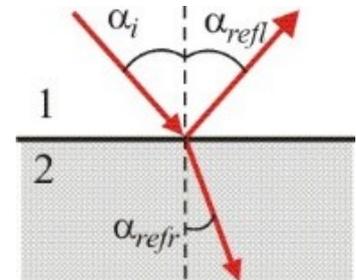


Algunos ejercicios resueltos del tema 6: La luz y las ondas electromagnéticas. (II). Reflexión y Refracción. Ley de Snell.

Resumen de lo básico para estas cuestiones:

Reflexión:

- Los rayos incidente y reflejado están en el mismo plano.
- El ángulo reflejado coincide con el ángulo incidente. $\alpha_{refl} = \alpha_i$
- Frecuencia, velocidad de propagación y longitud de onda del rayo reflejado son las mismas que la del rayo incidente.



Refracción:

- Los rayos incidente y refractado están en el mismo plano.
- Los ángulos incidente y refractado están relacionados por la ley de Snell.
 $n_1 \cdot \text{sen} \alpha_i = n_2 \cdot \text{sen} \alpha_{refr}$
(A mayor n , menor ángulo con la normal)
- La frecuencia no cambia al cambiar de medio, ya que sólo depende del foco. El color de la luz NO cambia
- La velocidad de propagación cambia. Índice de refracción $n = \frac{c}{v}$ (mayor n , menor v)
- La longitud de onda cambia $\lambda = \frac{v}{f}$ $\lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2$

RECUERDA: CALCULADORA EN GRADOS PARA ESTOS PROBLEMAS

7. Un rayo de luz amarilla de 580 nm en el aire, pasa a un cierto cristal en el que su longitud de onda pasa a ser de $5 \cdot 10^{-7}$ m.

a) Calcular razonadamente frecuencia y velocidad de propagación en cada medio.

b) Si el rayo refractado forma 30° con la normal a la frontera que separa a los dos medios, ¿Con qué ángulo incidió el rayo? Razonar, realizando un esquema de rayos.

a) Al pasar la onda a propagarse por un nuevo medio, se produce el fenómeno de refracción. En la nueva onda que se propaga por el segundo medio, se mantienen aquellas características que dependen exclusivamente del foco emisor (frecuencia, frecuencia angular, periodo) y cambian aquellas que dependen del medio, como la velocidad de propagación, la longitud de onda o el número de onda. La dirección de propagación también cambia, cumpliéndose la ley de Snell $n_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen} \alpha_2$

En el enunciado nos dan los valores de la longitud de onda (λ , distancia más corta entre dos puntos en fase) en cada medio.

En el aire, la velocidad de propagación es prácticamente la misma que en el vacío, $v_{aire} = c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

La frecuencia de la onda (f , nº de oscilaciones por segundo) la podemos obtener mediante la expresión

$$f_{aire} = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{580 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

En el cristal, la frecuencia de la onda será la misma que en el aire, ya que no depende del medio

$$f_{cristal} = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Y la velocidad de propagación la calculamos con la fórmula

$$f_{cristal} = \frac{v_{cristal}}{\lambda_{cristal}} \rightarrow v_{cristal} = f_{cristal} \cdot \lambda_{cristal} = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 2,585 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

b) Al pasar la onda a propagarse por otro medio (refracción), el frente de onda se desvía al variar la velocidad de propagación. Esto hace que la dirección de propagación cambie. Los ángulos que forman con la normal a la frontera los rayos incidente (medio 1) y refractado (medio 2) cumplen la ley de Snell

$$n_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen} \alpha_2$$

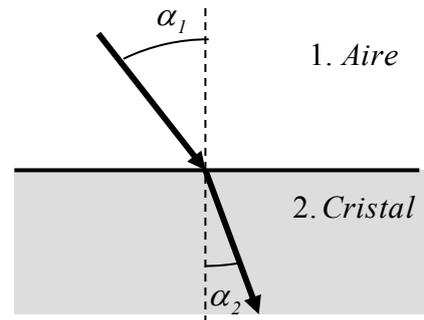
donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de cada medio ($n = \frac{c}{v}$) y α_1 y α_2 los ángulos que forman ambos rayos con la normal. (ver esquema).

