

55

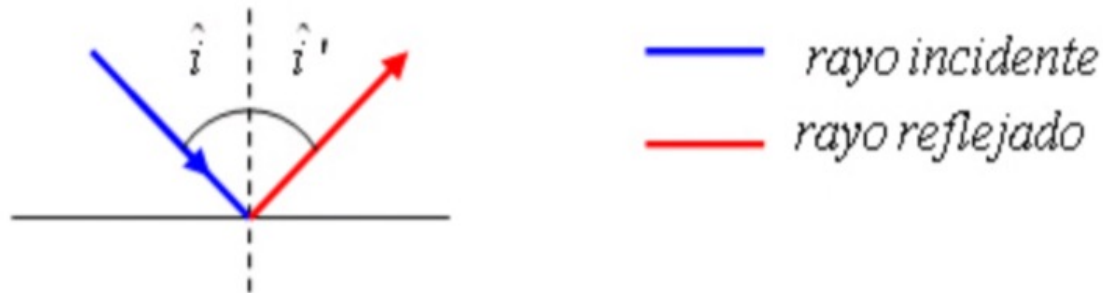
a)

Reflexión: cambio de dirección que experimenta una onda cuando incide sobre una superficie y permanece dentro del mismo medio de propagación

1.- a) Cuando un rayo luminoso incide en la superficie de separación de dos medios distintos, parte de la energía luminosa sigue propagándose en el mismo medio (se refleja) y parte pasa a propagarse por el otro medio con una velocidad distinta (se refracta).

Si el rayo incidente forma un ángulo \hat{i} con la normal a la superficie, puede demostrarse experimentalmente que:

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia (\hat{i}) y el de reflexión (\hat{i}') son iguales.



estos dos hechos se agrupan en lo que se conoce como **ley de la reflexión**.

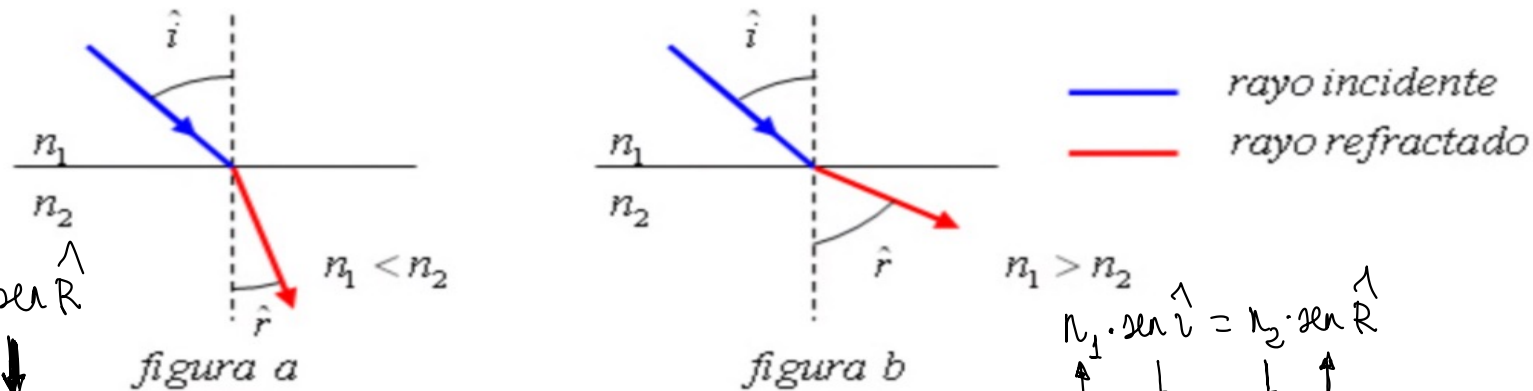
La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro con distinto índice de refracción.

Cuando la luz se propaga por un medio transparente distinto del vacío, lo hace siempre a una velocidad menor.

Se denomina índice de refracción, n , de un medio transparente a la relación entre la velocidad la luz en el vacío, c , y la velocidad de la luz e el medio, v .

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

Cuando la luz pasa de un medio con un índice de refracción n_1 a propagarse en otro medio con un índice de refracción n_2 (al tener distinto n tendrán distintas velocidades), sufre una desviación de su trayectoria original



$$n_1 \cdot \sin \hat{U} = n_2 \cdot \sin \hat{R}$$

$$\hat{U} > \hat{R} \quad (\text{Se demuestra en b})$$

$$n_1 \cdot \sin \hat{U} = n_2 \cdot \sin \hat{R}$$

$$\hat{U} < \hat{R} \quad (\text{Se demuestra en a})$$

debido a la diferencia de velocidades y según el principio de Huygens, el rayo refractado se acercará a la normal con relación al incidente si la velocidad en el segundo medio es menor (figura a), mientras que se alejará de la normal si la velocidad en ese nuevo medio es mayor (figura b)

55) b) $n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{R}$

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{R}} = \frac{n_2}{n_1} \quad \boxed{n_1 > n_2} \Rightarrow \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{R}} < 1 \quad \begin{matrix} \sin \hat{i} < \sin \hat{R} \\ \hat{i} < \hat{R} \end{matrix}$$

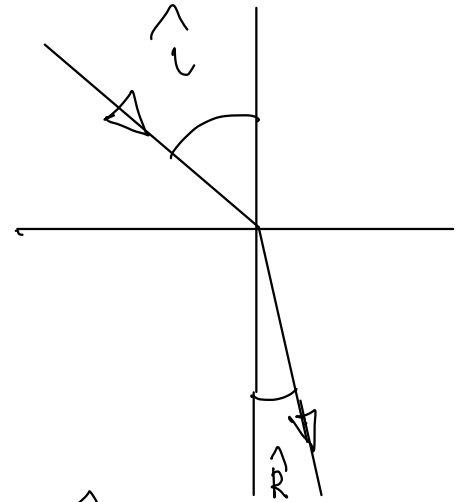
La afirmación es falsa, el ángulo de refracción sería mayor que el de incidencia.

$$n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{R}$$

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{R}} = \frac{n_2}{n_1} \quad \boxed{n_1 < n_2} \Rightarrow \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{R}} > 1$$

$$\sin \hat{i} > \sin \hat{R}$$

$$\hat{i} > \hat{R}$$



La afirmación es falsa, ya que si $\hat{i} > \hat{R}$, \hat{R} nunca llegaría a valor 90° , y por ello siempre habría refracción, no solo reflexión.

57

Amplitud del campo eléctrico \uparrow

$$a = k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$b = \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\vec{E}(z, t) = E_0 \cos(\omega z - \omega t) \hat{y}$$

Amplitud del campo magnético \uparrow

$$a = k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$b = \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\vec{B}(z, t) = B_0 \cos(\omega z - \omega t) \hat{x}$$

