

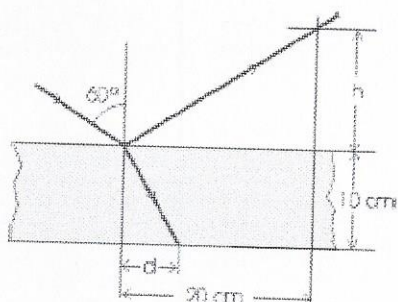
1. a) Explique, con ayuda de un esquema, los fenómenos de refracción de la luz y de reflexión total.
b) El índice de refracción de las sustancias disminuye al aumentar la longitud de onda. ¿Se desviará más la luz roja o la azul cuando los rayos inciden en el agua desde el aire? Razone la respuesta.

2. a) ¿Por qué la profundidad real de una piscina llena de agua es siempre mayor que la profundidad aparente? **ÓPTICA**
b) Explique qué es el ángulo límite y bajo qué condiciones puede observarse.

3. a) Construya gráficamente la imagen obtenida en un espejo cóncavo de un objeto situado entre el espejo y el foco. ¿Qué características tiene dicha imagen? **ÓPTICA**
b) Los espejos convexos se emplean, por sus características, en los retrovisores de los automóviles, en los espejos de los cruces en las calles, etc. Explique por qué.

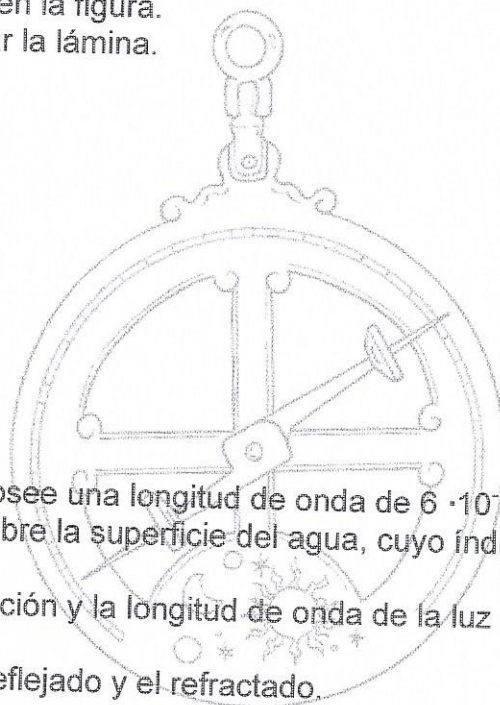
4. Una lámina de vidrio, de índice de refracción 1,5 de caras paralelas y espesor 10 cm, está colocada en el aire. Sobre una de sus caras incide un rayo de luz, como se muestra en la figura. Calcule:

- a) La altura h y la distancia d marcadas en la figura.
b) El tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina.
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$



5. Un rayo de luz monocromática, que posee una longitud de onda de $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ en el aire, incide con un ángulo de 30° sobre la superficie del agua, cuyo índice de refracción es 1,33. Calcule:

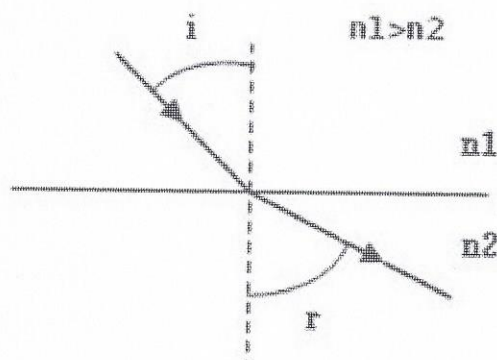
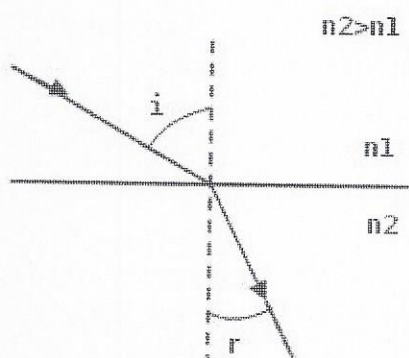
- a) La frecuencia, la velocidad de propagación y la longitud de onda de la luz en el agua.
b) El ángulo que forman entre sí el rayo reflejado y el refractado.
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$