Datos: $n_1 = \frac{c}{v_1} = \frac{c}{c} = 1$ $n_2 = \frac{c}{v_2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,585 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1,16$

$\alpha_2 = 30^\circ$ ángulo de refracción

Calculamos el ángulo de incidencia α_1 aplicando la ley de Snell

$1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = 1,16 \cdot \text{sen } 30^\circ \rightarrow \text{sen } \alpha_1 = 0,58 \rightarrow \alpha_1 = 35,45^\circ$



8. Un haz de luz roja penetra en una lámina de vidrio, de 30 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de 45°

a) Explique si cambia el color de la luz al penetrar en el vidrio y determine el ángulo de refracción.

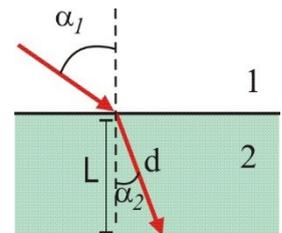
b) Determine el ángulo de emergencia (ángulo del rayo cuando sale después de atravesar la lámina). ¿Qué tiempo tarda la luz en atravesar la lámina de vidrio? ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{vidrio}} = 1,3$)

a) El color de la luz depende exclusivamente de su frecuencia, y ésta depende sólo del foco, por lo que no cambia al pasar de un medio a otro. El color del rayo de luz será el mismo.

El ángulo de refracción α_2 lo calculamos aplicando la ley de Snell.

$n_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2 \rightarrow n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_{\text{vidrio}} \cdot \text{sen } \alpha_2 \rightarrow$
 $\rightarrow 1 \cdot \text{sen } 45^\circ = 1,3 \cdot \text{sen } \alpha_2$

$\text{sen } \alpha_2 = 0,544 \rightarrow \alpha_2 = \text{arcsen} 0,544 = 32,95^\circ$



b) Como las superficies de separación entre los medios son paralelas entre sí, vemos que el ángulo con el que se refracta en un medio coincide con el ángulo con el que incide sobre el medio siguiente.

De esta forma, al aplicar la ley de Snell

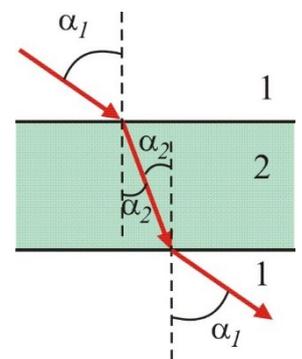
Entre los medios 1 y 2: $n_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2$

Entre los medios 2 y 3: $n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2 = n_3 \cdot \text{sen } \alpha_3$

Por lo tanto: $n_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2 = n_3 \cdot \text{sen } \alpha_3$

Como en el caso del problema los medios 1 y 3 son el mismo (el aire, $n_1 = n_3$), llegamos a la conclusión de que el ángulo α_3 (ángulo de emergencia) es el mismo que el de incidencia.

Ángulo de emergencia = 45°



Para calcular el tiempo que tarda en abandonar la lámina, consideramos que la luz viaja a velocidad constante por el medio (MRU). Así $d = v \cdot t \rightarrow t = \frac{d}{v}$

Calculamos la velocidad a partir del índice de refracción

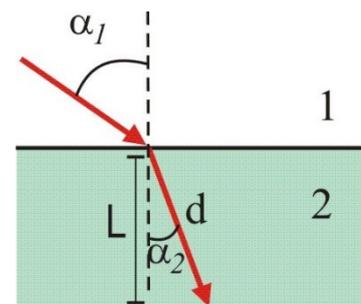
$n_2 = \frac{c}{v_2} \rightarrow v_2 = \frac{c}{n_2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{1,3} = 2,308 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Y la distancia recorrida (la diagonal) usando la definición de coseno

$L = \text{espesor de la lámina} = 0,3 \text{ m}$

$\text{cos } \alpha_2 = \frac{L}{d} \rightarrow d = \frac{L}{\text{cos } \alpha_2} = \frac{0,3 \text{ m}}{\text{cos } 32,95^\circ} = 0,3575 \text{ m}$

