

4. Un rayo de luz roja, de longitud de onda en el vacío $650 \cdot 10^{-9}$ m, emerge al agua desde el interior de un bloque de vidrio con un ángulo de 45° . La longitud de onda en el vidrio es $433 \cdot 10^{-9}$ m.

a) Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y determine el índice de refracción del vidrio y el ángulo de incidencia del rayo.

b) ¿Existen ángulos de incidencia para los que la luz sólo se refleja? Justifique el fenómeno y determine el ángulo a partir del cual ocurre este fenómeno.

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

a) En la situación que nos propone la cuestión se está produciendo el fenómeno de refracción de la luz al pasar de un medio a otro. Al cambiar la velocidad de propagación, el frente de onda se desvía y el ángulo α_2 que forma el rayo refractado con la normal a la frontera también cambia.

En la refracción, la frecuencia ν de la luz no cambia, ya que ésta sólo depende del foco, pero sí lo hace la longitud de onda λ , que depende tanto del foco como del medio por el que se propaga la onda electromagnética.

$\lambda = \frac{v}{\nu}$, donde v es la velocidad de propagación en el medio.

Calculamos en primer lugar la frecuencia de la onda a partir de su longitud de onda en el vacío.

$$\nu = \frac{c}{\lambda_{\text{vacío}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{650 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4,62 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

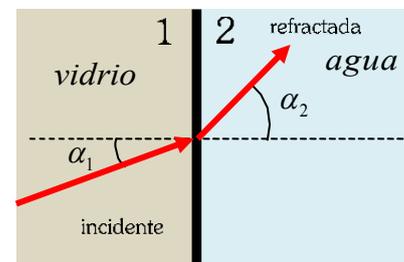
Conociendo la frecuencia, calculamos ahora la velocidad de propagación en el vidrio.

$$\lambda_{\text{vidrio}} = \frac{v_{\text{vidrio}}}{\nu} \rightarrow v_{\text{vidrio}} = \lambda_{\text{vidrio}} \cdot \nu = 433 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 4,62 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 2,00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$\text{Y el índice de refracción del vidrio será } n_1 = \frac{c}{v_{\text{vidrio}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1,5$$

Para calcular el ángulo de incidencia en el vidrio, aplicamos la ley de Snell, que relaciona los ángulos de incidencia α_1 y de refracción α_2 , con los índices de refracción n_1 del vidrio y n_2 del agua.

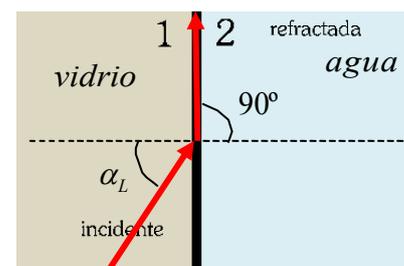
$$n_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen} \alpha_2 \rightarrow 1,5 \cdot \text{sen} \alpha_1 = 1,33 \cdot \text{sen} 45^\circ \rightarrow \text{sen} \alpha_1 = 0,627 \rightarrow \alpha_1 = 38,83^\circ$$



b) La cuestión se refiere al concepto de ángulo límite, el ángulo de incidencia a partir del cual sólo se produce reflexión, no refracción, ya que el ángulo que forma el rayo refractado con la normal es de 90° y ya no pasa al otro medio.

Si $n_1 > n_2$, el ángulo de refracción siempre será mayor que el de incidencia,

Si aumentamos el ángulo de incidencia, llegará un momento en que α_{refr} se haga 90° . Entonces el rayo no pasa al medio 2. No tenemos refracción, sino sólo reflexión. A esto se le conoce como **reflexión total**. El ángulo de incidencia para el que ocurre esto se le denomina **ángulo límite** α_{iL} (o α_L).



Aplicando la ley de Snell $\frac{\text{sen} \alpha_L}{\text{sen} 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \text{sen} \alpha_L = \frac{n_2}{n_1}$

El fenómeno de refracción total sólo se produce si $n_1 > n_2$, como es el caso de la cuestión, pero no al contrario. La expresión anterior no tendría una solución real para α_L .