1. –

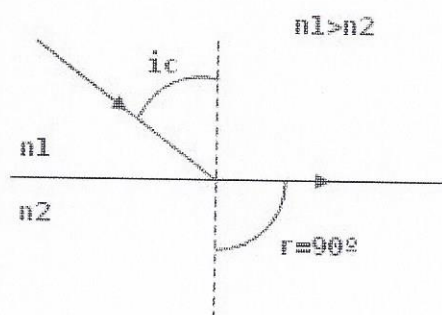
a) La refracción es la desviación de la luz cuando cambia su propagación de un medio, con índice de refracción n_1 , a otro con índice de propagación n_2 distinto del anterior.

Si n_2 (medio en el que entra) es mayor que n_1 (medio del que proviene), el rayo refractado se acerca a la normal. En caso contrario se aleja de la normal



se cumple la ley de Snell $n_1 \cdot \sen \hat{i} = n_2 \cdot \sen \hat{r}$.

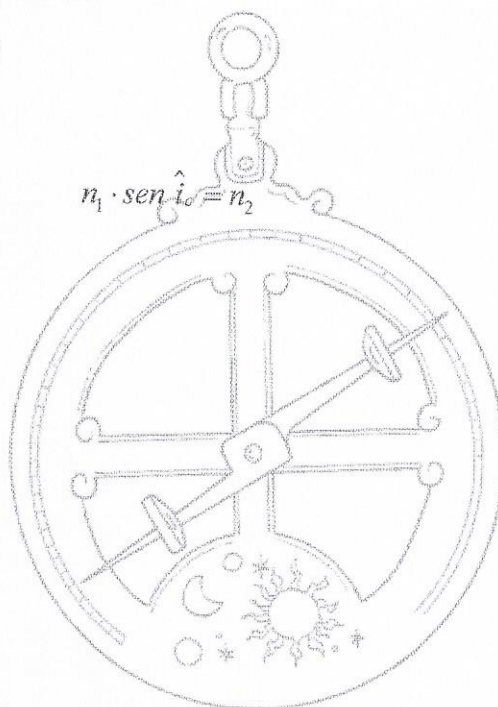
La reflexión total solo se puede producir en el segundo caso, es decir cuando $n_1 > n_2$, y lo hará siempre que $\hat{i}$ sea mayor que un ángulo llamado crítico (o límite) que es el ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de 90°



aplicando la ley de Snell y como $\sen 90^\circ = 1$

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

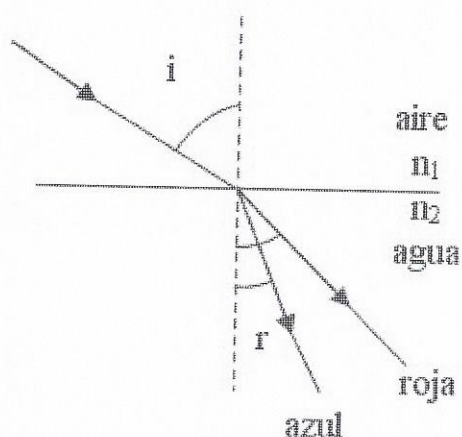
$$n_1 \cdot \sen \hat{i}_c = n_2$$



1. –

b) Si el índice de refracción (n) es inversamente proporcional a la longitud de onda (λ), será directamente proporcional a la frecuencia (f); a mayor frecuencia, mayor índice de refracción.

La luz azul tiene mayor frecuencia que la roja, por lo tanto al pasar al agua, el índice de refracción de la luz azul será mayor que el de la roja

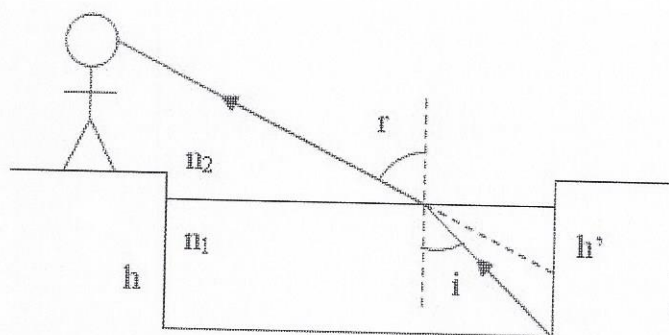


$$\text{sen } \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen } \hat{i} \quad \text{como } n_2(\text{azul}) > n_2(\text{roja}) \text{ implica que } \hat{r}_{\text{azul}} < \hat{r}_{\text{roja}}$$