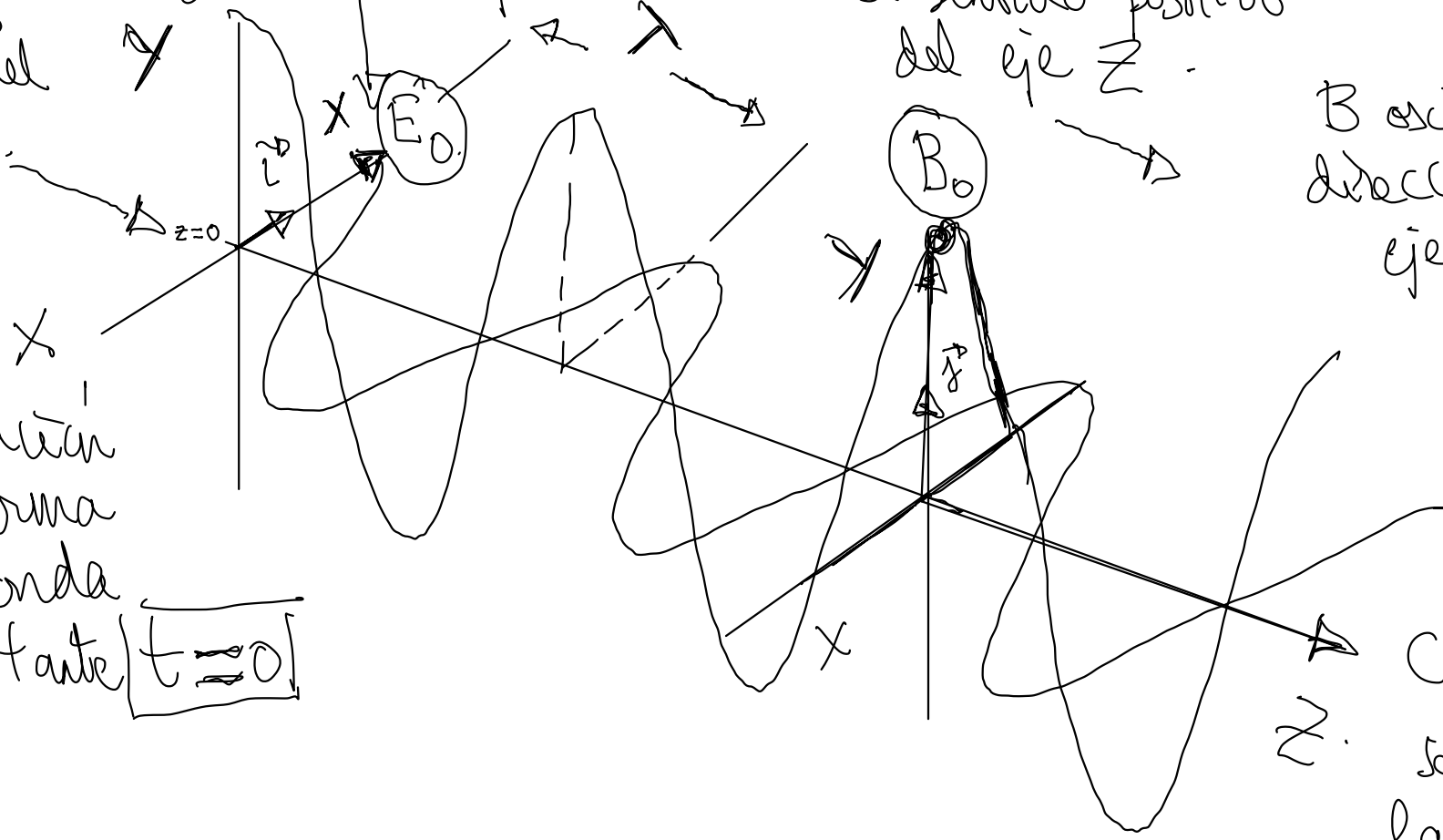
a) La onda se propaga en el sentido positivo del eje z.

E oscila en la dirección del eje x

propagación en sentido positivo del eje z.

B oscila en la dirección del eje oy \uparrow

Representación de la forma de la onda en el instante $t=0$



$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
se propaga a la velocidad de la luz.

57 a) (Continuación)

a) Las ondas electromagnéticas (o.e.m.) consisten en oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos que se propagan por el vacío y otros medios transparentes. Son ondas armónicas y transversales. La perturbación que se propaga consiste en un campo eléctrico y otro magnético oscilantes, perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación.

Su velocidad de propagación en el vacío es $c = \frac{E}{B}$,
siendo su valor $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

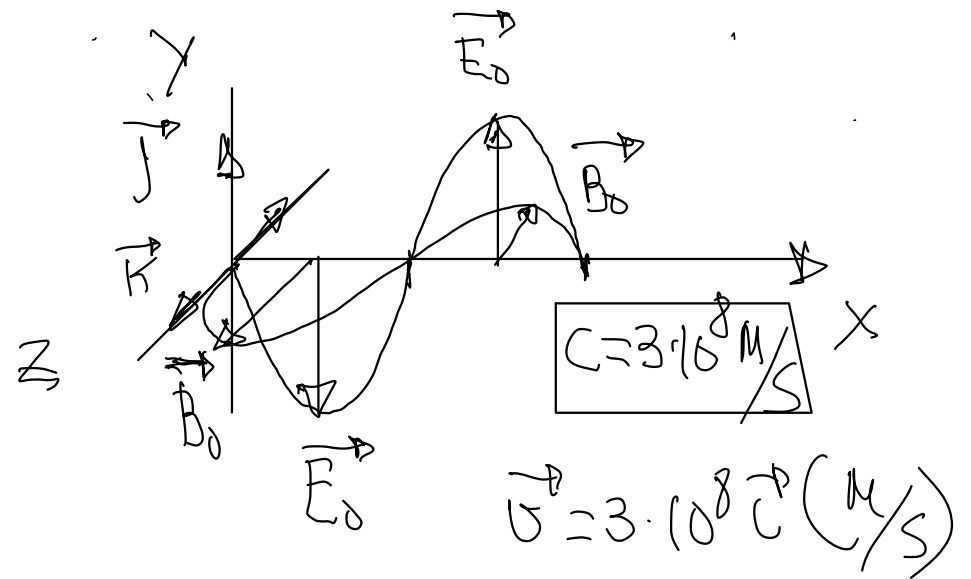
$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$$

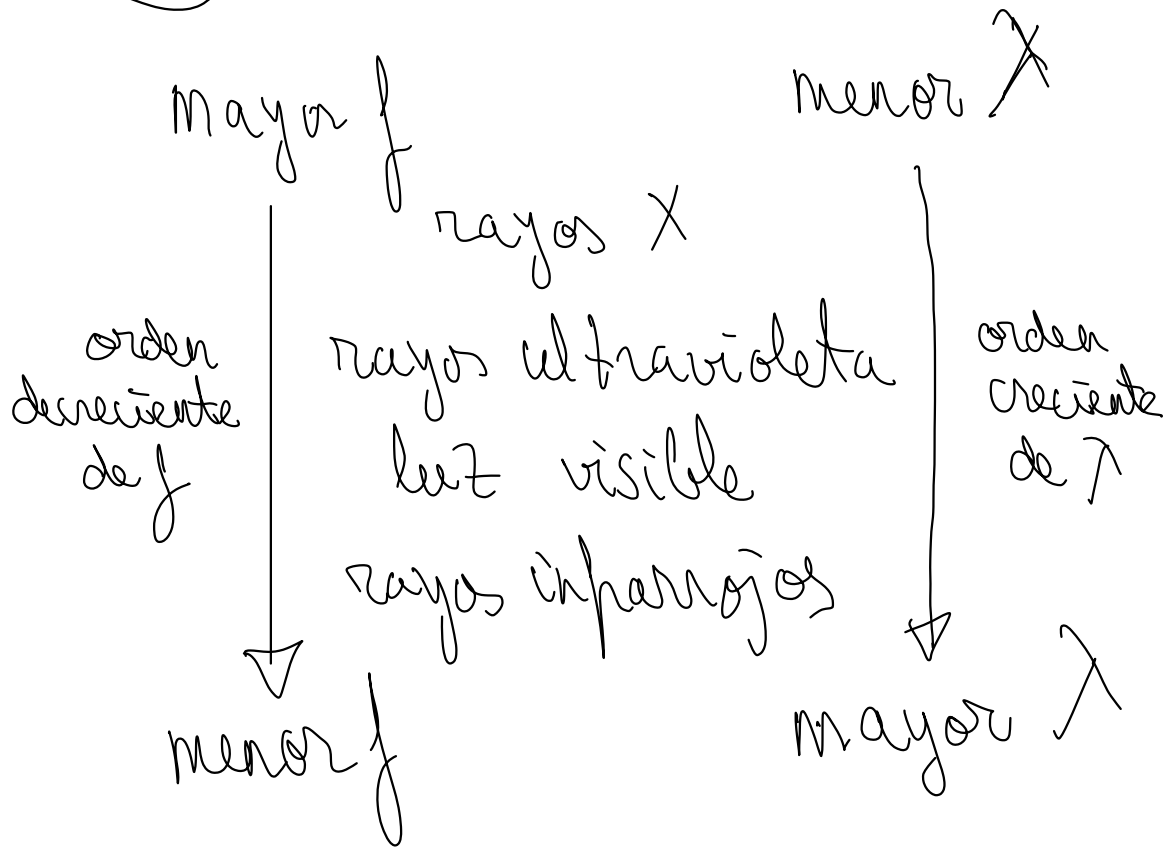
Si se ha representado la forma de la onda con ángulo de fase inicial $\psi_0 = 0$, la ecuación más general sería,

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cdot \text{sen}(\omega t - kx + \psi_0)$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \cdot \text{sen}(\omega t - kx + \psi_0)$$



(57)



$$c = \lambda \cdot f = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$


orden creciente de longitudes de onda | coincide con el orden decreciente de frecuencias.

Aplicaciones de los rayos infrarrojos = visión nocturna, mundos a distancia.

Aplicaciones de los rayos X = radiografías, análisis en cristalografía.