Calculamos el tiempo $t = \frac{d}{v} = \frac{0,3575 \text{ m}}{2,308 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}} = 1,549 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 1,549 \text{ ns}$



9. Un rayo de luz que se propaga por el agua tiene una longitud de onda de 600 nm en ese medio. Dicho rayo incide sobre un vidrio formando 20° con la normal. Calcule razonadamente:

i) Longitud de onda de la luz en el vidrio ¿Cambia de color el rayo de luz?

ii) Ángulo que forman entre sí los rayos reflejado y refractado.

($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{agua}} = 1,33$; $n_{\text{vidrio}} = 1,5$)

Estamos ante un caso de refracción. Al incidir la luz sobre la superficie de separación de dos medios, se forma una nueva onda que se transmite por el nuevo medio. Este rayo refractado tiene igual frecuencia que el incidente, pero distinta velocidad de propagación, y distinta longitud de onda. También cambia la dirección, y el ángulo que forma con la normal es distinto.

i) Al pasar de un medio a otro, la longitud de onda cambia, ya que cambia su velocidad de propagación.

Sabiendo que la frecuencia f no cambia y que $n = \frac{c}{v}$ $\lambda = \frac{v}{f}$

$$\lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2$$

Así, la longitud de onda en el vidrio será $\lambda_2 = \lambda_1 \cdot \frac{n_1}{n_2}$

Sustituimos: $\lambda_1 = 600 \text{ nm} = 600 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, $n_1 = 1,33$, $n_2 = 1,5$

$$\lambda_2 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \frac{1,33}{1,5} = 5,32 \cdot 10^{-7} \text{ m} \quad (532 \text{ nm})$$

El color de la luz no cambia, ya que sólo depende de la frecuencia, y esta es la misma en los dos medios.

ii) Como vemos en el esquema, necesitamos conocer los ángulos que forman con la normal los rayos reflejado y refractado.

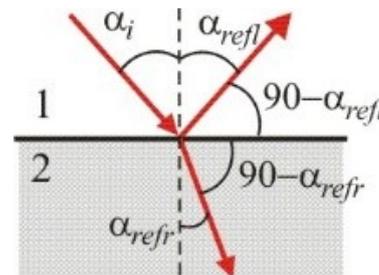
Por las leyes de la reflexión y refracción, sabemos que:

- Los rayos incidente, reflejado y refractado están en el mismo plano.
- El rayo reflejado coincide con el rayo incidente. $\alpha_{refl} = \alpha_i = 20^\circ$
- Los rayos incidente y refractado están relacionado por la ley de Snell.

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

$$1,33 \cdot \text{sen} 20^\circ = 1,5 \cdot \text{sen} \alpha_{refr}$$

$$\text{sen} \alpha_{refr} = 0,303 \quad \rightarrow \quad \alpha_{refr} = 17,64^\circ$$



Vemos en el esquema que el ángulo que forman los rayos reflejado y refractado es

$$\beta = (90 - \alpha_{refl}) + (90 - \alpha_{refr}) = 180 - \alpha_{refl} - \alpha_{refr} = 142,36^\circ$$

2019. Suplente Septiembre. B.3

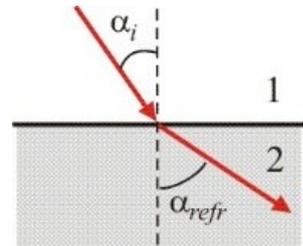
- a) Razone la veracidad o falsedad de las siguientes frases utilizando, si procede, algún ejemplo: i) El espectro electromagnético está formado sólo por las ondas electromagnéticas que podemos percibir con nuestra vista. ii) Si al iluminar un objeto con luz blanca, lo vemos de color rojo, es debido a que el objeto absorbe las tonalidades rojas de la luz.

