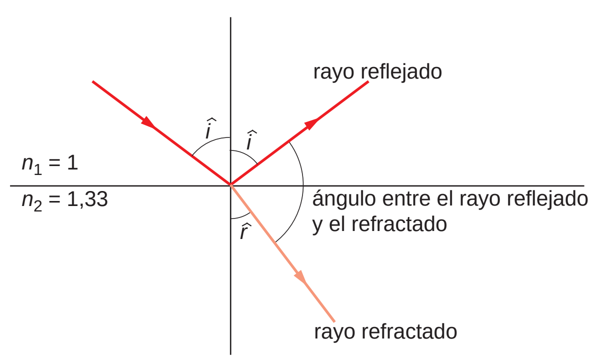
$$n_i \cdot sen\ \hat{i}_L = n_r \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow sen\ \hat{i}_L = \frac{n_r \cdot sen\ \hat{r}}{n_i} \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{i}_L = arcsen \left(\frac{n_r \cdot sen\ \hat{r}}{n_i} \right) = arcsen \left(\frac{1{,}4 \cdot sen\ 90°}{2{,}5} \right) = 34{,}06°$$

3. Un rayo de luz monocromática que se propaga en el aire incide sobre la superficie del agua, cuyo índice de refracción respecto al aire es 1,33.

Calcula el ángulo de incidencia sobre el agua para que el rayo reflejado sea perpendicular al rayo refractado.

La situación que propone el enunciado de la actividad es la que se muestra en la siguiente ilustración:



De acuerdo con ella, la relación entre los rayos reflejado y refractado debe ser:

$$180° - \hat{i} - \hat{r} = 90° \rightarrow \hat{r} = 90° - \hat{i}$$

Al aplicar la ley de Snell imponiendo la condición anterior, sustituir los datos y operar, obtenemos el valor del ángulo de incidencia solicitado:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_2 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow sen\ \hat{i} = \frac{n_2 \cdot sen\ \hat{r}}{n_1} = \frac{n_2 \cdot sen\ (90° - \hat{i})}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} \cdot cos\ \hat{i}$$

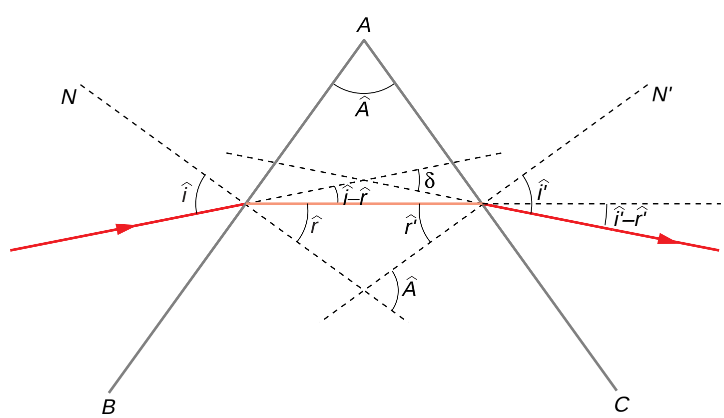
$$\frac{sen\ \hat{i}}{cos\ \hat{i}} = tg\ \hat{i} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{i} = arctg\ \frac{n_2}{n_1} = arctg\ \frac{1,33}{1} = 53,06°$$

11.4. LA DISPERSIÓN DE LA LUZ

1. Calcula el ángulo de desviación mínima de un prisma equilátero cuyo índice de refracción es 1,8. Analiza todas las situaciones posibles.

Sea $\hat{i}$ el ángulo de incidencia. Aplicando la ley de Snell a la primera refracción, resulta:

$$1 \cdot sen\ \hat{i} = 1,8 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow sen\ \hat{r} = 0,556 \cdot sen\ \hat{i}$$



Al aplicarla a la segunda refracción, y teniendo en cuenta que $\hat{A} = 60°$ por tratarse de un prisma equilatero, resulta:

$$1,8 \cdot sen\ \hat{r}' = 1 \cdot sen\ \hat{i}' \rightarrow sen\ \hat{i}' = 1,8 \cdot sen\ \hat{r}' = 1,8 \cdot sen\ [arcsen\ (60 - \hat{r})]$$

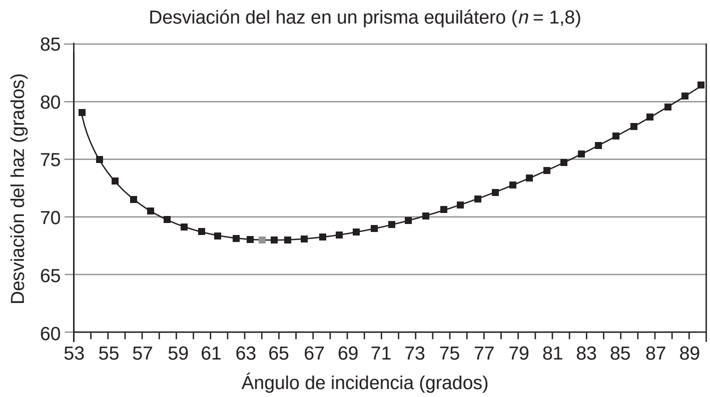
El ángulo que mide la desviación del rayo será, por tanto:

$$\delta = (\hat{i} - \hat{r}) + (\hat{i}' - \hat{r}') = (\hat{i} + \hat{i}') - (\hat{r} + \hat{r}') = (\hat{i} + \hat{i}') - \hat{A}$$

Si ponemos el ángulo de desviación en función de $\hat{i}$, resulta:

$$\delta = \hat{i} + arcsen\{1,8 \cdot sen[arcsen\ [60 - arcsen(0,556 \cdot sen\ \hat{i})]]\} - \hat{A}$$

Al dar valores a $\hat{i}$, obtenemos el resultado de la gráfica:



Como se aprecia en la gráfica, en el prisma que nos facilitan la desviación es mínima para un ángulo de incidencia de 64°, y resulta ser de 68,32°.

2. Indica las diferencias que, a tu juicio, existen entre los fenómenos de refracción y dispersión de la luz.

¿Puede un rayo de luz monocromática sufrir ambos fenómenos?

El fenómeno de dispersión de la luz es un caso particular de refracción que se da cuando se cumplen estas dos condiciones:

a) La luz se propaga en su medio material.

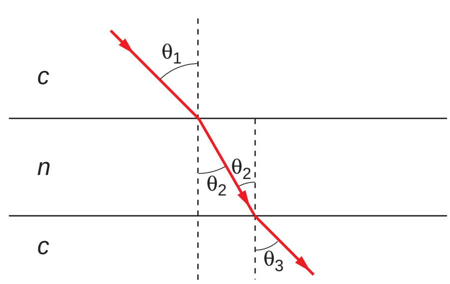
b) La luz no es monocromática.

Para explicar este fenómeno, debemos tener en cuenta que la velocidad de la luz en el vacío es igual para todas las longitudes de onda, mientras que en una sustancia material esa velocidad varía con la longitud de onda. Por tanto, el índice de refracción de una sustancia también será función de la longitud de onda.

Dado que la luz monocromática está contituida por ondas electromagnéticas de una sola longitud de onda, puede sufrir refracción, pero no dispersión.

3. ¿Por qué no se observa la dispersión de la luz blanca cuando atraviesa una lámina de vidrio de caras plano-paralelas?

Al aplicar la ley de Snell a este fenómeno, el ángulo de refracción que se obtiene (tras la segunda refracción; es decir, cuando el rayo sale de nuevo al aire) es igual al de incidencia, como se observa en la gráfica:



De acuerdo con ella:

$$\left.\begin{array}{l} c \cdot sen\ \theta_1 = n \cdot sen\ \theta_2 \\ n \cdot sen\ \theta_2 = c \cdot sen\ \theta_3 \end{array}\right\} \rightarrow sen\ \theta_1 = sen\ \theta_3 \rightarrow \theta_1 = \theta_3$$

11.5. NATURALEZA TRANSVERSAL DE LAS ONDAS LUMINOSAS

1. ¿Qué tipo de ondas pueden ser polarizadas? ¿Se puede polarizar una onda sonora? Justifica la respuesta.

Para polarizar una onda, es preciso que la dirección de vibración sea perpendicular a la dirección de propagación; es decir, que se trate de una onda transversal. El sonido es una onda longitudinal y resulta imposible polarizarla.

2. Durante el día, y con el cielo despejado, recibimos directamente la luz del Sol. Explica por qué recibimos también luz de color azul de todo el cielo.

El hecho de que veamos el cielo de color azul se debe a la dispersión que experimenta la luz blanca proveniente del sol cuando atraviesa la atmósfera.

Las moléculas del aire dispersan los tonos azules y violetas en todas las direcciones, y permiten que pasen los naranjas y rojos sin apenas dispersión, debido al tamaño de las moléculas de aire, pequeñas comparadas con la longitud de onda de los colores. Como ya sabes, cuanto más pequeña sea la longitud de onda, más se dispersará la luz. Por tanto, el color que más se dispersa es el violeta, seguido por el azul, pero como nuestro ojo es más sensible a este último, aparece como dominante.

Sin embargo, los atardeceres tienen un tono rojo-anaranjado. Esto es debido a que en ellos la luz que proviene del Sol recorre una distancia mayor dentro de nuestra atmósfera, con lo que los tonos violetas y azules sufren una dispersión tan grande que no llegan a nuestros ojos. Este fenómeno se denomina "efecto Rayleigh".

11.6. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DIFRACCIÓN

1. Sobre una superficie de cristal ennegrecida se graban dos líneas paralelas muy próximas, formando una doble rendija. Al iluminar esta doble rendija con una lámpara que proporciona luz amarilla se ve la correspondiente figura de difracción.

Al sustituir la lámpara amarilla por otra que emite luz de otro color, la nueva figura de difracción que se forma presenta una separación entre máximos mayor que en el supuesto anterior.

a) ¿Qué conclusión, acerca de la naturaleza de la luz, puede comprobarse a partir de las dos experiencias anteriores?

b) ¿Por qué están más separados los máximos de difracción en la segunda experiencia que en la primera?

c) Indica un color que pueda corresponder a la luz que emite la segunda lámpara.

a) Cada rayo luminoso tiene asociada una longitud de onda (y, en consecuencia, una frecuencia).

La distancia a la que se producen las interferencias, ya sean constructivas (puntos iluminados) o destructivas (puntos oscuros), depende de la longitud de onda.