(61)

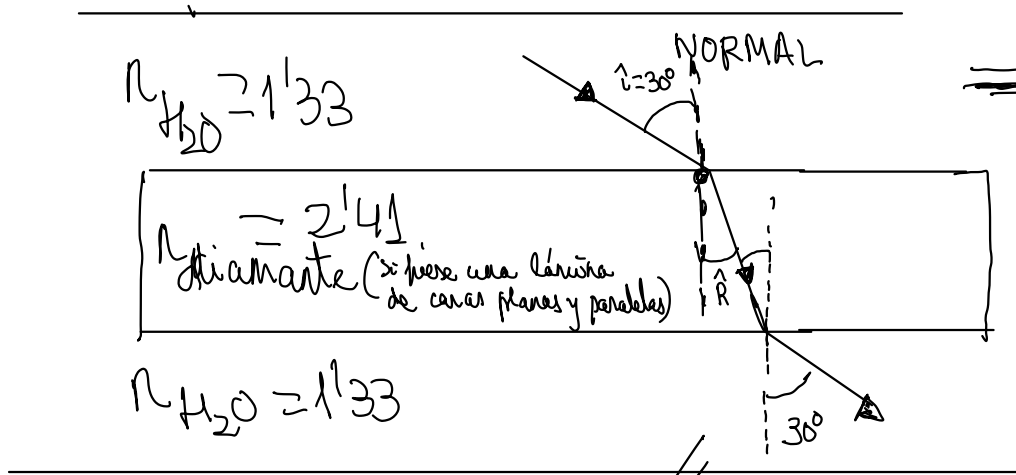
$$a) \quad c = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$b) \quad v = \lambda \cdot f'$$

$$f' = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{6 \cdot 10^6} = 5\overline{6} \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$$

70 b) continuación.



Al pasar del agua al diamante se acercaba a la normal como se vio en el apartado a), siendo $i > R$ en cualquier caso. De esta forma, R nunca podrá alcanzar 90° y el rayo penetraría siempre del agua al diamante, por lo que no tendría sentido hablar de ángulo límite en este caso.

Sin embargo, si hemos podido calcular el ángulo límite cuando pasamos del diamante al agua, ya que en este caso $i \leq R$ y por ello con valores de $i \geq i_L$ el rayo no saldría del diamante.

99

a)

$$c = \lambda_{\text{vacío}} \cdot f$$

$$\lambda_{\text{vacío}} = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.2 \cdot 10^9} = 0.25 \text{ m}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = 1.2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$$

b) La frecuencia no cambia al pasar de un medio a otro, sigue siendo $f = 1.2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{vacío}} \cdot f}{\lambda_{\text{medio}} \cdot f} \Rightarrow n = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda_{\text{medio}}}$$

$$\lambda_{\text{medio}} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{n} = \frac{0.25 \text{ m}}{1.2}$$

$$\lambda_{\text{medio}} = 0.21 \text{ m}$$

109

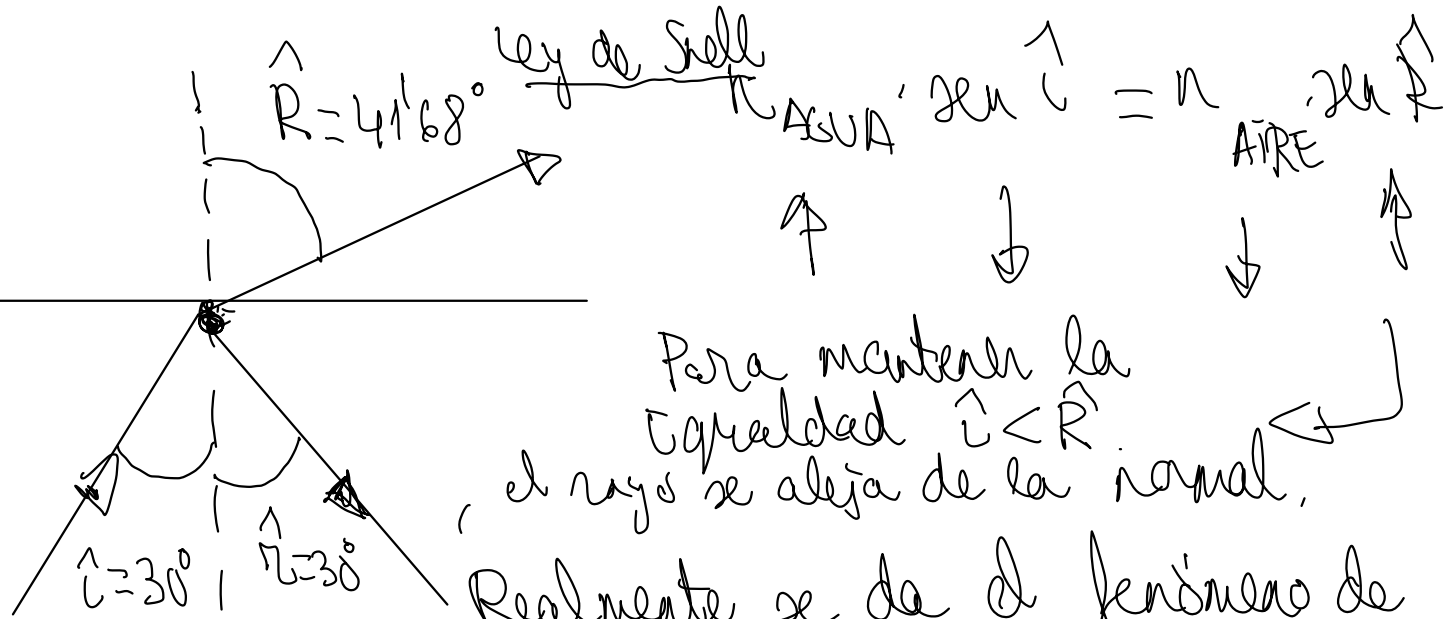
a)

AIRE

$n=1$

AGUA

$n=1.33$



ley de Snell $n_{AGUA} \cdot \text{sen } \hat{i} = n_{AIRE} \cdot \text{sen } \hat{r}$

Para mantener la igualdad $\hat{i} < \hat{R}$, el rayo se aleja de la normal. Realmente se da el fenómeno de reflexión y refracción a la vez.

ley de Snell

$$n_{AGUA} \cdot \text{sen } \hat{i} = n_{AIRE} \cdot \text{sen } \hat{r}$$

$$1.33 \cdot \text{sen } 30^\circ = 1 \cdot \text{sen } \hat{R}$$

$$\text{sen } \hat{R} = 0.665 \Rightarrow \hat{R} = \arcsen 0.665 \Rightarrow \hat{R} = 41.68^\circ$$

$\hat{R} = 41.68^\circ$

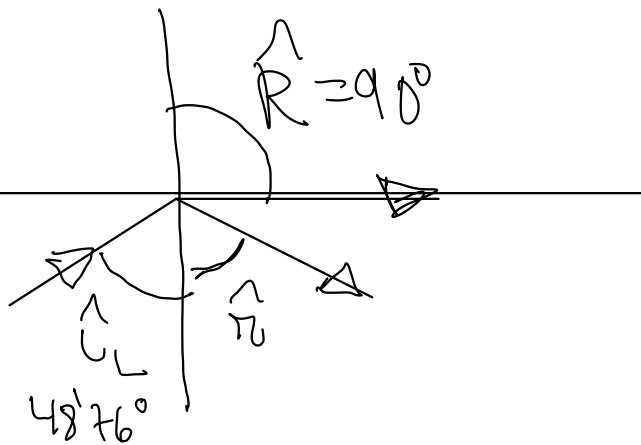
b)

AIRE

$n=1$

AGUA

$n=1.33$



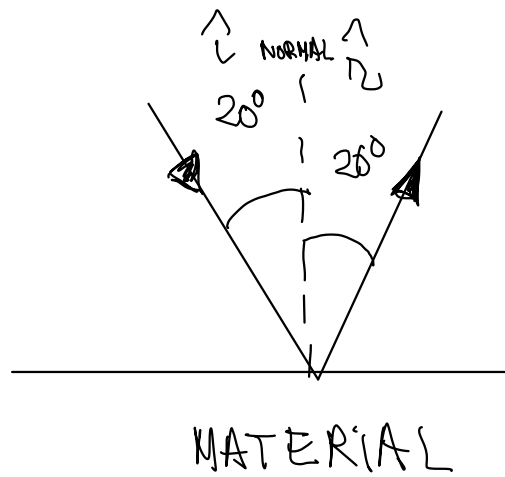
Sería el ángulo límite o ángulo de reflexión total.

$$n_{AGUA} \cdot \text{sen } \hat{i}_L = n_{AIRE} \cdot \text{sen } 90^\circ$$

$$1.33 \cdot \text{sen } \hat{i}_L = 1 \cdot 1$$

$\hat{i}_L = 48.76^\circ$

110 a)