b) Un rayo de luz monocromático de frecuencia $6 \cdot 10^{14}$ Hz incide con un ángulo de 35° sobre la superficie de separación de dos medios con diferente índice de refracción. Sabiendo que la luz viaja por el primer medio a una velocidad de $2,4 \cdot 10^8$ m s⁻¹ y que la longitud de onda en el segundo medio es de $5 \cdot 10^{-7}$ m: i) Calcule el ángulo de refracción. ii) Determine el ángulo límite de incidencia a partir del cual se produciría la reflexión total. $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹

a) i) Falso. El espectro electromagnético es el conjunto de **todas** las radiaciones electromagnéticas clasificadas por su frecuencia. Incluye desde las ondas de radio, microondas, infrarrojos, luz visible, rayos UV, rayos X, rayos gamma. El hecho de que sólo podamos percibir con nuestra vista una pequeña parte del espectro se debe a las características de nuestro ojo.

ii) Vemos los objetos porque reflejan la luz. Y lo que llega a nuestro ojo es la luz que estos reflejan. Si lo vemos rojo es porque ha reflejado luz roja, y ha absorbido el resto de las radiaciones visibles (de los colores). El enunciado dice lo contrario, por lo que es falso.

b) i) Al pasar la onda a propagarse por otro medio (refracción), el frente de onda se desvía al variar la velocidad de propagación. Esto hace que la dirección de propagación cambie. Los ángulos que forman con la normal a la frontera los rayos incidente (medio 1) y refractado (medio 2) cumplen la ley de Snell



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

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de cada medio ($n = \frac{c}{v}$) y α_i y α_{refr} los ángulos

que forman ambos rayos con la normal. (ver esquema).

Calculamos los índices de refracción:

- Del primer medio tenemos el dato de la velocidad de la luz ($v_1 = 2,4 \cdot 10^8$ ms⁻¹)

$$n_1 = \frac{c}{v_1} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2,4 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}} = 1,25$$

- Del segundo medio tenemos la longitud de onda. Podemos calcular la velocidad de propagación v_2 , ya que sabemos la frecuencia, que no cambia de un medio a otro.

$$\lambda_2 = \frac{v_2}{f_2} = \frac{v_2}{6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} \rightarrow v_2 = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

Y el índice de refracción

$$n_2 = \frac{c}{v_2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}} = 1$$

Aplicamos ahora la ley de Snell para calcular el ángulo de refracción (el ángulo de incidencia es de 35°)

$$n_1 \cdot \text{sen}\alpha_i = n_2 \cdot \text{sen}\alpha_{\text{refr}} \rightarrow 1,25 \cdot \text{sen}35^\circ = 1 \cdot \text{sen}\alpha_{\text{refr}} \rightarrow \text{sen}\alpha_{\text{refr}} = 0,717 \rightarrow \alpha_{\text{refr}} = 45,8^\circ$$

ii) El ángulo límite (α_L) es el ángulo de incidencia para el que el ángulo de refracción es de 90° . Para ángulos mayores no se produce refracción, sólo hay reflexión total. Esto sólo puede darse si $n_1 > n_2$, como es el caso ($n_1 = 1,25$, $n_2 = 1$)

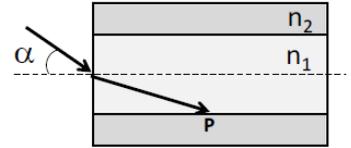
$$\text{Aplicando la ley de Snell } n_1 \cdot \text{sen}\alpha_i = n_2 \cdot \text{sen}\alpha_{\text{refr}} \rightarrow n_1 \cdot \text{sen}\alpha_L = n_2 \cdot \text{sen}90^\circ \rightarrow \text{sen}\alpha_L = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{Así } \text{sen}\alpha_L = \frac{1}{1,25} = 0,8 \rightarrow \alpha_L = 53,1^\circ \quad (\text{Ojo: ¡¡Calculadora en grados!!})$$

2019. Septiembre. B.3

a) El índice de refracción de un vidrio es mayor que el del aire. Razone cómo cambian las siguientes magnitudes al pasar un haz de luz del aire al vidrio: frecuencia, longitud de onda, y velocidad de propagación.

b) Un rayo de luz de longitud de onda en el vacío de $6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ incide desde el aire sobre el extremo de una fibra óptica, formando un ángulo α con el eje de la fibra (ver figura), siendo el índice de refracción dentro de la fibra $n_1=1,5$. La fibra está recubierta de un material de índice de refracción $n_2=1,4$. Determine: (i) La longitud de onda de la luz dentro de la fibra. (ii) El valor máximo del ángulo α para que se produzca reflexión total interna en el punto P.