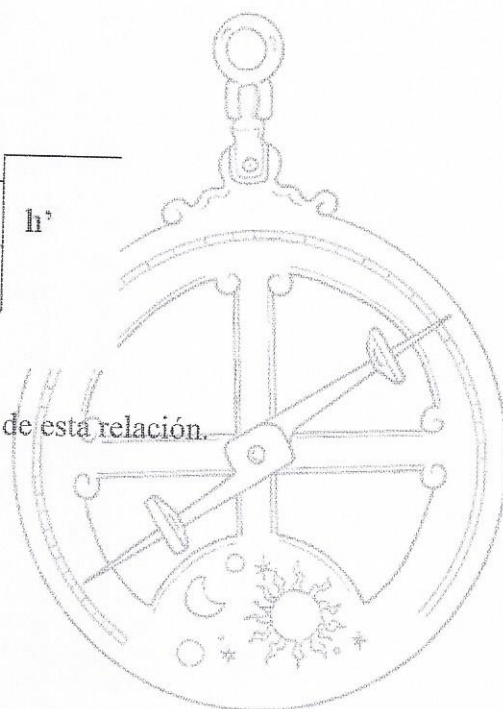
como se ve en la figura, se desvía mas la luz azul de la trayectoria inicial del rayo.

2. –

a) El rayo refractado se separa de la normal ya que $n_1 > n_2$ y el observador ve el fondo en h' que es menor que la altura real h

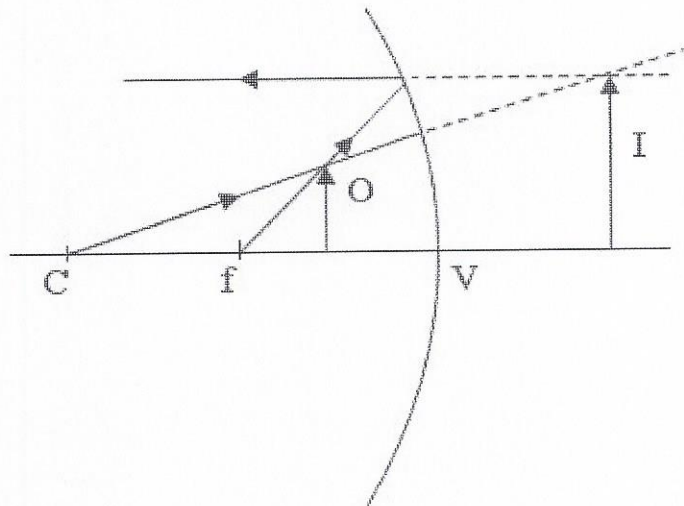


b) Ver apartado “a” del problema número 1 de esta relación.



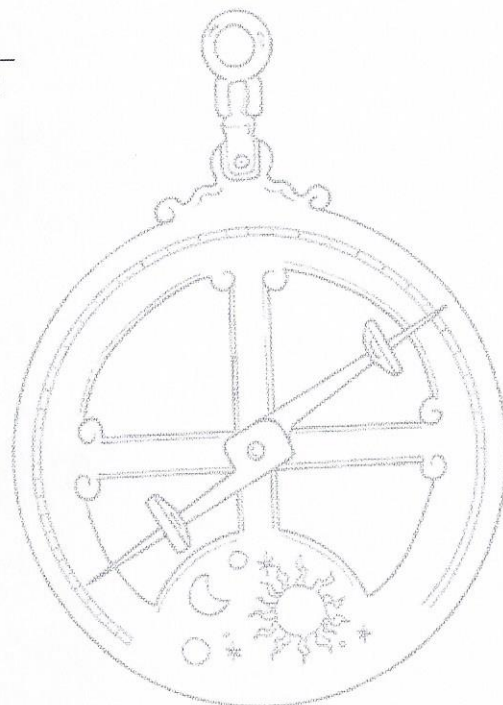
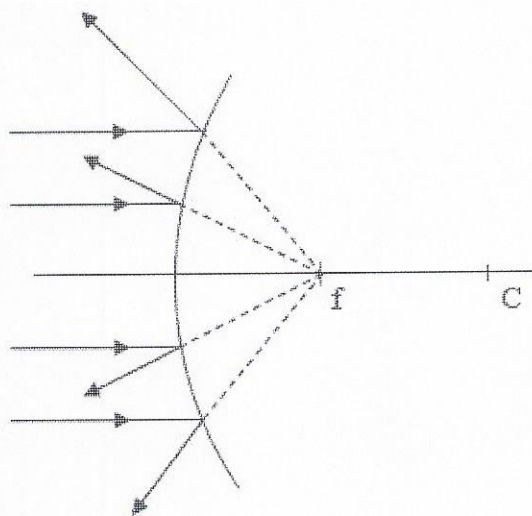
3. –