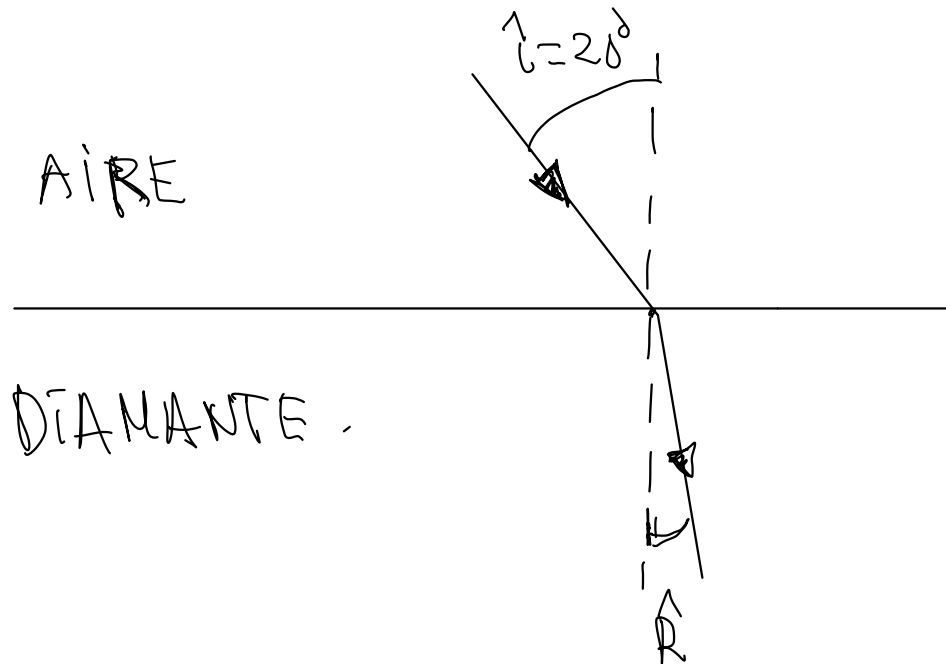


El ángulo de reflexión no depende del material, ya que el rayo reflejado permanece en el mismo medio, siendo el ángulo de incidencia \hat{i} y el ángulo de reflexión \hat{r} iguales, ambos de 20° .

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

El material en el que la velocidad de propagación de la luz sea menor, es el material que tendrá mayor índice de refracción, es decir, el diamante

$$n_{\text{diamante}} = 2.42$$



Ley de Snell

$$n_{\text{aire}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{diamante}} \cdot \sin \hat{R}$$

$$1 \cdot \sin 20^\circ = 2.42 \cdot \sin \hat{R}$$

$$\sin \hat{R} = 0.141$$

$$\hat{R} = \arcsin 0.141$$

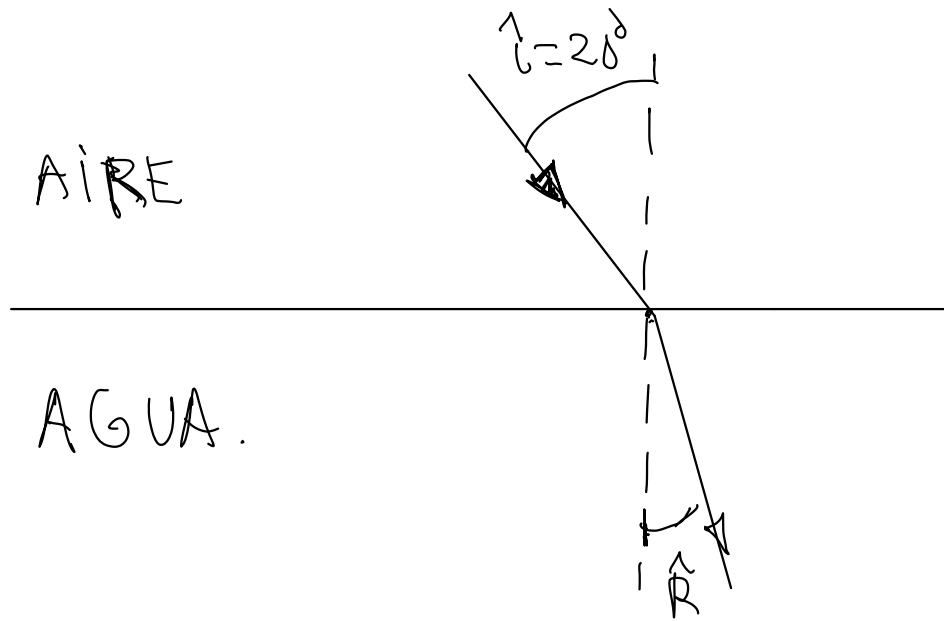
$$\hat{R} = 8.1^\circ$$

110 (b)

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{vacío}} \cdot f}{\lambda_{\text{medio}} \cdot f} \Rightarrow n = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda_{\text{medio}}}$$

La longitud de onda sería mayor en el medio de n menor, es decir, en el agua.

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 1.33$$



Ley de Snell

$$n_{\text{aire}} \cdot \sin i = n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \sin R$$

$$1 \cdot \sin 20^\circ = 1.33 \cdot \sin R$$

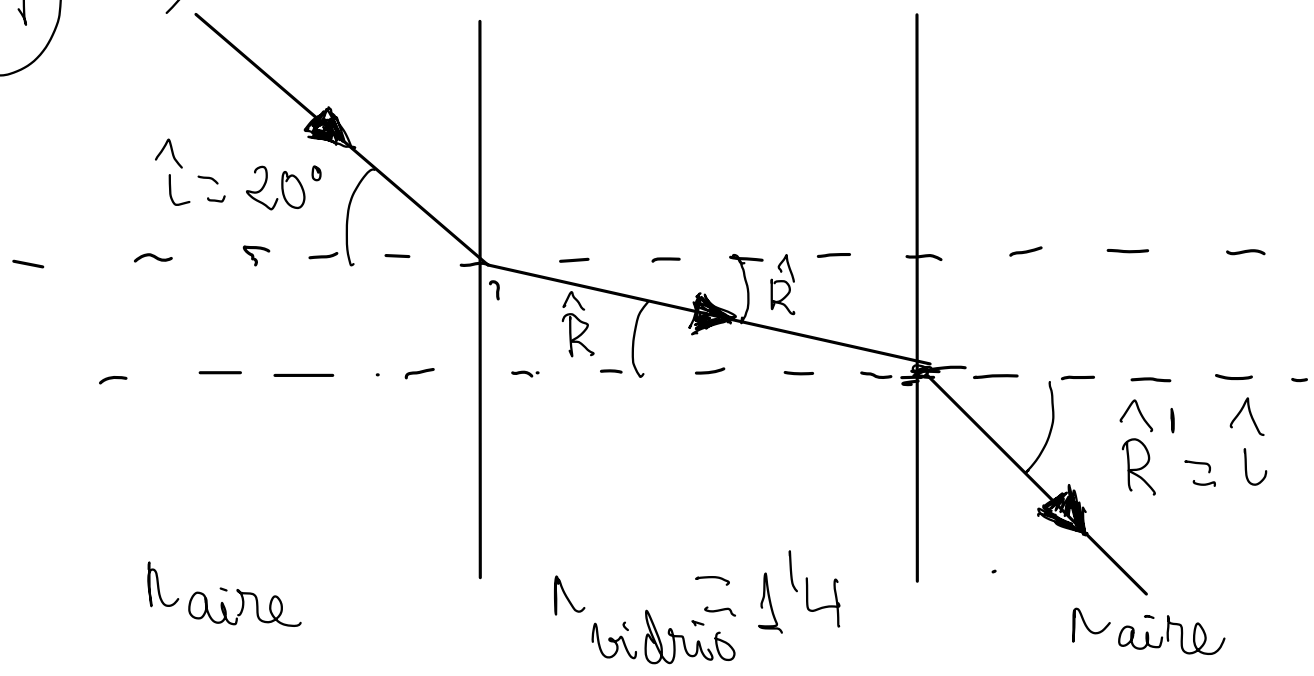
$$\sin R = 0.257$$

$$R = \arcsin 0.257$$

$$R = 14.89^\circ$$

117

a)