$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{aire}} = 1$

- a)
- La frecuencia (f) de una onda es una magnitud que depende exclusivamente del foco emisor, pero no depende del medio. Por lo tanto, la frecuencia será la misma en ambos medios.
 - La velocidad de propagación de una onda es una magnitud que depende exclusivamente del medio por el que se propaga. En el vidrio se propaga a distinta velocidad que en el aire. El índice de refracción ($n = \frac{c}{v}$) indica cuántas veces es mayor la velocidad de la luz en el vacío que en el medio. Por tanto, cuanto mayor sea el índice de refracción de un medio, menor es la velocidad de propagación en ese medio. Así, la velocidad de la luz disminuirá al pasar del aire al vidrio.
 - La longitud de onda depende tanto del foco como del medio $\lambda = \frac{v}{f}$. Como la frecuencia es la misma, vemos que si la velocidad de propagación disminuye, la longitud de onda también disminuye al pasar del aire al vidrio.

b)

i) Dato: índice de refracción de la fibra: $n_1=1,5$
 Calculamos la frecuencia de la luz. Como el índice de refracción del aire es 1, su velocidad de propagación es igual que en el vacío, y su longitud de onda también.

$$\lambda_{\text{aire}} = \frac{v_{\text{aire}}}{f} \rightarrow f = \frac{v_{\text{aire}}}{\lambda_{\text{aire}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Calculamos la velocidad de propagación y a partir de ahí la longitud de onda

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \rightarrow v_1 = \frac{c}{n_1} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{1,5} = 2 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

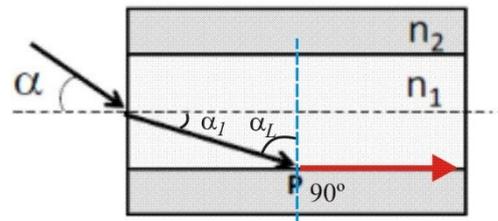
$$\lambda_1 = \frac{v_1}{f} = \frac{2 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{4,6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,35 \cdot 10^{-7} \text{ m} \text{ longitud de onda en la fibra.}$$

Otra forma más rápida: Como la frecuencia no cambia,

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \rightarrow \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \rightarrow \frac{c}{\lambda_1 \cdot n_1} = \frac{c}{\lambda_2 \cdot n_2} \rightarrow \lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2$$

Y calculamos la longitud de onda directamente a partir de los índices de refracción.

ii) Tenemos dos partes en esta cuestión: en primer lugar una reflexión desde el aire hasta el medio 1, y aquí nos piden el ángulo de incidencia α , y luego una reflexión total, en la que tendremos que calcular el ángulo límite (ángulo en el medio 1 para que el rayo refractado en el medio 2 sea 90°) entre los medios 1 y 2.



Comenzamos por el ángulo límite

$$\text{sen} \alpha_L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,4}{1,5} = 0,933 \rightarrow \alpha_L = 68,96^\circ$$

Este es el ángulo mínimo para que se produzca reflexión total.

En el esquema vemos que $\alpha_1 = 90^\circ - \alpha_L = 21,04^\circ$ Este es el valor máximo que puede tener α_1

Aplicamos la ley de Snell para calcular el ángulo de incidencia correspondiente α :

$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen} \alpha = n_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 \rightarrow 1 \cdot \text{sen} \alpha = 1,5 \cdot \text{sen} 21,04^\circ \rightarrow \text{sen} \alpha = 0,5385 \rightarrow \alpha = 32,58^\circ$$

Cuestión

a) Un rayo de luz pasa de un medio a otro, observándose que en el segundo medio el rayo se desvía acercándose a la superficie de separación de ambos medios. Razone: (i) En qué medio el rayo se propaga con mayor velocidad; (ii) En qué medio tiene menor longitud de onda.