Por eso, la separación entre máximos es distinta en la figura de difracción que se produce en cada caso, ya que depende de la longitud de onda de la luz que incide sobre las rendijas.

b) De acuerdo con la experiencia de Young, en los puntos en que la iluminación es máxima se cumple la siguiente relación:

$$d_1 - d_2 = n \cdot \lambda$$

$$a \cdot \frac{y}{D} = n \cdot \lambda$$

siendo y la distancia entre el máximo central y el máximo que ocupa la posición n a derecha o izquierda. Por tanto, la separación entre dos franjas brillantes será:

$$\Delta y = y_{n+1} - y_n = \frac{(n+1) \cdot \lambda \cdot D}{a} - \frac{n \cdot \lambda \cdot D}{a} = \frac{\lambda \cdot D}{a}$$

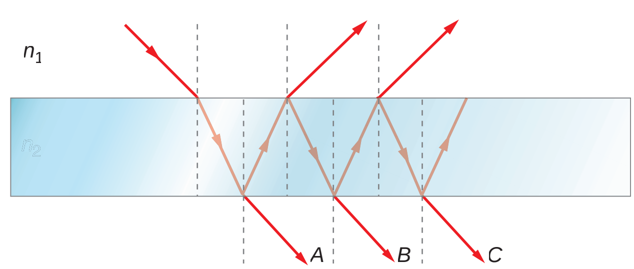
Al utilizar la segunda fuente luminosa, la distancia entre máximos, $d_1 - d_2$, es mayor. Por tanto, la longitud de onda de la radiación incidente es también mayor que la de la luz amarilla que incide en el primer caso.

c) Puede haberse iluminado con luz anaranjada o roja, a las que corresponde una longitud de onda mayor que a la luz amarilla.

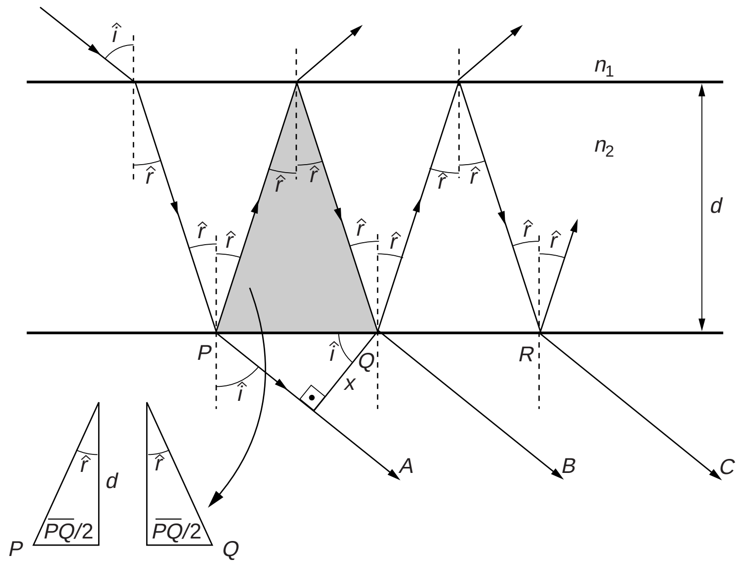
11.7. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS INTERFERENCIAS

1. Un rayo de luz incide sobre una lámina de caras plano-paralelas como se indica en la figura. El índice de refracción del material que forma la lámina es n_2 y se encuentra inmersa en un medio cuyo índice de refracción es n_1.

Determina la distancia que separa los rayos *A* y *B* y los rayos *B* y *C*.



Las distancias que separan el rayo *A* del rayo *B* y este último del rayo *C* deben ser iguales, ya que los ángulos de reflexión que se producen en el interior de la lámina de caras plano-paralelas son todos iguales, al tratarse de reflexiones que se producen en un único medio.



Este ángulo de reflexión interna es, a la vez, el ángulo de refracción del rayo que procede del medio 1, y podemos calcularlo aplicando la ley de Snell:

$$\frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{r} = arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i}\right)$$

Si ahora prestamos atención al triángulo sombreado, vemos que podemos dividirlo en dos triángulos rectángulos. De este modo, podemos calcular la distancia $\overline{PQ}$:

$$\overline{PQ} = \overline{QR} = 2 \cdot d \cdot tg\ \hat{r} = 2 \cdot d \cdot tg\left[arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i}\right)\right]$$

La distancia, x, que separa los rayos A y B, igual a la que separa los rayos B y C, será, por tanto:

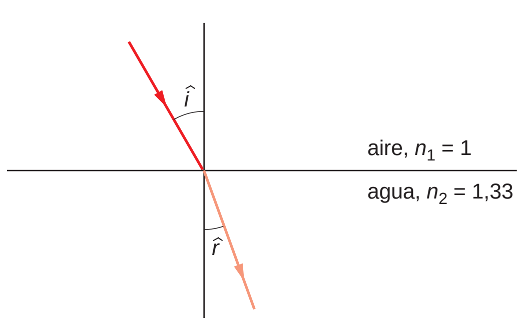
$$x = \overline{PQ} \cdot cos\ \hat{i} = 2 \cdot d \cdot tg\left[arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i}\right)\right] \cdot cos\ \hat{i}$$

ACTIVIDADES DE LA UNIDAD

CUESTIONES

1. **Cuando la luz pasa del aire al agua, ¿el ángulo de refracción es mayor, menor o igual que el ángulo de incidencia? Explica razonadamente la respuesta y dibuja el diagrama de rayos.**

   Cuando la luz pasa del aire al agua, el rayo refractado se acerca a la normal (perpendicular a la superficie de separación de ambos medios), como se muestra en la figura:



El índice de refracción del aire y del agua es:

$$n_{aire} = 1 \quad ; \quad n_{agua} = 1{,}33$$

Al aplicar la ley de Snell de la refracción:

$$n_{aire} \cdot sen\ \hat{i} = n_{agua} \cdot sen\ \hat{r}$$

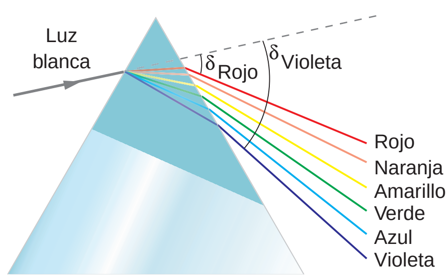
Como $n_{agua} > n_{aire}$, entonces:

$$sen\ \hat{i} > sen\ \hat{r} \rightarrow \hat{i} > \hat{r}$$

2. Dispones de un prisma de cuarzo. Indica qué le ocurre a un rayo de luz blanca que incide con cualquier ángulo en una de sus caras, justificando físicamente los fenómenos que ocurren.

La velocidad de la luz en el vacío es igual para todas las longitudes de onda, mientras que en una sustancia material, como un prisma de cuarzo, varía con la longitud de onda. Por tanto, el índice de refracción en una sustancia será también función de la longitud de onda. Debido a ello, en cualquier sustancia en la que varíe la velocidad de propagación con la longitud de onda y, por tanto, su índice de refracción sea distinto para cada una de ellas, la luz blanca se dispersará. Esto es lo que ocurre en el supuesto que plantea el enunciado.

La dispersión de la luz blanca mediante un prisma se muestra en la siguiente ilustración:



3. ¿Qué se entiende por refracción de la luz? Explica qué es el ángulo límite y, utilizando un diagrama de rayos, indica cómo se determina.

La refracción es el cambio de dirección de propagación que experimenta un rayo de luz cuando pasa de un medio a otro (siempre que el ángulo de incidencia sea distinto de 90°).

Supongamos ahora que tenemos un objeto en un medio y emite rayos de luz hacia otro medio cuyo índice de refracción es menor ($n_1 > n_2$). En ese caso, de acuerdo con la ley de Snell:

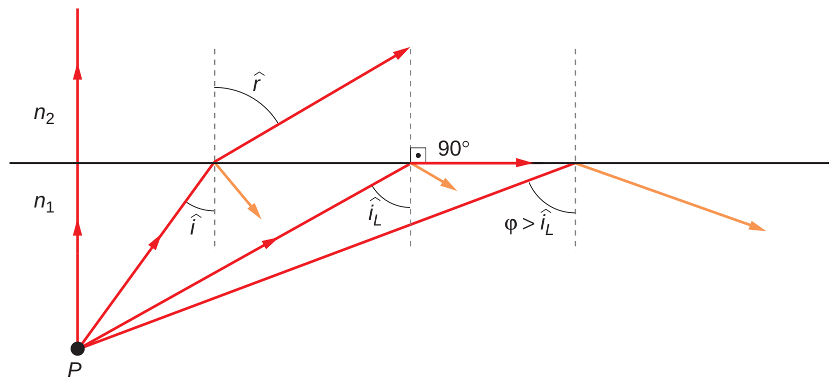
$$sen\ \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i} \rightarrow sen\ \hat{r} > sen\ \hat{i}$$

A medida que aumenta $\hat{i}$, $\hat{r}$ aumenta, siendo el ángulo de refracción siempre mayor que el ángulo de incidencia.

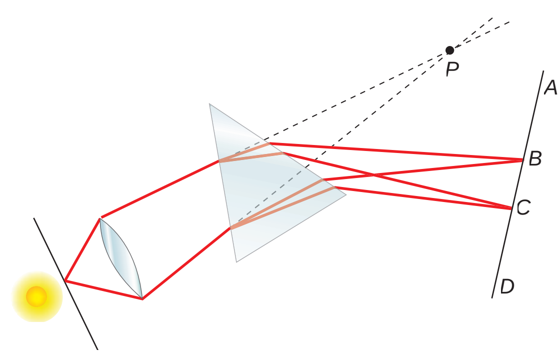
De acuerdo con las condiciones del problema, existe un ángulo de incidencia, $\hat{i}_L$, al que denominamos **ángulo límite,** para el cual *sen* $\hat{r} = 90°$. Tras la reflexión, un rayo de luz emitido con ese ángulo sería tangente a la superficie que separa los dos medios.

Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, el seno del ángulo de refracción (calculado de acuerdo con la ley de Snell) es mayor que la unidad, lo cual es matemáticamente imposible.