Ley de Snell

$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \hat{i} = n_{\text{vidrio}} \cdot \text{sen } \hat{R}$$

$$1 \cdot \text{sen } 20^\circ = 1.4 \cdot \text{sen } \hat{R}$$

$$\text{sen } \hat{R} = 0.244$$

$$\hat{R} = \arcsen 0.244$$

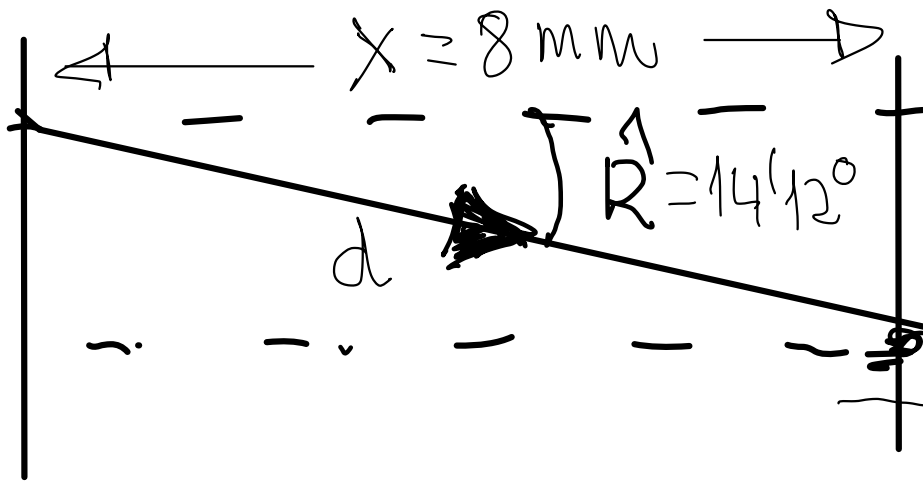
$$\hat{R} = 14.12^\circ$$

$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \hat{i} = \boxed{n_{\text{vidrio}} \cdot \text{sen } \hat{R}} \Leftrightarrow \boxed{n_{\text{vidrio}} \cdot \text{sen } \hat{R}} = n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \hat{i} \Rightarrow \text{ángulo con el que emerge.}$$

$$1.4 \cdot \text{sen } 14.12^\circ = 1 \cdot \text{sen } \hat{R}'$$

$$\hat{R}' \approx 20^\circ$$

117 (b)



$$\cos R = \frac{x}{d} ?$$

$d \Rightarrow$ distancia recorrida por la luz.

$$d = \frac{x}{\cos R} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{\cos 14.12} = \boxed{8.25 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

Primero calculamos la velocidad de la luz en el vidrio para después hallar el tiempo que tarda en recorrer esa distancia.

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

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.4} = 2.14 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$v = \frac{d}{t} \Rightarrow t = \frac{d}{v} = \frac{8.25 \cdot 10^{-3}}{2.14 \cdot 10^8} = 3.85 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

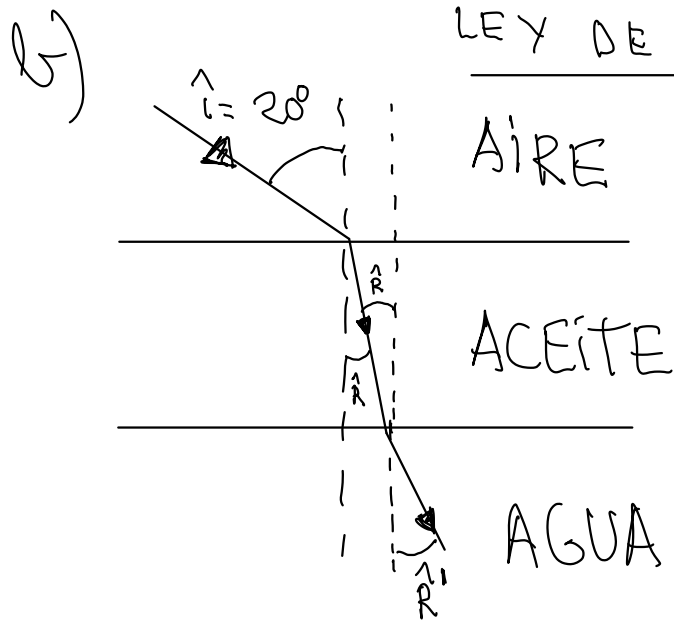
119

a) Ver ejercicio (55) a) y completar las diferencias entre la reflexión y la refracción con el siguiente esquema:

Diferencias:

- Medio por el que se propaga. La onda reflejada se propaga por el mismo medio que la onda incidente, mientras que la onda refractada se propaga por el nuevo medio. En esta diferencia se basan todas las que se exponen a continuación.
- Velocidad de propagación: La onda reflejada se transmite a la misma velocidad que la incidente. La onda refractada se propaga a una velocidad $v = \frac{c}{n}$, siendo n el índice de refracción del medio. Como el medio cambia, v también.
- La longitud de onda de la onda reflejada es igual a la de la onda incidente (ya que su velocidad es la misma). La longitud de onda de la onda refractada es diferente.
- El ángulo de reflexión coincide con el de incidencia. El ángulo de refracción varía, y viene dado por la ley de Snell

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



LEY DE SNELL

$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } i = n_{\text{aceite}} \cdot \text{sen } R \quad n_{\text{aceite}} \cdot \text{sen } R = n_{\text{agua}} \cdot \text{sen } R$$

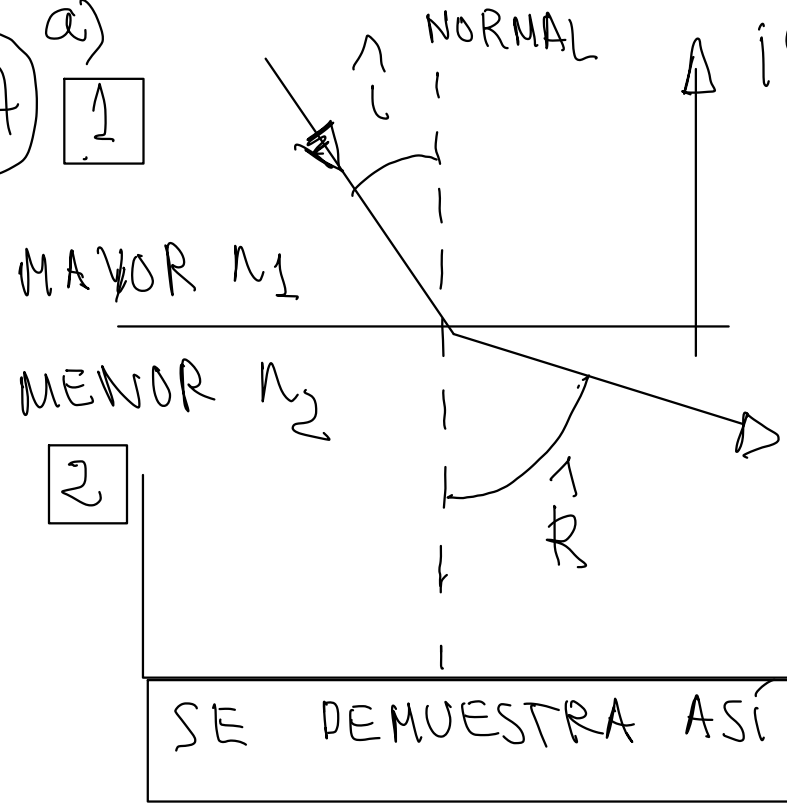
$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } i = n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{sen } R$$

$$1 \cdot \text{sen } 20^\circ = 1,33 \cdot \text{sen } R$$

$$R = 14,83^\circ$$

$$n_{\text{aceite}} = \frac{c}{v_{\text{aceite}}} \Rightarrow v_{\text{aceite}} = \frac{c}{n_{\text{aceite}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,45} = 2,07 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

127 a) 1



¡CUIDADO CON EL ENUNCIADO! SI EL RAYO SE ACERCA A LA SUPERFICIE DE SEPARACIÓN ENTRE LOS MEDIOS, SE ALEJA DE LA NORMAL

LEY DE SNELL

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

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

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} < 1$$

$$\frac{n_2}{n_1} < 1$$

$$n_2 < n_1$$

El problema nos indica que $\hat{i} < \hat{r}$

SE DEMUESTRA ASI

$$n = \frac{c}{v} \quad n_2 < n_1 \Rightarrow v_2 > v_1$$

$$v_2 > v_1$$

SE PROPAGA CON MAYOR VELOCIDAD EN EL MEDIO 2

OTRA FORMA DE DEMOSTRAR LA MENOR λ

$$n_1 = \frac{c}{v_1} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda_1} \quad n_2 = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda_2} \quad n_2 < n_1 \Rightarrow \lambda_2 > \lambda_1$$