Problema

b) Un rayo de luz que se propaga por el vacío tiene una longitud de onda de $5,46 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ e incide sobre una lámina de cuarzo cuyo índice de refracción es 1,5. Determine, justificando las respuestas:

(i) La longitud de onda del rayo en la fibra de cuarzo; (ii) Si el ángulo de refracción en el cuarzo es de 30° , determine el ángulo de incidencia. (iii) El ángulo de incidencia a partir del cual el rayo no sale al exterior.

Datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

a) Estamos ante el fenómeno de refracción, donde se produce el cambio de dirección de la onda al pasar de un medio a otro.

Los ángulos incidente y refractado están relacionados por la ley de Snell

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

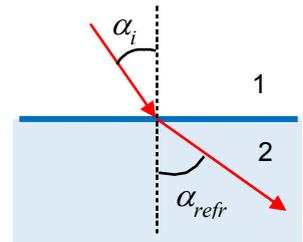
Si el rayo refractado se acerca a superficie de separación (frontera), el ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia. Por lo tanto, $n_2 < n_1$.

i) El índice de refracción del medio $n = \frac{c}{v} \rightarrow v = \frac{c}{n}$ como $n_2 < n_1 \rightarrow v_2 > v_1$

ii) Las longitudes de onda en ambos medios están relacionadas con los índices de refracción

$$\lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2 \rightarrow \lambda_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \lambda_1. \text{ Como } n_2 < n_1 \rightarrow \lambda_2 > \lambda_1$$

(Otra forma: $\lambda = \frac{v}{f}$ Como la frecuencia no cambia, ya que no depende del medio, y $v_2 > v_1 \rightarrow \lambda_2 > \lambda_1$)



b) Estamos ante la refracción de la luz al pasar del vacío al cuarzo.

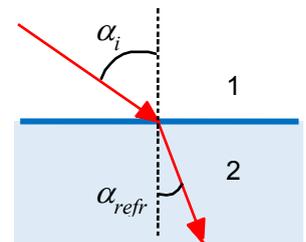
i) Como hemos visto antes, la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro, ya que cambia la velocidad de propagación.

$$\lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2 \rightarrow \lambda_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \lambda_1 = \frac{1}{1,5} \cdot 5,46 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 3,64 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

ii) Los ángulos incidente y refractado están relacionados por la ley de Snell.

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

$$1 \cdot \text{sen} \alpha_i = 1,5 \cdot \text{sen} 30^\circ \rightarrow \text{sen} \alpha_i = 0,75 \rightarrow \alpha_i = 48,59^\circ$$



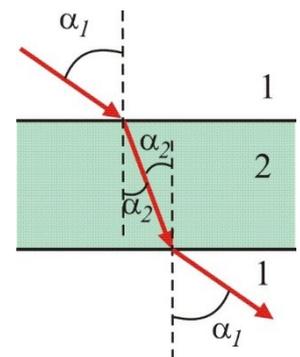
iii) Hay que leer cuidadosamente este enunciado e interpretarlo bien. El exterior es el vacío. Es decir, nos están diciendo que el rayo, que ha entrado en el cuarzo, vuelve a refractarse al atravesar la lámina (figura). Nos están preguntando por el ángulo límite al pasar del cuarzo (medio 2) al vacío (medio 1).

Por la ley de Snell $n_2 \cdot \text{sen} \alpha_2 = n_1 \cdot \text{sen} \alpha_1$

Si el rayo no sale al vacío $\alpha_1 = 90^\circ$ (reflexión total)

$$1,5 \cdot \text{sen} \alpha_{2L} = 1 \cdot \text{sen} 90^\circ \rightarrow \text{sen} \alpha_{2L} = 0,667 \rightarrow \alpha_{2L} = 41,81^\circ$$

Este es el ángulo límite desde el cuarzo hasta el vacío.



El ángulo de incidencia desde el vacío hasta el cuarzo (α_i) será de 90° .