En ese caso, un rayo que incide con un ángulo superior al ángulo límite no se refracta; se refleja y sigue desplazándose por el interior del primer medio. Por eso decimos que la **reflexión** es **total.**



4. Un haz de luz blanca pasa a través de una rendija y, con ayuda de una lente, se enfoca en un punto *P*. Si colocamos un prisma en la trayectoria del rayo, vemos sobre la pantalla el espectro visible en la zona comprendida entre los puntos *B* y *C*.



a) ¿Qué color vemos en *B*? ¿Y en *C*?

b) ¿Qué fuente luminosa es adecuada para realizar este experimento?

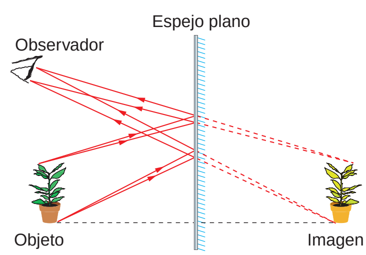
a) Como se aprecia en la figura, los rayos de luz que llegan a *C* sufren mayor refracción que los que llegan a *B*.

En el espectro luminoso, no todas las frecuencias sufren la misma refracción. Cuanto menor es una frecuencia, menor refracción sufre. Por tanto, los colores cercanos al rojo, a los que corresponde mayor longitud de onda y menor frecuencia, se desvían menos y van a parar al punto *B*; mientras que los colores próximos al violeta, cuya longitud de onda es menor y, por tanto, su frecuencia mayor, se desviarán más y alcanzarán el punto *C*.

b) Hemos de realizarlo con una luz blanca, que contiene todo el espectro de frecuencias, para poder apreciar el fenómeno.

5. De acuerdo con las leyes de la refracción, al introducir un palo en el agua lo vemos deformado. Teniendo esto en cuenta, ¿por qué no nos vemos deformados al mirarnos en un espejo plano, si nuestra imagen se forma al otro lado del medio (en el vidrio)?

La razón es que, en un espejo, la imagen se forma por reflexión, no por refracción. Los rayos de luz que inciden sobre la superficie del espejo salen reflejados con un ángulo igual al de incidencia. Son estos rayos reflejados los que, al ser proyectados hacia atrás, forman una imagen virtual. Ello explica que, al tratarse de una reflexión en una superficie plana, veamos la imagen del mismo tamaño que el objeto que la proyecta, como se muestra en el siguiente ejemplo:



Más adelante, en la unidad 12, estudiaremos las leyes que rigen la formación de imágenes en los espejos.

8. La luz visible es un tipo de onda electromagnética. ¿Cuál de las características de la onda es la que permite al sentido de la vista diferenciar los colores?

Explica cómo es que la luz, al pasar de un medio a otro con diferente índice de refracción, la percibimos del mismo color.

La característica de la onda que nos permite diferenciar los colores es la frecuencia que, como estudiamos en la unidad 3, es propia de cada onda, independiente de las características del medio, a diferencia de la velocidad de propagación o la longitud de onda. Por esta razón percibimos la luz del mismo color, aunque cambie de medio de propagación.

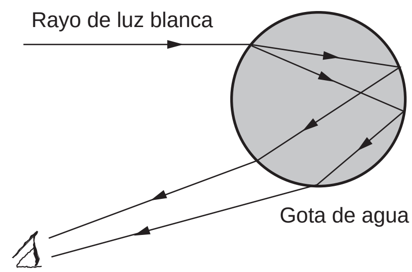
9. El arco iris se produce cuando las gotas de lluvia que quedan en suspensión en el aire son iluminadas por luz blanca.

a) ¿Qué propiedades de la luz explican la formación del arco iris?

b) Explica, con ayuda de un esquema y con lápices de colores, qué ocurre cuando se ilumina una gota de agua con un haz de luz blanca.

a) Las propiedades de la luz que explican la formación del arco iris son la reflexión y la refracción.

b) Cuando un haz de luz blanca que proviene del Sol ilumina una gota de lluvia, esta actúa como si se tratase de un prisma. Los rayos son refractados cuando entran por la parte superior de la gota; luego, son reflejados por la parte posterior y refractados de nuevo al salir. De esta forma, la luz blanca se "descompone" en los distintos colores del espectro visible, dando lugar al arco iris, como se muestra en la ilustración:



10. Cuando intentamos ver en una zona de penumbra o en condiciones de luz poco intensa, no distinguimos los colores. Sin embargo, distinguimos las formas de los objetos. ¿Puedes explicarlo?

Dentro del ojo humano, la retina posee dos tipos de células receptoras que son sensibles a la luz, que reciben el nombre de conos y bastones.

Los bastones son sensibles a la intensidad luminosa y los conos son sensibles a las diferentes longitudes de onda, por lo que son estos últimos los que distinguen los colores; mientras que los bastones son capaces de discriminar objetos en situaciones en las que la iluminación es escasa, distinguiendo sus formas.

12. El Sol se ve más grande cuando amanece o anochece que a mediodía, siendo su color más amarillo a lo largo del día que durante la salida o la puesta de Sol. Sin embargo, el Sol siempre emite la misma radiación luminosa. ¿Puedes explicar por qué ocurre ese fenómeno?

Cuando el Sol se pone, los rayos de luz que llegan hasta nuestros ojos recorren una distancia mayor por el interior de la atmósfera que cuando el Sol se encuentra en el cenit.

Ello hace que la radiación luminosa de color violeta, azul, verde o amarillo se disperse antes de llegar a nuestros ojos (estas longitudes de onda se curvan más al refractarse), de forma que tan solo llega radiación de colores naranja y rojo.

13. ¿Qué son los cables de fibra óptica? Explica por qué "no escapa" la luz a través de las paredes de la fibra. Señala alguna aplicación práctica que haya sido desarrollada con este tipo de materiales. Indica sus ventajas e inconvenientes.

Los cables de fibra óptica están formados por finos haces de fibras de vidrio fundido. El vidrio es un material frágil, pero cuando se funde y se trabaja en fibras, se convierte en un material flexible y resistente.

La principal finalidad de la fibra óptica es la transmisión de información por medio de pulsos de luz. Los pulsos de luz son una forma de codificar la información, al igual que los pulsos eléctricos que se transmiten a través del cable del teléfono son una forma de codificar la voz.

La luz que penetra dentro de la fibra de vidrio se transmite a través de ella. Cuando el cable se curva, la luz se refleja en la pared interior del cable de forma total, quedando asegurada la transmisión de la información sin que importe el trazado del cable. Este fenómeno se conoce como reflexión total interna.

Este sistema de transmisión de información tiene muchas aplicaciones: transmisión de señales telefónicas, de televisión, de datos entre redes de computadores, etc.

Ventajas que presenta el uso de la fibra óptica:

1. La cantidad de información que se puede enviar por cualquier cable es limitada. Sin embargo, el cable de fibra óptica proporciona, en un espacio reducido, una elevada capacidad de transmisión de información (miles de veces superior a la de un cable de cobre tradicional), a la vez que posibilita la utilización de dicho soporte por parte de un gran número de usuarios. Decimos, por tanto, que los cables de fibra óptica tienen mayor "ancho de banda" que los cables de cobre convencionales utilizados en telefonía.
2. Las pérdidas en un cable de fibra óptica son mínimas. La luz puede desplazarse por el cable más de un kilómetro sin perder apenas potencia.

Inconvenientes que presenta esta tecnología en la actualidad:

1. El coste de producción de los cables es elevado.
2. Es una tecnología en expansión, que solo está instalada en las grandes ciudades y que no se utiliza de forma masiva (2001).
3. A escala nacional, los tendidos generales no se encuentran totalmente desarrollados. Será preciso esperar algunos años hasta que su uso se normalice.

EJERCICIOS

14. Calcula el rango de frecuencias que corresponde a la radiación visible.

Considera como espectro visible al comprendido en el intervalo [400, 700] nm.

Para un medio concreto, la velocidad de propagación de una onda electromagnética es siempre la misma, sin que esta dependa de la frecuencia de la onda. En el aire y en el vacío la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (o.e.m.) es: $3 \cdot 10^8$ m $\cdot$ s^{-1}.

Si conocemos la longitud de onda y la velocidad con que se propaga una o.e.m., el valor que corresponde a la frecuencia es:

$$c = \lambda \cdot f \rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$

Por tanto, el rango de frecuencias que corresponde al espectro visible es:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{700 \cdot 10^{-9}} = 4{,}286 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} = 7{,}5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

15. El arco iris se produce cuando las gotas de lluvia que quedan suspendidas en el aire son iluminadas con luz blanca. Si la cantidad de gotas de lluvia en suspensión es considerable, podemos llegar a ver un doble arco iris, estando invertidos los colores del arco iris externo respecto a los que se ven en el arco iris interno.

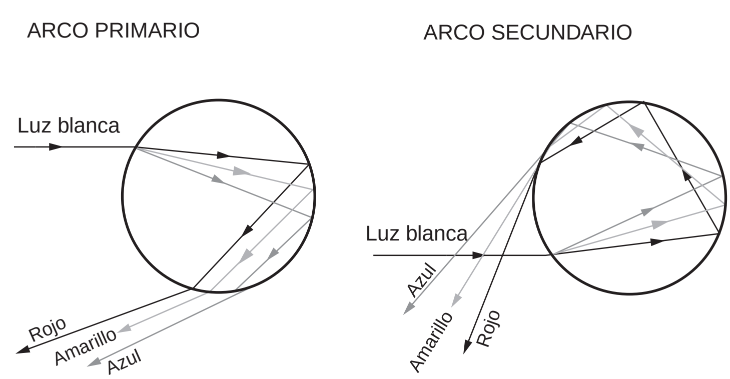
Explica, con ayuda de un esquema y con lápices de colores, qué ocurre cuando se ilumina una gota de agua con un haz de luz blanca, justificando que se forme un doble arco iris.

Cuando un haz de luz blanca procedente del Sol ilumina una gota de lluvia, esta actúa como si se tratase de un prisma. Los rayos son refractados cuando entran por la parte superior de la gota; posteriormente, son reflejados en su interior, y, por último, son refractados de nuevo al salir. De esa forma, la luz blanca se "descompone" en los distintos colores del espectro visible, dando lugar al arco iris. Este arco iris se denomina "arco iris primario".

En ocasiones se producen dos o más reflexiones dentro de la gota, formándose dos o más arcos. El arco iris secundario es el resultado de dos reflexiones y se forma en el cielo por encima del arco iris primario.

En el arco iris secundario, el orden en que se disponen los colores está invertido respecto al orden en que se disponen en el arco iris primario, con el interior rojo y el exterior violeta. Los colores de este arco no son tan brillantes como los del primario, pues en cada reflexión la luz pierde intensidad.