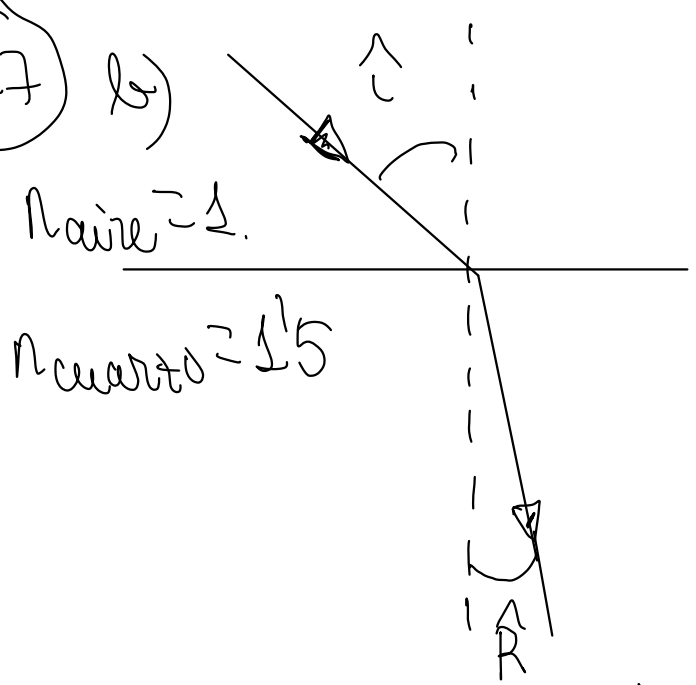
$$v_1 = \lambda_1 \cdot f \quad v_2 = \lambda_2 \cdot f$$

$$v_2 > v_1$$

$$\lambda_2 > \lambda_1$$

SU λ ES MENOR EN EL MEDIO 1

127



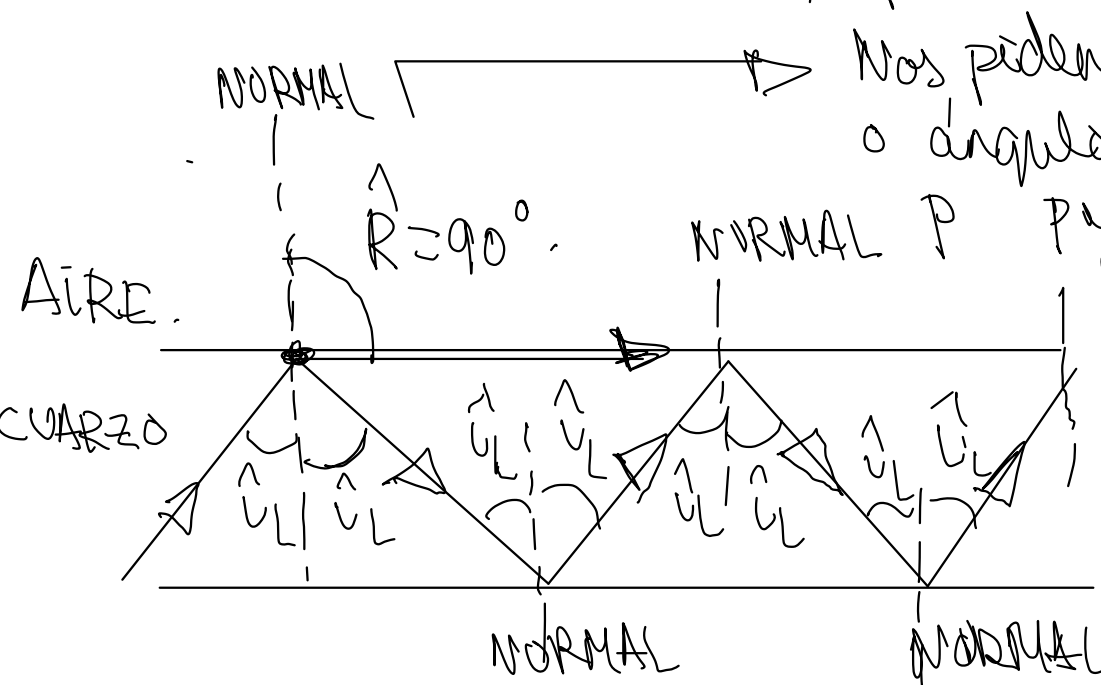
$$n_{\text{cuarzo}} = \frac{c}{v_{\text{cuarzo}}} = \frac{\lambda_{\text{aire}} \cdot f}{\lambda_{\text{cuarzo}} \cdot f}$$

→ la frecuencia es lo que caracteriza a una radiación, no cambia al pasar de un medio a otro.

$$n_{\text{cuarzo}} = \frac{\lambda_{\text{aire}}}{\lambda_{\text{cuarzo}}}$$

$$\lambda_{\text{cuarzo}} = \frac{\lambda_{\text{aire}}}{n_{\text{cuarzo}}} = \frac{546 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{1.5} = \boxed{364 \cdot 10^{-7} \text{ m}}$$

Si la velocidad de la luz en el cuarzo es menor, se debe a que λ en el cuarzo es menor, puesto que la frecuencia no varía.



Nos piden calcular el ángulo límite de reflexión o ángulo de reflexión total, denominado \hat{i}_L para el cual el rayo no sale al exterior y permanece dentro de la fibra dando únicamente la reflexión.

FUNCIONAMIENTO DE UNA FIBRA OPTICA.

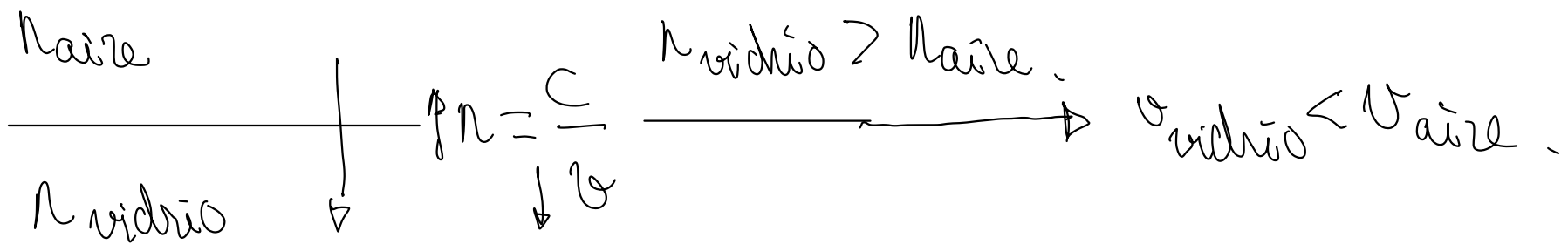
LEY DE SWELL

$$n_{\text{cuarzo}} \cdot \sin \hat{i}_L = n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ$$

$$\sin \hat{i}_L = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{cuarzo}}} = \frac{1}{1.5} = \frac{2}{3}$$

$$\hat{i}_L = \boxed{41.81^\circ}$$

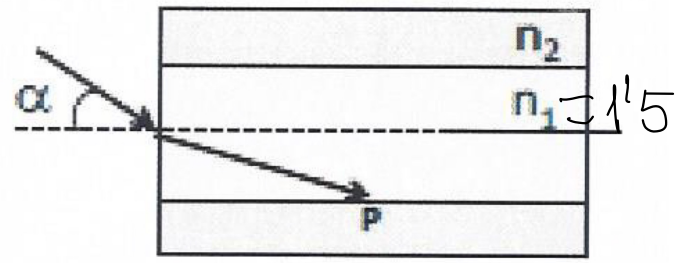
132



$v_{\text{aire}} = \lambda_{\text{aire}} \cdot f$
 $v_{\text{vidrio}} = \lambda_{\text{vidrio}} \cdot f$

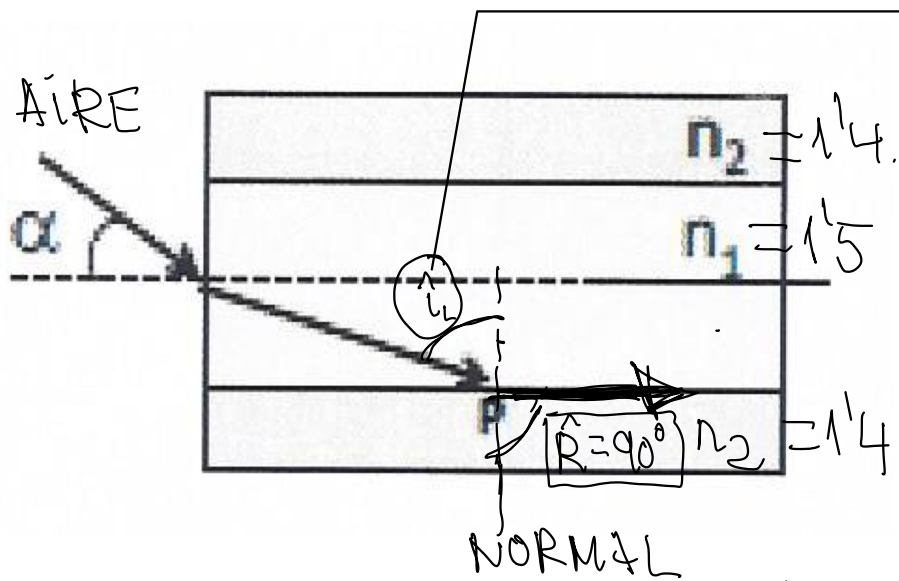
La frecuencia no varía, será una luz de las mismas características en el vidrio, por ello si sabemos que la velocidad disminuyó, ello se debe a que la longitud de onda en el vidrio será menor que en el vacío.