El ángulo a partir del cual no se produciría rayo refractado en el agua, y habría reflexión total, es

$$\text{sen} \alpha_L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{1,5} = 0,887 \rightarrow \alpha_L = 62,46^\circ$$

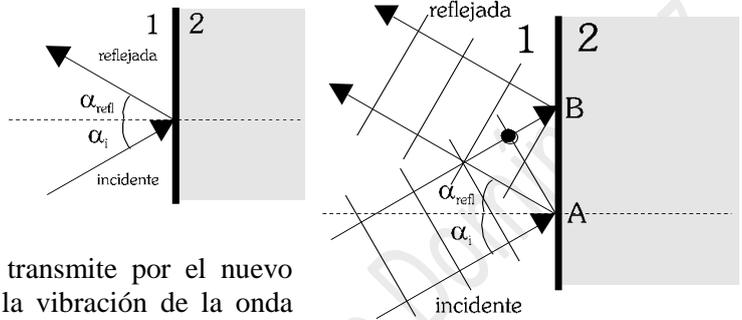
2. a) Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz y las leyes que lo rigen.
 b) Razone si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:
 i) la imagen de un objeto en un espejo convexo es siempre real, derecha y de menor tamaño que el objeto.
 ii) La luz cambia su longitud de onda y su velocidad de propagación al pasar del aire al agua.

a) La luz visible es un tipo particular de onda electromagnética. Como toda onda, puede sufrir reflexión y refracción. Son dos fenómenos ondulatorios que ocurren cuando una onda (luz, en este caso) que se propaga por un medio incide sobre la frontera con otro medio distinto. Además, puede que parte de la energía de la onda incidente sea absorbida por las partículas del nuevo medio.

Reflexión: Al llegar la onda incidente a la frontera con el medio 2, los puntos de la frontera generan una nueva onda que se propaga por el medio 1.

La onda reflejada tiene igual v , λ , y velocidad de propagación que la onda incidente.

El ángulo que forma la dirección con la normal a la frontera es igual al de la onda incidente. $\alpha_i = \alpha_{refl}$

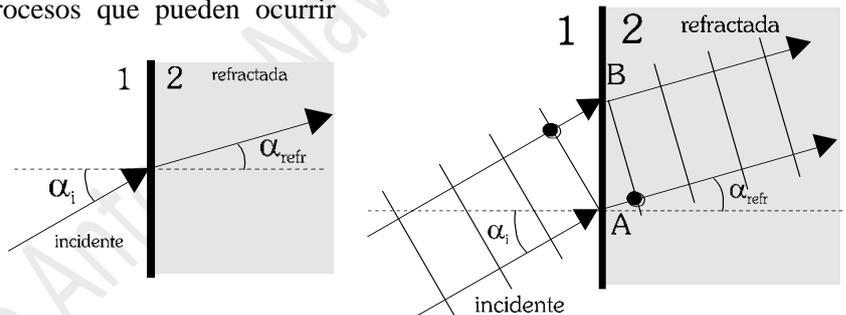


Refracción: Se forma una onda luminosa que se transmite por el nuevo medio. Los puntos de la frontera se contagian de la vibración de la onda incidente y dan lugar a lo que se denomina onda refractada.

La frecuencia de la onda sigue siendo la misma (dependía sólo del foco emisor), pero como ahora el medio es diferente, la velocidad de propagación también lo será y, por tanto también variarán λ , k .

La amplitud de la onda refractada será menor que la de la onda incidente, ya que la energía de la onda incidente debe repartirse entre los tres procesos que pueden ocurrir (reflexión, refracción, absorción)

La dirección en la que se propaga la nueva onda refractada también es diferente. Existe una relación entre los ángulos que forman los rayos incidente y refractado con la normal a la superficie. Esta relación se conoce como *ley de Snell*.



$$n_1 \cdot \text{sen} \alpha_i = n_2 \cdot \text{sen} \alpha_{refr}$$

Donde n es el índice de refracción de cada medio, que indica el cociente

entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio. Siempre $n \geq 1$ $n = \frac{c}{v}$