a)



La imagen es virtual, derecha y aumentada.

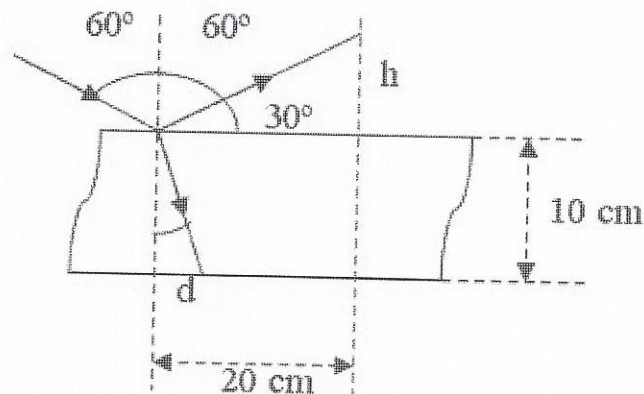
b) Como se ve en la figura, los rayos divergen al reflejarse en su superficie, por lo tanto el campo de visión de estos espejos es más amplio



ÓPTICA FCA 04 ANDALUCÍA

4. - n_1 (aire) = 1 n_2 (vidrio) = 1,5

a) $\hat{i} = \hat{i}' = 60^\circ$



$$\tan 30^\circ = \frac{h}{20 \text{ cm}} \quad \text{despejando} \quad h = 20 \text{ cm} \cdot \tan 30^\circ = 11,54 \text{ cm}$$

$$\sin \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \hat{i} = \frac{1}{1,5} \cdot \sin 60^\circ = 0,577 \quad \hat{r} = \arcsen 0,577 = 35,26^\circ$$

$$\tan \hat{r} = \frac{d}{10 \text{ cm}} \quad \text{despejando} \quad d = 10 \text{ cm} \cdot \tan 35,26^\circ = 7,07 \text{ cm}$$

b) El espacio recorrido por la luz en el vidrio es

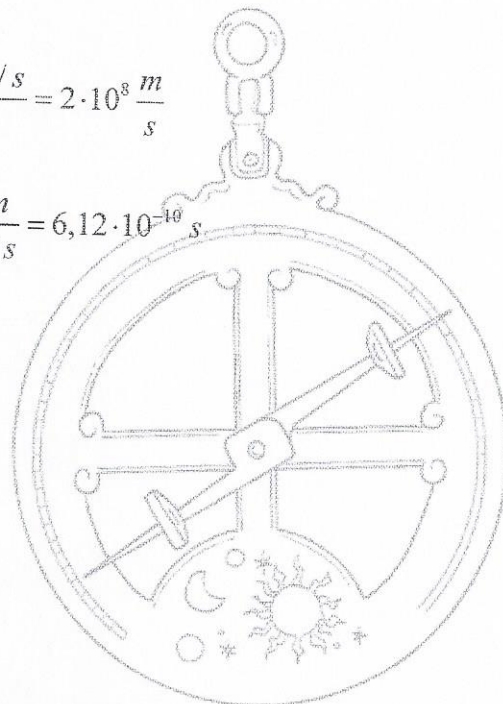
$$e = \sqrt{10^2 + 7,07^2} = 12,24 \text{ cm} = 0,1224 \text{ m}$$

la velocidad de la luz en el vidrio es

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,5} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

como el movimiento es uniforme

$$t = \frac{e}{v} = \frac{0,1224 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 6,12 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$