Los esquemas de formación del arco iris primario y secundario son los que se muestras en la siguiente ilustración:



16. Determina el ángulo a partir del cual se produce la reflexión total entre el aire y un medio en el que la luz viaja a 120 000 km · s⁻¹.

El ángulo límite es el ángulo de incidencia al que corresponde un índice de refracción de 90°. Aplicando la ley de Snell de la refracción obtenemos la expresión que nos permite calcularlo:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i}_L = n_2 \cdot sen\ 90° \rightarrow sen\ \hat{i}_L = \frac{n_2}{n} \rightarrow \hat{i}_L = arcsen\ \frac{n_2}{n}$$

Para calcular su valor necesitamos conocer el índice de refracción del aire, n_2, que es la unidad, y el que corresponde al medio en el que la luz viaja a 120 000 km · s^{-1}, n_1. Este último lo obtenemos teniendo en cuenta la definición de índice de refracción, que es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la que corresponde al medio en cuestión. Por tanto:

$$n = \frac{c}{v} \rightarrow n_1 = \frac{c}{v_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{12 \cdot 10^7} = 2{,}5$$

En consecuencia, el valor del ángulo límite es:

$$i_L = arcsen\ \frac{n_2}{n_1} = arcsen\ \frac{1}{2{,}5} = 23{,}58°$$

17. Un rayo de luz se propaga en el aire e incide en una cubeta llena de agua, formando un ángulo de 45° con la superficie de separación del agua. Calcula:

a) La dirección que tendrá el rayo luminoso al propagarse dentro del agua.

b) La velocidad de propagación de la luz en el agua.

Datos: $\boldsymbol{c = 300\,000}$ **km · s^{-1}**

$\boldsymbol{n_{agua} = 1{,}33}$

$\boldsymbol{n_{aire} = 1}$

a) La dirección del rayo tras refractarse la obtenemos aplicando la ley de Snell de la refracción:

$$n_{aire} \cdot sen\ \hat{i} = n_{agua} \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow sen\ \hat{r} = \frac{n_{aire} \cdot sen\ \hat{i}}{n_{agua}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{r} = arcsen\ \frac{n_{aire} \cdot sen\ \hat{i}}{n_{agua}} = arcsen\ 1 \cdot \frac{sen\ 45°}{1{,}33} = 32{,}12°$$

Por tanto, el rayo se desvía, acercándose a la normal.

b) De acuerdo con la definición de índice de refracción:

$$n_{agua} = \frac{c}{v_{agua}} \rightarrow v_{agua} = \frac{c}{n_{agua}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1{,}33} = 2{,}26 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

18. Calcula el ángulo límite para la refracción y el valor de $\boldsymbol{n_{agua}}$ para un rayo de luz que pasa del aire al agua, de acuerdo con la tabla de datos:

Ángulo en aire	Ángulo en agua
10°	8°
20°	15,5°
30°	22,5°
40°	28°
50°	35°
60°	40,5°
70°	45°
80°	50°

1

La segunda ley de Snell para la refracción establece la relación:

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

en la que n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios. Comprobemos si se cumple la ley de Snell de la refracción:

Ángulo en el aire ($\hat{i}$)	**Ángulo en el agua ($\hat{r}$)**	**Índice de refracción (n)**
10°	8°	1,248
20°	15,5°	1,280
30°	22,5°	1,307
40°	28°	1,369
50°	35°	1,336
60°	40,5°	1,333
70°	45°	1,329
80°	50°	1,286

Como se aprecia, los valores son prácticamente constantes. Las pequeñas diferencias que obtenemos pueden ser atribuidas al proceso de medida o a aproximaciones realizadas en la medida de los respectivos ángulos de incidencia y de refracción.

Adoptaremos como valor de n, índice de refracción del agua, la media de los resultados obtenidos:

$$n = \frac{\sum n_i}{8} = 1,311$$

El ángulo límite es el ángulo de incidencia a partir del cual el rayo no se refracta para pasar al segundo medio, en este caso el agua, y sale paralelo a la superficie de separación de ambos medios.

Por tanto, respecto a la normal, el ángulo con que sale el rayo refractado es 90°.

Si aplicamos la segunda ley de Snell, resulta:

$$\frac{sen\ \hat{i}_L}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow sen\ \hat{i}_L = \frac{n_2}{n_1} \cdot sen\ 90° = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{i}_L = arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Para que exista ángulo límite, el índice de refracción del segundo medio ha de ser menor que el del primer medio. De este modo, el cociente entre ambos índices será menor que la unidad y existirá un ángulo de incidencia que haga que se cumpla la expresión anterior. Por tanto, en el caso de un rayo de luz que pasa del aire al agua no existe el ángulo límite de refracción, al ser mayor el índice de refracción del segundo medio.

19. Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de 30°. ¿Qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul?

Datos: n_{rojo} = 1,62; n_{azul} = 1,671; n_{aire} = 1

Para resolver este ejercicio aplicaremos la ley de Snell de la refracción. Recuerda que el índice de refracción de un medio depende ligeramente de la longitud de onda de la luz que se refracta. En el caso del enunciado tenemos, para el vidrio, los valores del índice de refracción que presenta para el rojo y el azul.

En la dispersión que se produce dentro de la lámina de vidrio, se desviarán más los rayos de longitud de onda más corta (es decir, se desviará más el azul que el rojo), como se demuestra a continuación:

$$n_{aire} \cdot sen\ \hat{i} = n_{azul} \cdot sen\ \hat{r}_{azul} \rightarrow \hat{r}_{azul} = arcsen\ \frac{n_{aire} \cdot sen\ \hat{i}}{n_{azul}} = arcsen\ \frac{1 \cdot sen\ 30°}{1,671} = 17,41°$$

$$n_{aire} \cdot sen\ \hat{i} = n_{rojo} \cdot sen\ \hat{r}_{rojo} \rightarrow \hat{r}_{rojo} = arcsen\ \frac{n_{aire} \cdot sen\ \hat{i}}{n_{rojo}} = arcsen\ \frac{1 \cdot sen\ 30°}{1,62} = 17,98°$$

Por tanto, el ángulo que formarán entre sí ambos rayos será:

$$\alpha = \hat{r}_{rojo} - \hat{r}_{azul} = 17,97° - 17,41° = 0,57°$$

20. Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque con un ángulo de 30°. Calcula el ángulo que formarán entre sí los rayos reflejado y refractado. Si el rayo luminoso se propagase desde el agua hacia el aire, ¿a partir de qué valor del ángulo de incidencia se presentará el fenómeno de reflexión total?

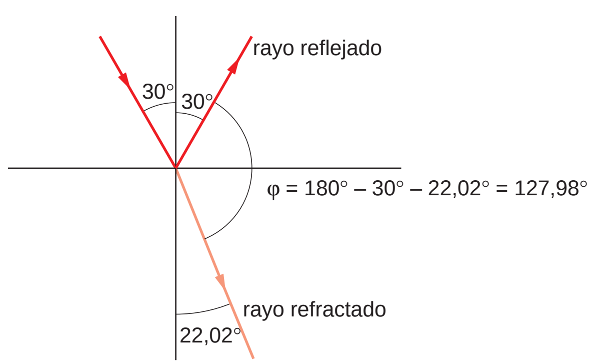
Dato: Índice de refracción del agua = 4/3

Calculemos en primer lugar, de acuerdo con la ley de Snell de la refracción, el ángulo refractado, $\hat{r}$:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_2 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow \hat{r} = arcsen\ \frac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_2} = arcsen\ \frac{1 \cdot sen\ 30°}{4/3} = 22,02°$$

De acuerdo con la ley de Snell de la reflexión, el ángulo de reflexión es igual al de incidencia; valdrá, por tanto, 30°.

La gráfica que representa los rayos incidentes, reflejado y refractado es la siguiente:



Por tanto, el ángulo que formarán entre sí los rayos reflejado y refractado es:

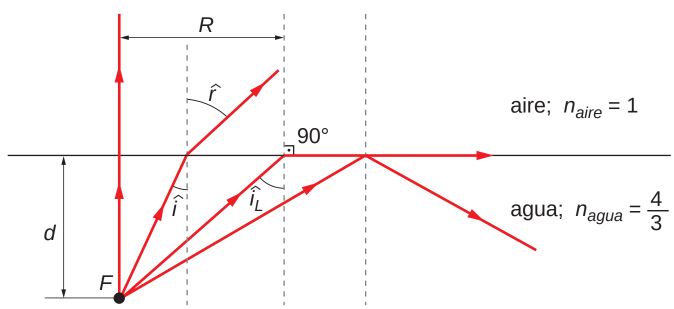
$$\varphi = 180° - 30° - 22,02° = 127,98°$$

Cuando un rayo de luz monocromática pasa de un medio (agua) a otro (aire) menos refringente, se refracta alejándose de la normal. El ángulo límite, $\hat{i}_L$, es el ángulo de incidencia para el que el ángulo de infracción, $\hat{r}$, es de 90°. Al imponer esta condición en la aplicación de la segunda ley de Snell, obtenemos el valor del primero:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i}_L = n_2 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow i_L = arcsen\ \frac{n_2 \cdot sen\ \hat{r}}{n_1} = arcsen\ \frac{1 \cdot sen\ 90°}{4/3} = 48{,}59°$$

21. Un foco luminoso puntual se encuentra situado a un metro de profundidad, en el fondo de un estanque lleno de agua, cuyo índice de refracción es *n* = 4/3. El foco emite luz en todas direcciones; debido a ello, en la superficie del agua se forma un círculo luminoso de radio *R*. Explica brevemente este fenómeno y calcula el radio *R* del círculo luminoso.

Los rayos de luz que proceden del foco luminoso situado en el fondo del estanque se refractan al llegar a la superficie de separación entre el agua y el aire, alejándose de la normal a dicha superficie de separación:



Según se aprecia en la ilustración, existe un ángulo límite de incidencia para el cual el ángulo que forma el rayo refractado con la normal es 90°. A partir de este ángulo límite, los rayos de luz son reflejados completamente.

El círculo luminoso lo forman los rayos que inciden con un ángulo menor que este ángulo límite y, por tanto, son transmitidos al otro medio; en este caso, el aire.