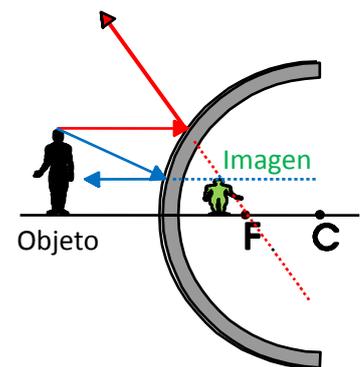
- b) i) Para razonar esta afirmación, realizamos el diagrama de rayos para obtener la imagen producida por un espejo convexo. Al estar el foco del espejo convexo "dentro" del espejo (al otro lado), todas las posiciones del objeto son similares (es imposible que el objeto está entre el foco y el espejo, *salvo en el examen de selectividad del 2012, claro ;)*)

Usamos las reglas básicas del trazado de rayos:

- Rayo que incide paralelo al eje óptico, al reflejarse, su línea pasa por el foco (o parece proceder de él).
- Rayo que incide en dirección al foco, al reflejarse sale paralelo al eje óptico.

Los rayos reflejados divergen. Prolongándolos, obtenemos la posición de la imagen.

Como vemos en el diagrama de rayos, la imagen es derecha, menor que el objeto, pero nunca es real, sino virtual (los rayos no se concentran en un punto, sino que parecen divergir de él). Por tanto, la afirmación es falsa.



- ii) La velocidad de propagación de cualquier onda (en un medio homogéneo, isótropo y no dispersivo) es una característica que depende exclusivamente del medio por el que esta se propague. Por lo tanto, al cambiar de medio, la velocidad de la luz cambia. En este caso, disminuye al pasar del aire ($n \approx 1$) al agua ($n = 4/3$).

4. Un haz compuesto por luces de colores rojo y azul incide desde el aire sobre una de las caras de un prisma de vidrio con un ángulo de incidencia de 40° .

a) Dibuje la trayectoria de los rayos en el aire y tras penetrar en el prisma y calcule el ángulo que forman entre sí los rayos en el interior del prisma si los índices de refracción son $n_{\text{rojo}} = 1,612$ para el rojo y $n_{\text{azul}} = 1,671$ para el azul, respectivamente.

b) Si la frecuencia de la luz roja es de $4,2 \cdot 10^{14}$ Hz, calcule su longitud de onda dentro del prisma.
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{aire}} = 1$

- a) Cuando un rayo de luz que se propaga por un medio transparente (en este caso, el aire) se encuentra con la frontera con otro medio, pueden ocurrir (y suelen ocurrir conjuntamente) los fenómenos de reflexión, refracción y absorción. El caso que nos preocupa en esta cuestión es el de refracción, en el que la luz pasa a propagarse por el interior del cristal del prisma. Debido a la diferencia de velocidades de propagación en los dos medios, el frente de onda se desvía, con lo que los rayos forman un ángulo con la normal diferente al de incidencia. La relación entre ambos ángulos viene dada por la ley de Snell

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$$

donde : n_1 : índice de refracción del medio 1. En este caso $n_1 = 1$

α_1 : ángulo de incidencia. En este caso 40°

n_2 : índice de refracción del medio 2.

α_2 : ángulo que forma el rayo refractado.

Como el índice de refracción es diferente para los rayos azul y rojo, también los ángulos de refracción serán distintos. Calculamos cada uno de ellos.

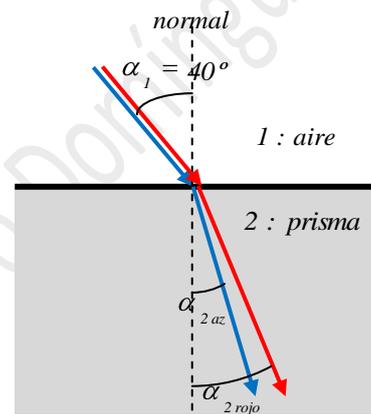
Rayo azul :

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_{2\text{azul}} \cdot \sin \alpha_2 \rightarrow 1 \cdot \sin 40^\circ = 1,671 \cdot \sin \alpha_2 \rightarrow \sin \alpha_2 = 0,3847 \rightarrow \alpha_{2\text{azul}} = 22,62^\circ$$

$$\text{Rayo rojo : } n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_{2\text{rojo}} \cdot \sin \alpha_2 \rightarrow 1 \cdot \sin 40^\circ = 1,612 \cdot \sin \alpha_2 \rightarrow \sin \alpha_2 = 0,3986 \rightarrow \alpha_{2\text{rojo}} = 23,50^\circ$$

Vemos que, al ser mayor el índice de refracción del rayo azul, su ángulo de refracción es menor que el del rojo. Es también el que más se desvía (se dispersa) de la dirección original del haz, como vemos en el dibujo.