b)



$n_1 = \frac{c}{v_1} = \frac{\lambda_{\text{vacío}} \cdot f}{\lambda_1 \cdot f}$

$\lambda_1 = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{n} = \frac{6.5 \cdot 10^{-7}}{1.5} = 4.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$



Primero calculamos el ángulo límite i_L para que no salga del medio 1 al medio 2 (calcularemos el ángulo α que le corresponde mas adelante).

$$n_1 \cdot \sin i_L = n_2 \cdot \sin 90^\circ$$

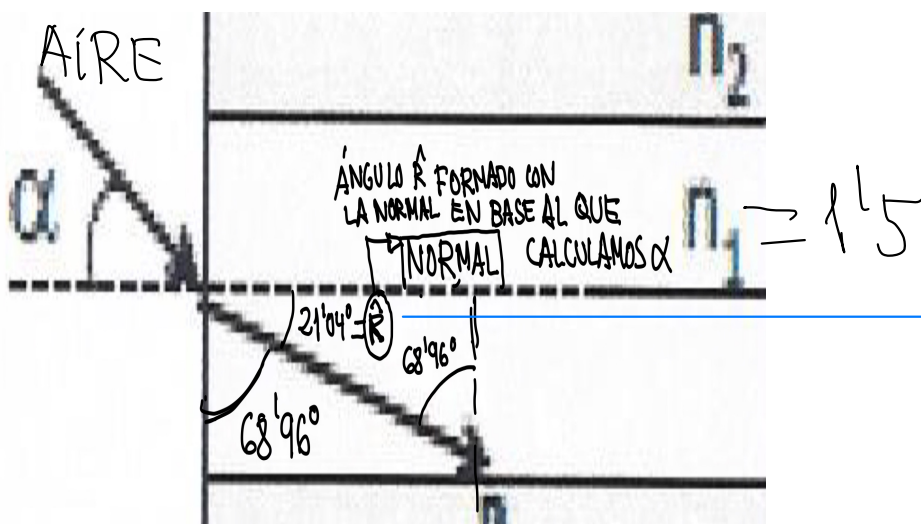
$$1.5 \cdot \sin i_L = 1.4 \cdot 1$$

$$\sin i_L = \frac{1.4}{1.5} \Rightarrow i_L = \arcsen 0.93$$

$$i_L = 68.96^\circ$$

$$R = 90^\circ - 68.96^\circ$$

$$R = 21.04^\circ$$



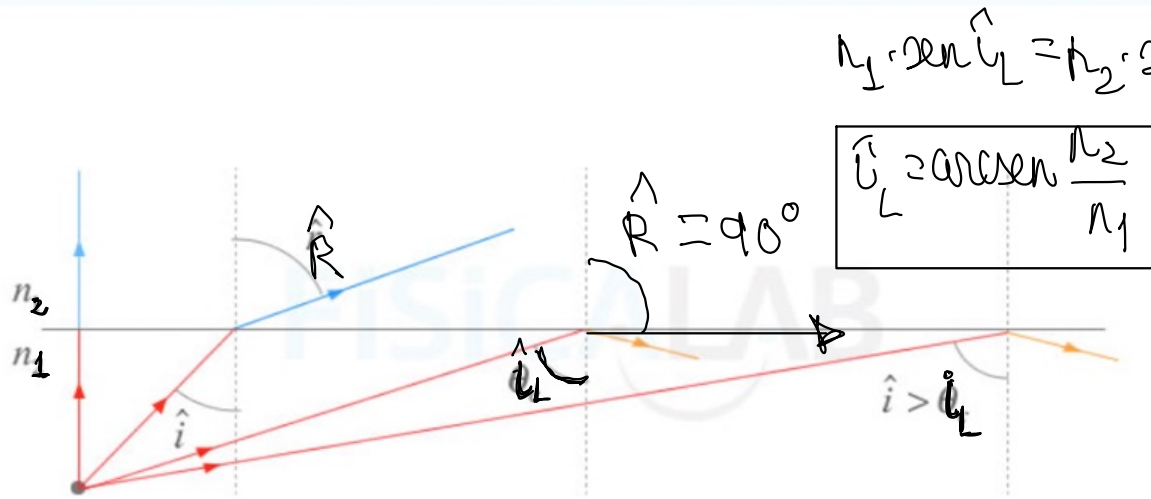
$$n_{\text{AIRE}} \cdot \sin \alpha = n_1 \cdot \sin R$$

$$1 \cdot \sin \alpha = 1.5 \cdot \sin 21.04^\circ$$

$$\sin \alpha = 0.54$$

$$\alpha = 32.58^\circ$$

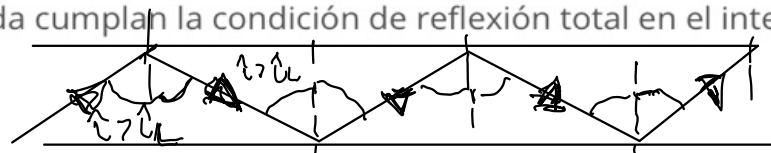
135
a)



Reflexión Interna Total

Si un rayo de luz incide con un ángulo menor que el ángulo ~~límite~~ ^{límite} sufre reflexión y refracción. En cambio, cuando el ángulo de incidencia es mayor o igual que el ángulo ~~límite~~ ^{límite}, como es el caso de los dos rayos más a la derecha, el rayo no se refracta, sólo se refleja, desplazándose únicamente en el mismo medio

El fenómeno de la reflexión total tiene numerosos usos pero uno de los ejemplos más extendidos es en **fibras ópticas**, ampliamente utilizadas en las telecomunicaciones y en la medicina (endoscopios). De una manera simplificada podemos decir que una fibra óptica no es más que un cable flexible de material transparente que cuenta con un índice de refracción tal que dicho índice es mayor que el índice de refracción del material que lo recubre. De esta manera, cuando se introduce un pulso de luz con un determinado ángulo de entrada en la fibra se consigue que quede confinado en su interior llegando al final sin apenas pérdida de intensidad, ya que todas las reflexiones que se producen cumplen la condición de reflexión total. Así, los ángulos posibles de entrada de rayos de luz a la fibra definen un **cono de aceptación** dentro del cual deben estar los rayos que se pretenda cumplan la condición de reflexión total en el interior de la fibra.



FIBRA ÓPTICA

$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i}_L = n_2 \cdot \text{sen } 90^\circ$$

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

Condiciones que han de cumplirse para que de la reflexión total

= $n_2 > n_1$ para que $R > i$ y el rayo se aleje de la normal pudiendo cumplir que $R = 90^\circ$ cuando el ángulo de incidencia sea $i \geq i_L$

- que el rayo incida con $i \geq i_L$

b.)



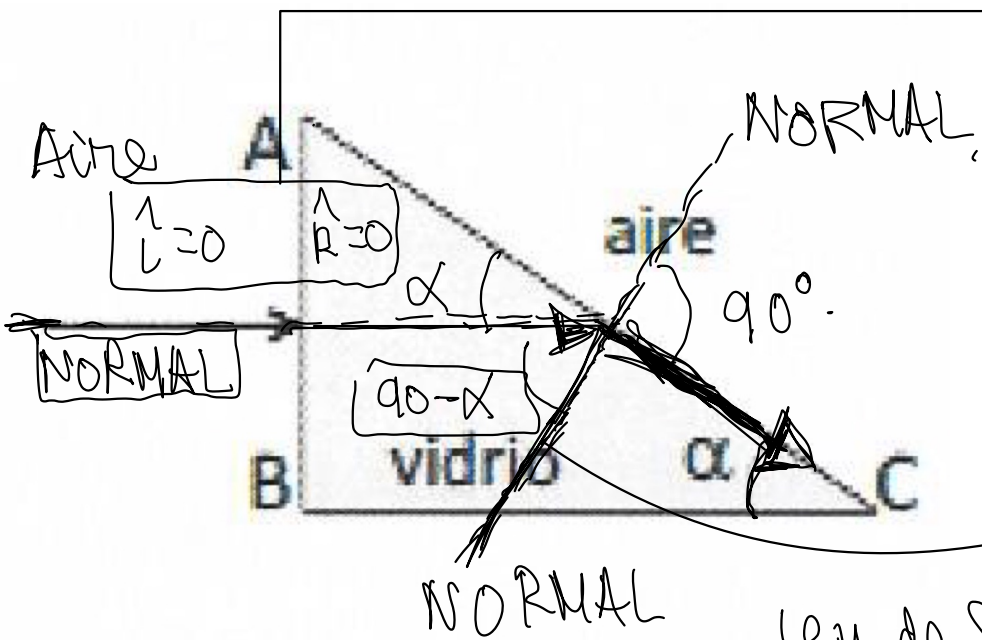
La frecuencia en el aire es la misma que en el vidrio

$$c = \lambda_{\text{aire}} \cdot f$$

$$f = \frac{c}{\lambda_{\text{aire}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} = \boxed{5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}}$$

$$n_{\text{vidrio}} = \frac{c}{v_{\text{vidrio}}} = \frac{\lambda_{\text{aire}} \cdot f}{\lambda_{\text{vidrio}} \cdot f}$$

$$\lambda_{\text{vidrio}} = \frac{\lambda_{\text{aire}}}{n} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{1.5} = \boxed{4 \cdot 10^{-7} \text{ m}}$$