Aplicando la ley de Snell, obtenemos el valor del ángulo límite, $\hat{i}_L$:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_2 \cdot sen\ \hat{r}$$

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i}_L = n_2 \cdot sen\ 90° \rightarrow sen\ \hat{i}_L = \frac{n_2}{n_1}$$

$$sen\ \hat{i}_L = \frac{1}{4/3} = \frac{3}{4} \rightarrow \hat{i}_L = arcsen\ \frac{3}{4} = 48{,}6°$$

Conocido este ángulo, y teniendo en cuenta los datos de la figura, el radio del círculo luminoso resulta:

$$tg\ \hat{i}_L = \frac{R}{d} \rightarrow R = d \cdot tg\ \hat{i}_L = 1 \cdot tg\ 48{,}6° = 1{,}13\ \text{m}$$

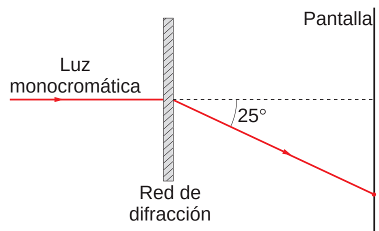
NOTA: la resolución de este ejercicio se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

PROBLEMAS

22. Un haz de luz monocromática incide perpendicularmente a una red de difracción de 8 · 10⁵ líneas por metro. Sobre la pantalla, el primer máximo lateral se forma en un punto situado de tal modo que el rayo emergente forma un ángulo de 25° respecto a la dirección del haz incidente.

Con estos datos, calcula la longitud de onda de la radiación incidente.

La situación que plantea el enunciado del problema es la que se muestra en el siguiente esquema:



La distancia entre rendijas es:

$$a = \frac{1}{8 \cdot 10^5} = 1{,}25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

De acuerdo con la experiencia de Young, en los puntos en que la iluminación es máxima se cumple la siguiente relación:

$$d_1 - d_2 = n \cdot \lambda \quad ; \quad a \cdot \frac{y}{D} = n \cdot \lambda$$

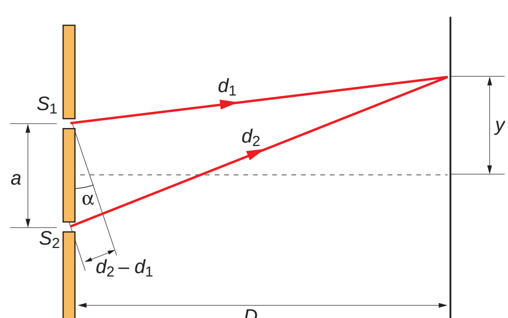
siendo y la distancia entre el máximo central y el máximo que ocupa la posición n a la derecha o a la izquierda de él. Por tanto, la separación entre dos franjas brillantes, será:

$$\Delta y = y_{n+1} - y_n = \frac{(n+1) \cdot \lambda \cdot D}{a} - \frac{n \cdot \lambda \cdot D}{a} = \frac{\lambda \cdot D}{a}$$

Como se nos proporciona la relación $\Delta y/D = sen\ 25°$, la longitud de onda que nos piden que calculemos es:

$$\lambda = a \cdot \frac{\Delta y}{D} = 1{,}25 \cdot 10^{-6} \cdot sen\ 25° = 5{,}28 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

23. Se desea calcular la longitud de onda de un rayo de luz monocromática. Para ello, se disponen unas rendijas separadas entre sí 1 mm y situadas a 0,5 metros de una pantalla.



Si entre el máximo central y la siguiente franja brillante la separación es $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ metros, calcula la correspondiente longitud de onda para la luz monocromática.

De acuerdo con la experiencia de Young, en los puntos en que la iluminación es máxima se cumple la relación:

$$d_1 - d_2 = n \cdot \lambda \quad ; \quad a \cdot \frac{y}{D} = n \cdot \lambda$$

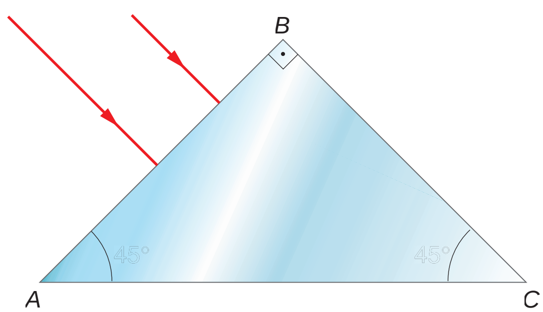
siendo y la distancia entre el máximo central y el máximo que ocupa la posición n a derecha o izquierda de él. Por tanto, la separación entre dos franjas brillantes será:

$$\Delta y = y_{n+1} - y_n = \frac{(n+1) \cdot \lambda \cdot D}{a} - \frac{n \cdot \lambda \cdot D}{a} = \frac{\lambda \cdot D}{a}$$

La distancia del máximo central al primer máximo lateral corresponde a $n = 1$. Sustituyendo en la expresión anterior, obtenemos la longitud de onda que nos piden:

$$\lambda = a \cdot \frac{\Delta y}{D} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2{,}5 \cdot 10^{-4}}{0{,}5} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$$

24. El prisma *ABC* de la figura está hecho con un vidrio cuyo índice de refracción es 1,5. Se desea que el rayo de luz que incide sobre él gire 90°.

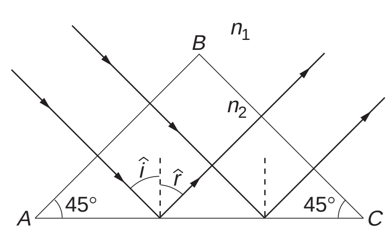


a) Dibuja sobre el diagrama la trayectoria que seguirán los dos rayos de luz que se indican hasta que salgan de nuevo al aire.

b) ¿Se produce refracción en la cara *AC*? Si es así, calcula el ángulo con que sale el rayo refractado. En caso contrario, indica el motivo.

c) La intensidad de los rayos que salen por la cara *BC* es menor que la de los rayos que inciden en la cara *AB*. ¿Cómo lo explicas?

a) La trayectoria que seguirán los rayos es la que se indica en la figura.



b) Los rayos que alcanzan la cara *AC* del prisma forman un ángulo de incidencia respecto a la normal cuyo valor es:

$$\hat{i} = 90° - 45° = 45°$$

El ángulo límite con que debe incidir un rayo sobre esta superficie para que se refracte y salga de nuevo al medio externo es:

$$\frac{sen\ \hat{i}_L}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow sen\ \hat{i}_L = \frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{r} = \frac{1}{1,5} \cdot sen\ 90° = \frac{2}{3} \rightarrow$$

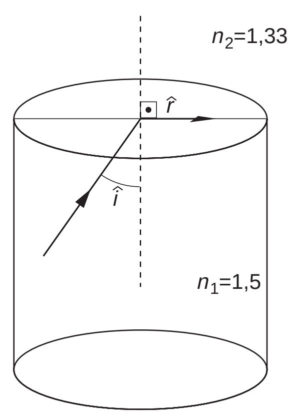
$$\rightarrow \hat{i}_L = arcsen\ \frac{2}{3} = 41,8°$$

Como el ángulo de incidencia (45°) es superior al ángulo límite, no hay refracción; el rayo se refleja sobre la cara *AC* y acaba saliendo por la cara *BC*.

c) En este supuesto, que es ideal, la intensidad con que sale el rayo es igual a la intensidad con que incide, siempre que el material del prisma no absorba parte de la radiación. Ello se explica por la ausencia de refracción, ya que solo se produce una reflexión en la cara *AC*.

25 Calcula el ángulo límite para la refracción de un rayo de luz que viaja por el interior de un tubo de vidrio cuyo índice de refracción es 1,5 si dicho tubo está sumergido en agua.

El ángulo límite es el ángulo mínimo de incidencia a partir del cual el rayo de luz no se transmite de un medio a otro.



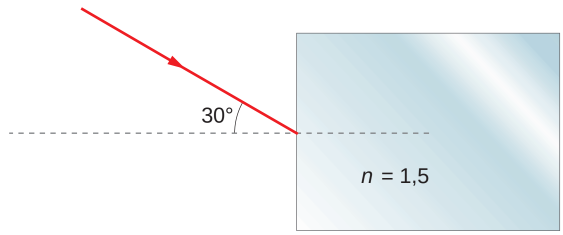
En ese caso, el ángulo que forma el rayo refractado con la normal es 90°.

El índice de refracción del agua es $n = 1,33$. Por tanto, si el tubo está sumergido en agua, resulta:

$$\frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow sen\ \hat{i} = \frac{n_2}{n_1} \cdot sen\ \hat{r} = \frac{1,33}{1,5} \cdot sen\ 90° = 0,887 \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{i} = arcsen\ 0,887 = 62,46°$$

26. Un rayo de luz incide sobre un bloque de vidrio formando un ángulo de 30°, como se indica en la figura.



Si el índice de refracción del vidrio es 1,5 y se encuentra en el aire:

a) Dibuja la trayectoria que sigue el rayo a través del bloque. Indica el ángulo que forma el rayo refractado con la normal.

b) ¿Con qué velocidad se propaga el rayo de luz por el interior del bloque?

a) Al incidir sobre la superficie del bloque, el rayo formará un ángulo con la normal que obtenemos a partir de la segunda ley de Snell:

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

$$sen\ \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ 30° = \frac{1}{1,5} \cdot sen\ 30° = \frac{1}{3}$$

$$\hat{r} = arcsen\ \frac{1}{3} = 19,47°$$

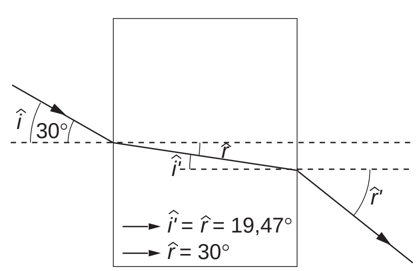
Cuando sale del bloque al aire, $(\hat{i}' = \hat{r})$ el ángulo resulta:

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

$$sen\ \hat{r}' = \frac{n_2}{n_1} \cdot sen\ 19,47° = \frac{1,5}{1} \cdot sen\ 19,47° = 0,5$$

$$\hat{r}' = arcsen\ 0,5 = 30°$$

La situación física que estamos analizando es la que se representa en el siguiente esquema:



b) El índice de refracción del medio es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio considerado. Por tanto:

$$c_{medio} = \frac{c_{aire}}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5} = 2 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