La diferencia entre los dos ángulos de refracción es el dato que nos piden: $\Delta\alpha = 0,88^\circ$ ($0^\circ 52' 48''$)



- b) La longitud de onda (distancia más corta entre dos puntos en fase) puede calcularse a partir de la frecuencia ν y

la velocidad de propagación v
$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

La velocidad de propagación depende del medio. Además, para un medio dispersivo, depende de la frecuencia de la radiación. Como nos dan el índice de refracción para el color rojo, calculamos a partir de ahí la velocidad de propagación.

$$n = \frac{c}{v} \rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,612} = 1,861 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

Ahora podemos calcular la longitud de onda de la luz roja en el interior del prisma, teniendo en cuenta que la frecuencia no cambia al cambiar de medio.

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{1,861 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4,2 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,431 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

4. Una onda electromagnética tiene en el vacío una longitud de onda de $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.
- a) Explique qué es una onda electromagnética y determine la frecuencia y el número de onda de la onda indicada.
- b) Al entrar la onda en un medio material su velocidad se reduce a $3c/4$. Determine el índice de refracción del medio y la frecuencia y la longitud de onda en ese medio.
- $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

- a) Se entiende por onda electromagnética a la propagación de una perturbación electromagnética a través de un medio, que puede ser el vacío. A diferencia de las ondas mecánicas, en el caso de las ondas electromagnéticas la perturbación que se propaga consiste en un campo eléctrico y un campo magnético oscilantes, perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. Las ecuaciones de onda serán entonces

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \text{sen}(\omega t \pm kx)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cdot \text{sen}(\omega t \pm kx)$$

Donde E_0 y B_0 son las amplitudes de los campos eléctrico y magnético, ω es la frecuencia angular de oscilación y k es el número de onda

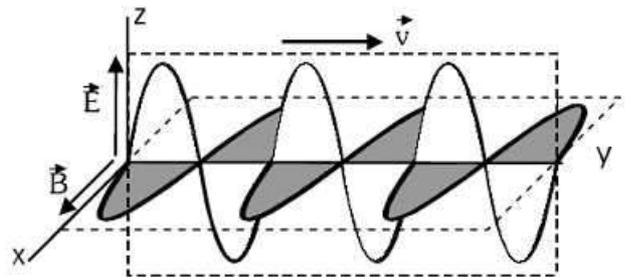
La longitud de onda λ es la distancia más corta entre dos puntos en fase. Está relacionada con la frecuencia (ν : nº de oscilaciones por segundo) y la velocidad de propagación v

mediante la expresión $\lambda = \frac{v}{\nu}$

En el vacío todas las ondas electromagnéticas se propagan a la misma velocidad. $v = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Así, la frecuencia se calcula $\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

El número de onda lo obtenemos a partir de la longitud de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 1,257 \cdot 10^7 \text{ rad / m}$



- b) Al pasar de un medio a otro, la onda electromagnética se refracta. La velocidad de propagación cambia, ya que esta magnitud depende exclusivamente del medio. En cualquier medio transparente la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas será menor que en el vacío.

El índice de refracción del medio (n) se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de propagación en dicho medio (v). Así

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\frac{3}{4}c} = \frac{4}{3} = 1,333$$

La frecuencia de la onda electromagnética es una magnitud que depende exclusivamente del foco emisor, por lo que no cambia en el fenómeno de refracción, cuando pasa a transmitirse por otro medio. Así, la frecuencia en el nuevo medio será la misma que en el vacío $\nu = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

La longitud de onda depende tanto del foco como del medio, por lo que sí se ve modificada a pasar a propagarse por el nuevo medio. La nueva longitud de onda será

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{\frac{3}{4} \cdot c}{\nu} = \frac{2,25 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 3,75 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$