→ cuando penetra en el prisma, ocurre que $i = 0^\circ$ y $r = 0^\circ$

$$n_{\text{aire}} \cdot \sin 0^\circ = n_{\text{vidrio}} \cdot \sin r$$

$$0 = n_{\text{vidrio}} \cdot \sin r$$

$$\sin r = 0 \Rightarrow r = 0^\circ$$

Para que no salga del vidrio al aire

$$n_{\text{vidrio}} \cdot \sin(90-x) = n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ$$

$$n_{\text{vidrio}} \cdot \cos(x) = n_{\text{aire}} \cdot 1$$

$$\cos x = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{vidrio}}} = \frac{1}{1.5} = \frac{2}{3}$$

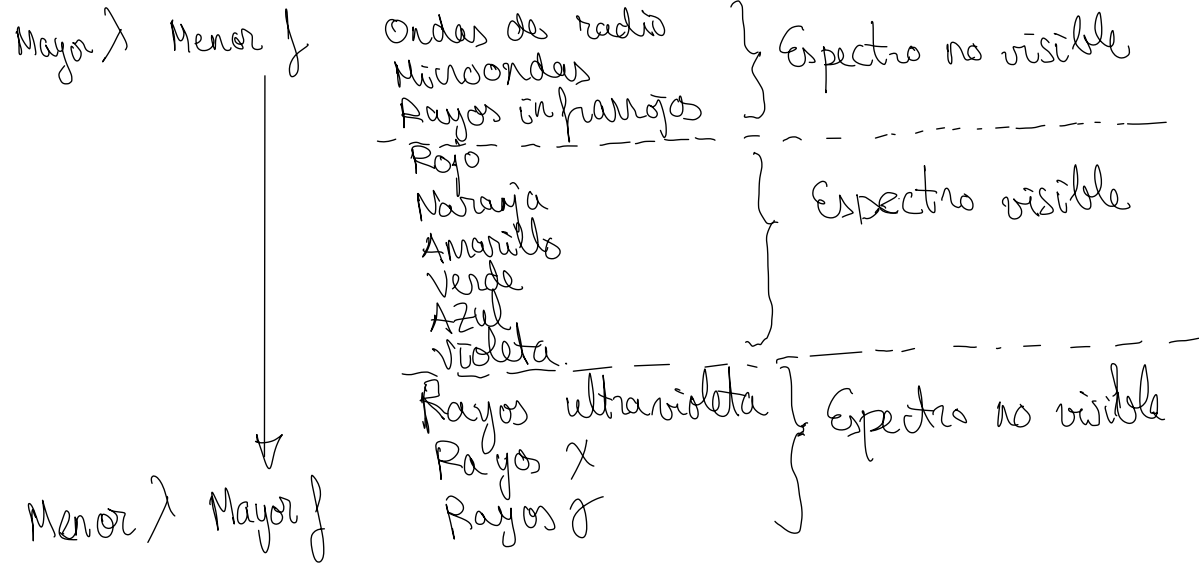
$$\boxed{\alpha = 48.19^\circ}$$

Ley de Snell

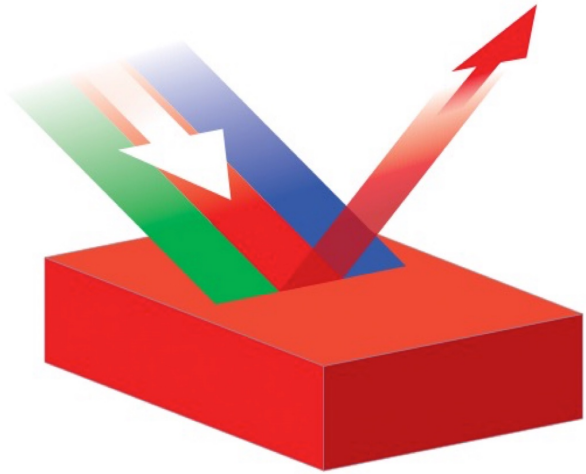
138

i)

a) **Falso** la región del espectro electromagnético visible es solamente aquella comprendida entre el rojo y el violeta, la región del espectro con frecuencias inferiores al rojo o superiores al violeta no es visible

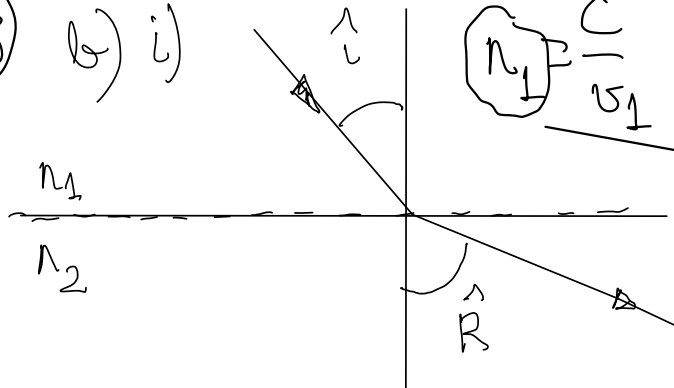


b) ii)



Falso si el cuerpo lo vemos rojo, ello se debe a que absorbería todas las tonalidades excepto la roja, la cual reflejaría y nos daría la información sobre su color.

138 b) i)



Adaptamos la ley de Snell a los datos del problema

$$n_1 = \frac{c}{v_1}$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2} = \frac{\cancel{\text{vacío}} \cdot f}{\lambda_2 \cdot \cancel{f}}$$

$$c = \cancel{\text{vacío}} \cdot f$$

$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{R}$$

$$\frac{c}{v_1} \cdot \text{sen } \hat{i} = \frac{\cancel{\text{vacío}}}{\lambda_2} \cdot \text{sen } \hat{R}$$

$$\frac{3 \cdot 10^8}{214 \cdot 10^8} \cdot \text{sen } 35^\circ = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10^{-7}} \cdot \text{sen } \hat{R}$$

$$\text{sen } \hat{R} = 0.717$$

$$\hat{R} = \arcsen 0.717$$

$$\hat{R} = 45.8^\circ$$

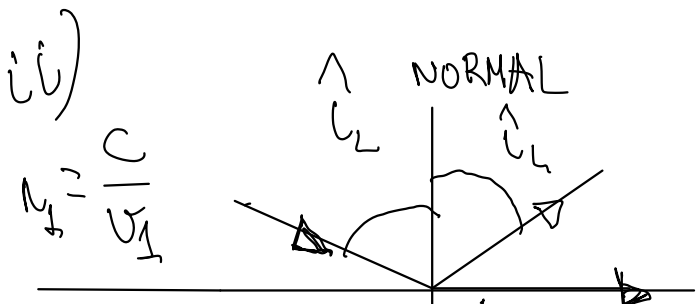
$$\lambda_{\text{vacío}} = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{14}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

(La da el problema)

CONCLUSIÓN: EL MEDIO 2 ES EL VACÍO.

$$n_2 = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda_2} = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10^{-7}} = 1$$



$n_2 = 1$ Hallado en ii)
(VACÍO) (AIRE)

$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i}_L = n_2 \cdot \text{sen } \hat{R}$$

$$\frac{c}{v_1} \cdot \text{sen } \hat{i}_L = 1 \cdot \text{sen } 90^\circ$$

$$\text{sen } \hat{i}_L = \frac{v_1}{c} = \frac{214 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^8} = \frac{4}{5}$$

$$\hat{i}_L = \arcsen \frac{4}{5}$$

$$\hat{i}_L = 53.13^\circ$$