27. Resuelve de nuevo el problema anterior suponiendo que el índice de refracción del vidrio es 1,8 y que se encuentra sumergido en agua, cuyo índice de refracción es 1,33.

a) Si aplicamos la segunda ley de Snell al rayo, resulta:

$$\frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{r} = arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i}\right) =$$

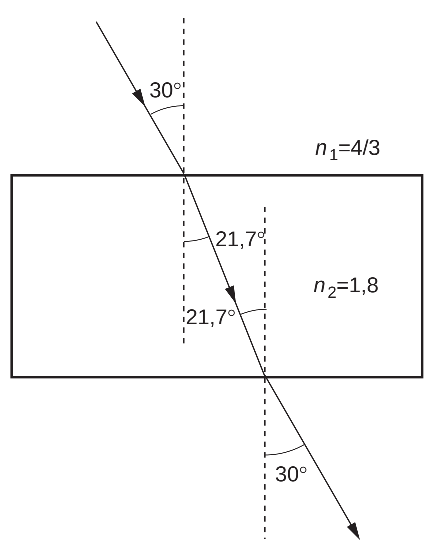
$$= arcsen\left(\frac{1{,}33}{1{,}8} \cdot sen\ 30°\right) = 21{,}7°$$

El ángulo refractado es el ángulo con el que incide en la otra superficie. Por tanto:

$$\frac{sen\ \hat{i}'}{sen\ \hat{r}'} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow \hat{r}' = arcsen\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot sen\ \hat{i}'\right) =$$

$$= arcsen\left(\frac{1{,}8}{1{,}33} \cdot sen\ 21{,}7°\right) = 30°$$

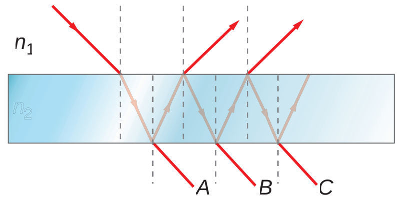
El ángulo de salida del bloque coincide con el de entrada. La trayectoria del rayo es la que se muestra en la figura:



b) El índice de refracción de un material es la relación entre la velocidad de la luz en el aire y la velocidad de la luz en dicho material. Por tanto:

$$n = \frac{v_{aire}}{v_{material}} \rightarrow v_{material} = \frac{v_{aire}}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1{,}8} = 1{,}67 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

28. En la figura se muestra un rayo de luz que incide sobre una lámina de caras plano-paralelas.



El índice de refracción del material que forma la lámina es n_2 y se encuentra inmersa en un medio cuyo índice de refracción es n_1. Determina, en función de los datos que facilita el enunciado, la desviación que sufre el rayo al atravesar la lámina.

El rayo, después de atravesar la lámina, se ha refractado en dos ocasiones. En la primera, el ángulo de refracción es, de acuerdo con la ley de Snell:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_2 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow sen\ \hat{r} = arcsen\ \frac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_2}$$

Este ángulo es el ángulo de incidencia de la segunda refracción, tras la cual el rayo sale del prisma. Por tanto:

$$n_2 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow n_1 \cdot sen\ \hat{r}'$$

$$n_2 \cdot sen \left(arcsen\ \frac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_2} \right) = n_1 \cdot sen\ \hat{r}'$$

$$\hat{r}' = arcsen \left[\frac{n_2 \cdot sen \left(arcsen\ \dfrac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_2} \right)}{n_1} \right] = arcsen\ \frac{n_2 \cdot \dfrac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_2}}{n_1} = sen\ \hat{i}$$

Por tanto:

$$\hat{r}' = \hat{i}$$

Es decir, el ángulo que forma el rayo refractado con la normal es igual al ángulo que forma el rayo incidente a la lámina con la normal.

29. Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de 30º. ¿Qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul, componentes de la luz blanca, si los valores de los índices de refracción del vidrio para estos colores son, respectivamente, $n_{rojo} = 1{,}612$ y $n_{azul} = 1{,}671$?

Los ángulos de refracción que corresponden a los rayos rojo y azul son:

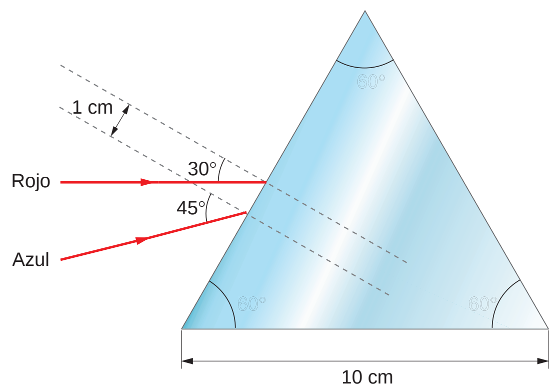
$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_{rojo} \cdot sen\ \hat{r}_{rojo} \rightarrow \hat{r}_{rojo} = arcsen \left(\frac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_{rojo}} \right) = arcsen \left(\frac{1 \cdot sen\ 30°}{1{,}612} \right) = 18{,}07°$$

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_{azul} \cdot sen\ \hat{r}_{azul} \rightarrow \hat{r}_{azul} = arcsen \left(\frac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_{azul}} \right) = arcsen \left(\frac{1 \cdot sen\ 30°}{1{,}671} \right) = 17{,}41°$$

El ángulo que forman entre sí ambos rayos es:

$$\alpha = \hat{r}_{rojo} - \hat{r}_{azul} = 18{,}07° - 17{,}41° = 0{,}66°$$

30. **El prisma de la figura está hecho con un vidrio cuyo índice de refracción es 1,8. Dibuja sobre el diagrama la trayectoria que seguirán los dos rayos de luz que se indican hasta que salgan de nuevo al aire y calcula el ángulo que formarán entre ellos.**



Si aplicamos la segunda ley de Snell al rayo de arriba, resulta:

$$\frac{sen\ \hat{i}_1}{sen\ \hat{r}_1} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{r}_1 = arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i}_1\right)$$

$$\hat{r}_1 = arcsen\left(\frac{1}{1{,}8} \cdot sen\ 30°\right) = 16{,}13°$$

El rayo refractado sigue su camino en línea recta a través del cristal. Como se trata de un prisma triangular, para calcular el ángulo de incidencia en la cara opuesta del prisma, $\hat{i}'_1$, hacemos lo siguiente:

1. Calculamos el ángulo complementario, α:

$$\alpha = 180° - 60° - (90° - \hat{r}_1) = 180° - 60° - 90° + 16{,}3° = 46{,}3°$$

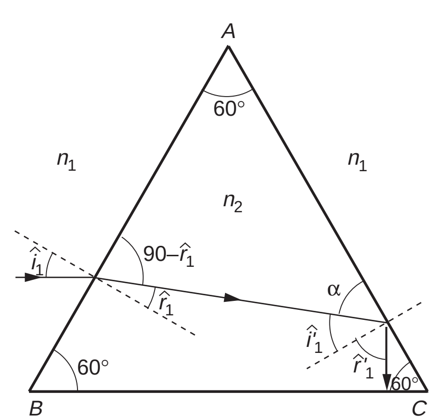
2. Calculamos $\hat{i}'_1$. En nuestro caso:

$$\hat{i}'_1 = 90° - 46{,}13° = 43{,}87°$$

Aplicando ahora la ley de Snell a la segunda refracción, resulta:

$$\frac{sen\ \hat{i}'_1}{sen\ \hat{r}'_1} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{r}'_1 = arcsen\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot sen\ \hat{i}'_1\right)$$

$$\hat{r}'_1 = arcsen\left(\frac{1{,}8}{1} \cdot sen\ 43{,}87°\right) = arcsen\ 1{,}25$$



Matemáticamente, el problema no tiene solución. Ello se debe a que el ángulo incidente es superior al ángulo límite, y, por tanto, el rayo no se refracta, sino que se refleja en el interior del prisma.

Con el segundo rayo haremos lo mismo. Al aplicar la ley de Snell:

$$\frac{sen\ \hat{i}_2}{sen\ \hat{r}_2} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{r}_2 = arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i}_2\right)$$

$$\hat{r}_2 = arcsen\left(\frac{1}{1{,}8} \cdot sen\ 45°\right) = 23{,}13°$$

El rayo refractado sigue su camino en línea recta a través del cristal. En este caso:

$$\alpha = 180° - 60° - (90° - \hat{r}_2) = 180° - 60° - 90° + 23{,}13° = 53{,}13°$$

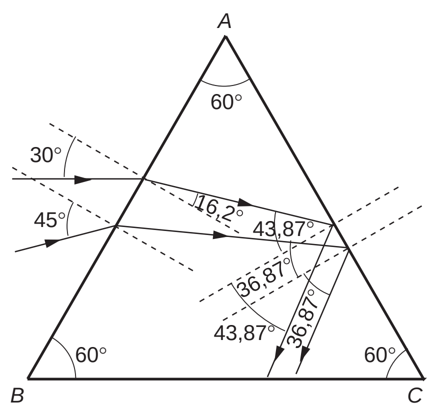
Por tanto, $\hat{i}'_2$ resulta:

$$\hat{i}'_2 = 90° - 53{,}13° = 36{,}87°$$

Aplicando ahora la ley de Snell:

$$\frac{sen\ \hat{i}'_2}{sen\ \hat{r}'_2} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{r}'_2 = arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i}'_2\right)$$

$$\hat{r}'_2 = arcsen\left(\frac{1{,}8}{1} \cdot sen\ 36{,}87°\right) = arcsen\ 1{,}08$$



En este caso, el rayo también se refleja en la superficie y sigue viajando por el interior del prisma, como se indica en la figura.

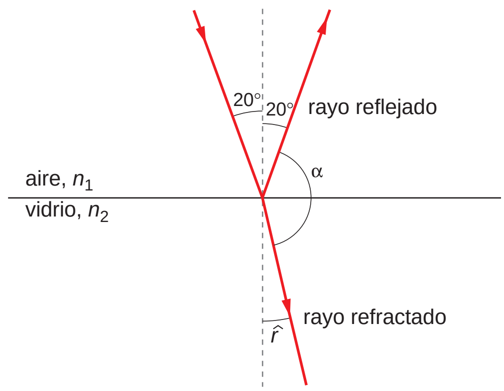
Tras este primer giro, el rayo incide sobre la cara *BC* del prisma, donde estudiaríamos de nuevo si se produce una reflexión o una refracción. De este modo, iríamos obteniendo la trayectoria completa del rayo en cada caso y calcularíamos el ángulo formado por los rayos cuando salgan de nuevo al aire.

31. Un rayo de luz incide oblicuamente sobre un vidrio plano de índice de refracción 1,52, produciéndose un rayo reflejado y otro refractado.

a) Si el ángulo de incidencia es de 20°, determina el ángulo α que forman entre sí los rayos reflejado y refractado.

b) Si el ángulo de incidencia es un poco mayor que 20°, ¿crecerá o decrecerá el ángulo α del apartado anterior?

a) Cuando el rayo de luz incide sobre la superficie de separación entre el aire y el vidrio, una fracción del haz es reflejada con el mismo ángulo, pero otra es refractada, de forma que este rayo se acerca a la normal a la superficie de separación.



El ángulo que forma el rayo refractado con la normal lo obtenemos aplicando la ley de Snell:

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

$$sen\ \hat{r} = \frac{1}{1,52} \cdot sen\ 20° = 0,22$$

$$\hat{r} = arcsen\ 0,22 = 13°$$

En cuanto al rayo reflejado, el ángulo que forma con la normal coincide con el ángulo de incidencia, lo cual se puede comprobar aplicando de nuevo la ley de Snell y teniendo en cuenta que ambos rayos se propagan por el mismo medio:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_1 \cdot sen\ \hat{r}$$

$$sen\ \hat{i} = sen\ \hat{r} \rightarrow \hat{i} = \hat{r}$$

El ángulo que forman entre sí el rayo refractado y el rayo reflejado es:

$$\alpha = 180° - 20° - 13° = 147°$$

b) Si aumenta el ángulo de incidencia, tanto el ángulo de refracción como el de reflexión aumentan, como puede deducirse de la ley de Snell, por lo que el ángulo α que forman los rayos reflejado y refractado disminuirá, tal como se desprende del razonamiento seguido en el apartado a) para calcular dicho ángulo.

$$\alpha = 180° - \hat{i} - \hat{r}$$

Si $\hat{i}$ aumenta → $\hat{r}$ aumenta → α disminuye

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

32 **Un rayo de luz monocromático, que se propaga en un medio de índice de refracción 1,58, penetra en otro medio, de índice de refracción 1,23, formando un ángulo de incidencia de 15° respecto a la normal a la superficie de separación entre ambos medios.**

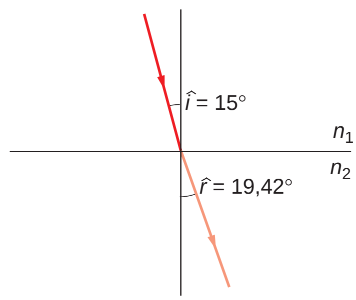
a) Determina el valor del ángulo de refracción correspondiente al ángulo de incidencia anterior. Haz un dibujo esquemático.

b) Calcula el ángulo límite.

a) El ángulo de refracción se calcula a partir de la segunda ley de Snell:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_2 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow \hat{r} = arcsen\ \frac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_2} = arcsen\ \frac{1{,}58 \cdot sen\ 15°}{1{,}23} = 19{,}42°$$

El dibujo esquemático que se solicita es el siguiente:



b) El ángulo límite es aquel al que le corresponde un ángulo de refracción de 90°:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i}_L = n_2 \cdot sen\ 90° \rightarrow i_L = arcsen\ \frac{n_2 \cdot sen\ 90°}{n_1} = arcsen\ \frac{1{,}23 \cdot 1}{1{,}58} = 51{,}12°$$

33. Un rayo luminoso incide desde el agua sobre la superficie de separación con el aire con un ángulo de incidencia de 25°. Calcula el ángulo de refracción y el ángulo límite.

Datos: $n_{agua} = 1{,}33$; $n_{aire} = 1$

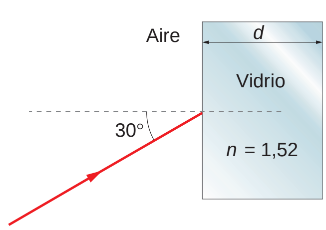
El ángulo de refracción que le corresponde es:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i} = n_2 \cdot sen\ \hat{r} \rightarrow \hat{r} = arcsen\ \frac{n_1 \cdot sen\ \hat{i}}{n_2} = arcsen\ \frac{1{,}33 \cdot sen\ 25°}{1} = 34{,}2°$$

Por su parte, el ángulo límite (aquel al que le corresponde un ángulo de refracción de 90°) es:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i}_L = n_2 \cdot sen\ 90° \rightarrow \hat{i}_L = arcsen\ \frac{n_2 \cdot sen\ 90°}{n_1} = arcsen\ \frac{1 \cdot sen\ 90°}{1{,}33} = 48{,}75°$$

34 Un haz de luz de frecuencia $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz incide sobre un cristal de índice de refracción $n = 1{,}52$ y anchura d.



El haz incide desde el aire formando un ángulo de 30°. Calcula:

a) La longitud de onda de la luz incidente en el aire y en el cristal.

b) El ángulo que forma el haz de luz cuando atraviesa el cristal y entra de nuevo en el aire.

a) La expresión que relaciona la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de propagación de una onda es la siguiente:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Teniendo en cuenta que la frecuencia es una magnitud propia de la onda, cuyo valor no varía cuando la onda pasa de un medio a otro y que, en el caso del aire, $v = c = 3 \cdot 10^8$ m · s^{-1}, la longitud de onda que se obtiene en el aire es:

$$\lambda_{aire} = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^4} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

En el caso del vidrio:

$$\lambda_{vidrio} = \frac{v_{vidrio}}{f}$$

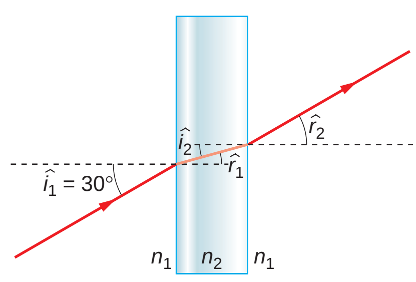
donde, teniendo en cuenta la definición de índice de refracción:

$$n = \frac{c}{v} \rightarrow n_{vidrio} = \frac{c}{v_{vidrio}} \rightarrow v_{vidrio} = \frac{c}{n_{vidrio}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1{,}52} = 1{,}97 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Por tanto:

$$\lambda_{vidrio} = \frac{v_{vidrio}}{f} = \frac{1{,}97 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{14}} = 3{,}99 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

b) El ángulo se calcula aplicando la ley de Snell de la refracción dos veces, de acuerdo con la siguiente figura:



Por tanto, en la primera refracción:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i}_1 = n_2 \cdot sen\ \hat{r}_1 \qquad [1]$$

Y en la segunda:

$$n_2 \cdot sen\ \hat{i}_2 = n_1 \cdot sen\ \hat{r}_2$$

Como el ángulo de incidencia de la segunda refracción, $\hat{i}_2$, coincide con el ángulo de refracción de la primera, $\hat{r}_1$:

$$n_2 \cdot sen\ \hat{r}_1 = n_1 \cdot sen\ \hat{r}_2 \qquad [2]$$

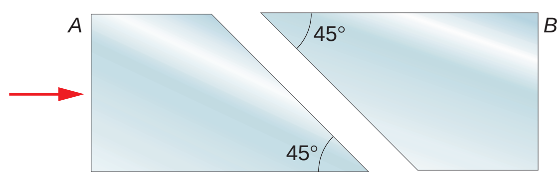
Al comparar las expresiones [1] y [2] se obtiene:

$$n_1 \cdot sen\ \hat{i}_1 = n_1 \cdot sen\ \hat{r}_2 \rightarrow \hat{i}_1 = \hat{r}_2 = 30°$$

Por tanto, el ángulo emerge del cristal con un ángulo igual al ángulo de incidencia.

NOTA: es interesante comparar la resolución de esta actividad con la que corresponde a la actividad 28.

35. Un dispositivo óptico está formado por dos prismas idénticos de índice de refracción 1,65, con bases biseladas a 45° y ligeramente separados.

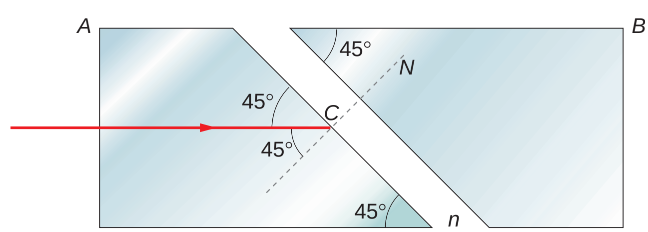


Si se hace incidir un rayo láser perpendicularmente a la cara *A* del dispositivo, discute físicamente si es de esperar que exista luz emergente por la cara *B* en los casos:

a) El espacio separador entre los prismas es aire, cuyo índice de refracción es 1.

b) El espacio separador entre los prismas es agua, cuyo índice de refracción es 1,33.

Puesto que el rayo de luz incide en la cara *A* del prisma perpendicularmente a su superficie, no se producirá ninguna desviación del haz al atravesar dicha superficie y el rayo llegará a la cara biselada incidiendo con un ángulo de 45°:



En este punto se producirá la refracción; el rayo continuará hacia el segundo prisma solo si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo límite de refracción, lo que dependerá del valor del índice de refracción del medio que separa ambos prismas.

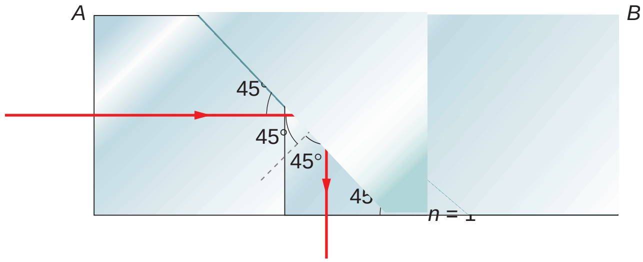
a) En el caso de que los prismas se encuentren rodeados de aire, tenemos:

$$n_{prisma} \cdot sen\ \hat{i}_L = n_{aire} \cdot sen\ 90°$$

$$sen\ \hat{i}_L = \frac{n_{aire}}{n_{prisma}} \cdot sen\ 90° \rightarrow sen\ \hat{i}_L = \frac{1}{1{,}65} = 0{,}61$$

$$\hat{i}_L = arcsen\ 0{,}61 = 37{,}6° < 45°$$

Como el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, el rayo se refleja completamente con un ángulo de reflexión de 45°, por lo que el rayo sale por la cara inferior del primer prisma sin llegar a la cara *B* del segundo prisma.



b) Si el espacio separador es agua, el ángulo límite en la cara biselada es:

$$sen\ \hat{i}_L = \frac{n_{agua}}{n_{prisma}} \cdot sen\ 90° \rightarrow sen\ \hat{i}_L = \frac{1{,}33}{1{,}65} = 0{,}81$$

$$\hat{i}_L = arcsen\ 0{,}81 = 54{,}1° > 45°$$

En este caso, el ángulo de incidencia es menor que el ángulo límite. Por tanto, el rayo será refractado con un ángulo:

$$1{,}65 \cdot sen\ 45° = 1{,}33 \cdot sen\ \hat{r}$$

$$sen\ \hat{r} = \frac{1{,}65}{1{,}33} \cdot sen\ 45° = 0{,}877 \rightarrow \hat{r} = 61{,}3°$$

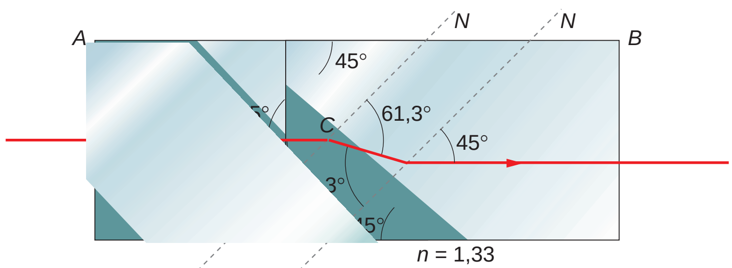
Como se aprecia en la siguiente figura, este ángulo coincide con el ángulo de incidencia en el segundo prisma, en el que se produce una segunda refracción (en este caso, el rayo se propaga de un medio menos refringente a otro más refringente).

El ángulo con que sale el rayo refractado es 45°, lo que podemos deducir de la simetría del problema o aplicando de nuevo la ley de Snell:

$$1{,}33 \cdot sen\ 61{,}3° = 1{,}65 \cdot sen\ \hat{r}_2$$

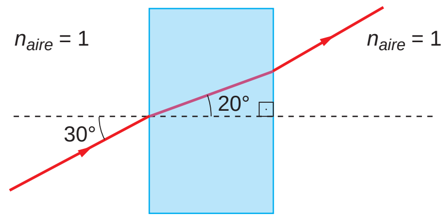
$$sen\ \hat{r}_2 = \frac{1{,}33}{1{,}65} \cdot sen\ 61{,}3° = 0{,}71 \rightarrow \hat{r}_2 = 45°$$

Por tanto, el rayo llega a la cara *B* perpendicularmente a esta, por lo que emerge del segundo prisma sin desviarse; es decir, con la misma dirección con que incidió en la cara *A* del primer prisma.



NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

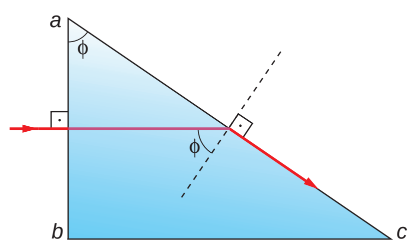
42. **Calcula el índice de refracción del bloque de vidrio de la figura, si este se encuentra en el aire ($n_{aire} = 1$).**



Aplicando directamente las leyes de Snell a la refracción, resulta:

$$\frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow n_2 = \frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} \cdot n_1 = \frac{sen\ 30°}{sen\ 20°} \cdot 1 = 1,462$$

43. **Un rayo de luz incide, como se indica en la figura, sobre la cara *ab* de un prisma de cristal cuyo índice de refracción toma el valor $n = 1,52$.**



Calcula:

a) El valor máximo del ángulo ϕ que hace que el rayo salga totalmente reflejado en la cara *ac*.

b) Ese mismo ángulo si el prisma está sumergido en agua (índice de refracción del agua = 4/3).

a) Como se aprecia en la ilustración, la línea que separa los dos medios es la recta *ac*, siendo la normal la recta perpendicular a ella, de trazo discontinuo.

Si el rayo sale reflejado en la cara *ac*, el ángulo que forma con la normal es 90°. Por tanto, al aplicar la ley de Snell, resulta:

$$\frac{sen\ \phi}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow sen\ \phi = \frac{n_2}{n_1} \cdot sen\ 90° = \frac{1}{1,52} \rightarrow$$

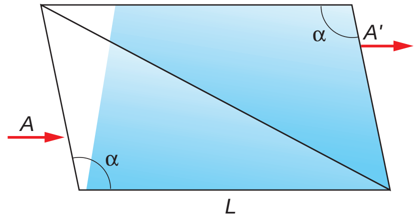
$$\rightarrow \phi = arcsen\left(\frac{1}{1,52}\right) = 41,14°$$

b) El índice de refracción del medio que rodea al prisma cambia. Por tanto:

$$\frac{sen\ \phi}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow sen\ \phi = \frac{n_2}{n_1} \cdot sen\ 90° = \frac{1,33}{1,52} \rightarrow$$

$$\rightarrow \phi = arcsen\left(\frac{1,33}{1,52}\right) = 61,31°$$

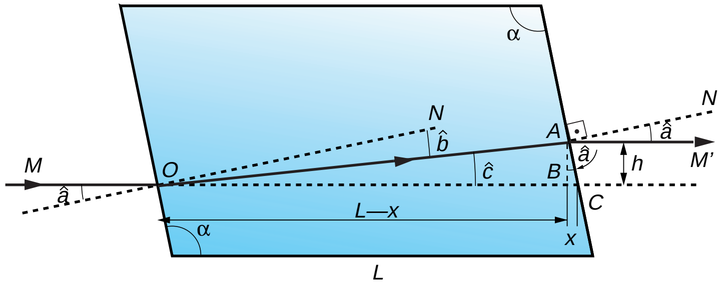
44 **Un prisma, que se encuentra en el aire, está formado por dos prismas iguales, unidos como se indica en la figura. Los ángulos que se señalan miden 101,5°. Un rayo *A*, que incida como se indica, saldrá desplazado por *A'*. ¿Cuánto se desplazará verticalmente el rayo?**



Datos: $n_{prisma} = 1{,}6$; $L = 10$ **cm.**

El ángulo que forma el rayo incidente con la normal es:

$$\hat{a} = 101{,}5 - 90 = 11{,}5°$$



Si aplicamos la ley de Snell a este sistema, podemos calcular el ángulo de refracción:

$$\frac{sen\ \hat{a}}{sen\ \hat{b}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow sen\ \hat{b} = sen\ \hat{a} \cdot \frac{n_1}{n_2} = sen\ 11{,}5° \cdot \frac{1}{1{,}6} = 0{,}1246 \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{b} = arcsen\ 0{,}1246 = 7{,}16°$$

Por tanto, el ángulo marcado en la figura como $\hat{c}$, resulta:

$$\hat{c} = \hat{a} - \hat{b} = 11{,}5° - 7{,}16° = 4{,}34°$$

En cada uno de los dos triángulos rectángulos que se forman podemos escribir:

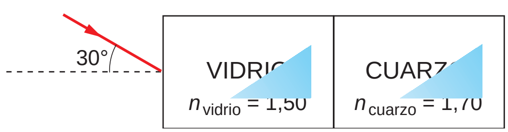
$$ABC \rightarrow \frac{x}{h} = tg\ \hat{a} \quad ; \quad OAB \rightarrow \frac{h}{L - x} = tg\ \hat{c}$$

De las dos expresiones anteriores podemos despejar el desplazamiento vertical del rayo, h:

$$h = L \cdot \frac{tg\ \hat{c}}{1 + tg\ \hat{c} \cdot tg\ \hat{a}} = 0{,}1 \cdot \frac{tg\ 4{,}34°}{1 + tg\ 4{,}34° \cdot tg\ 11{,}5°} =$$

$$= 7{,}47 \cdot 10^{-3}\ \text{m} = 7{,}47\ \text{mm}$$

45. Completa el diagrama adjunto, indicando la trayectoria que seguirá un rayo de luz amarilla monocromática que pasa a través del vidrio y del cuarzo, para salir de nuevo al aire:



Como conocemos el ángulo de incidencia del rayo y los índices de refracción del aire, del vidrio y del cuarzo, podemos determinar cuál será la desviación que sufre el rayo a medida que va atravesando cada medio. Para ello, simplemente hemos de aplicar la ley de Snell.

Al pasar del aire al vidrio, el ángulo de refracción es:

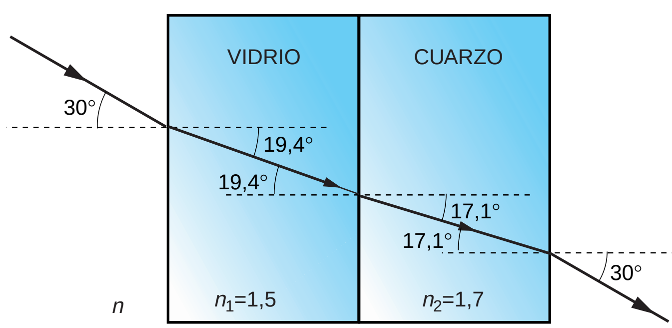
$$\frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_1}{n} \rightarrow sen\ \hat{r} = \frac{n}{n_1} \cdot sen\ \hat{i} = \frac{1}{1,5} \cdot sen\ 30^\circ = \frac{1}{3} \rightarrow \hat{r} = 19,47^\circ$$

Si trazamos otra normal a la línea de separación vidrio-cuarzo, en el punto en que incide el rayo refractado, el ángulo de incidencia con que llega el rayo al cuarzo es el que hemos calculado anteriormente. Por tanto:

$$\frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow sen\ \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot sen\ \hat{i} = \frac{1,5}{1,7} \cdot sen\ 19,47^\circ = 0,294 \rightarrow \hat{r} = 17,1^\circ$$

Por último, al salir al aire:

$$\frac{sen\ \hat{i}}{sen\ \hat{r}} = \frac{n}{n_2} \rightarrow sen\ \hat{r} = \frac{n_2}{n} \cdot sen\ \hat{i} = \frac{1,7}{1} \cdot sen\ 17,1^\circ = 0,5 \rightarrow \hat{r} = 30^\circ$$



Como vemos, el rayo sale paralelo a la dirección de entrada.