ÓPTICA FCA 04 ANDALUCÍA

5. - $\lambda_{\text{aire}} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ $n_1 (\text{aire}) = 1$ $n_2 (\text{agua}) = 1,33$

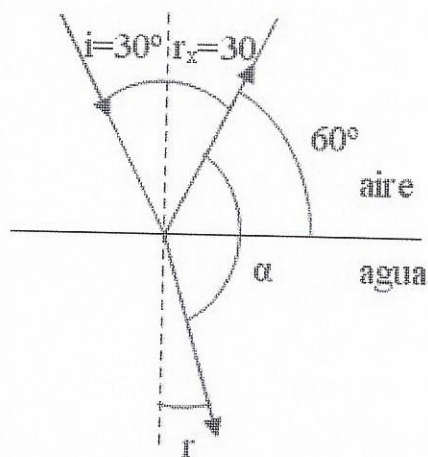
a) la frecuencia de la luz no cambia, cuando esta cambia de medio de propagación; por lo tanto, en el agua será igual que en el aire. La velocidad de propagación de la luz en el aire es la misma que en el vacío ($n_{\text{aire}} = 1$) $v_{\text{aire}} = c$

$$f = \frac{v_{\text{aire}}}{\lambda_{\text{aire}}} = \frac{c}{\lambda_{\text{aire}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$v_{\text{agua}} = \frac{c}{n_{\text{agua}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,33} = 2,25 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda_{\text{agua}} = \frac{v_{\text{agua}}}{f} = \frac{2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

b)

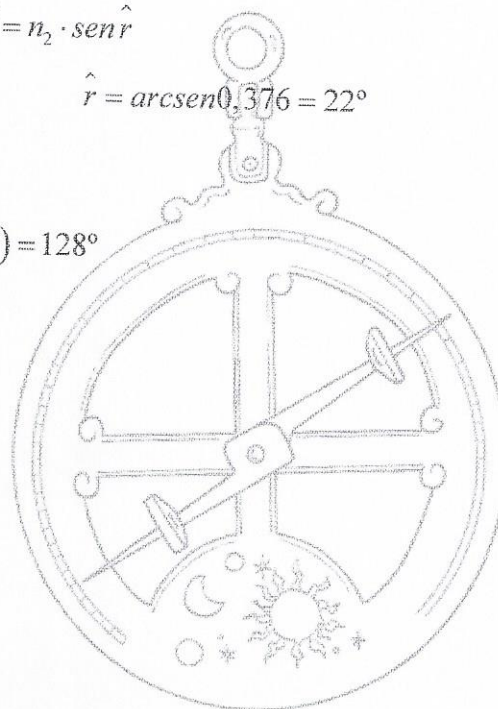


aplicando la ley de la refracción $n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{r}$

$$\sin \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \hat{i} = \frac{1}{1,33} \cdot \sin 30^\circ = 0,376 \quad \hat{r} = \arcsen 0,376 = 22^\circ$$

el ángulo entre el rayo reflejado y refractado

$$\alpha = 60^\circ + (90^\circ - 22^\circ) = 128^\circ$$



1. Un haz de luz que viaja por el aire incide sobre un bloque de vidrio. Los haces reflejado y refractado forman ángulos de 30° y 20° , respectivamente, con la normal a la superficie del bloque.

a) Calcule la velocidad de la luz en el vidrio y el índice de refracción de dicho material.

b) Explique qué es el ángulo límite y determine su valor para el caso descrito.
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

2. Razone las respuestas a las siguientes cuestiones:

a) ¿En qué consiste la refracción de ondas? Enuncie sus leyes.

b) ¿Qué características de la onda varían al pasar de un medio a otro?

3. a) Explique qué es una imagen real y una imagen virtual y señale alguna diferencia observable entre ellas.

b) ¿Puede formarse una imagen virtual con un espejo cóncavo? Razone la respuesta utilizando las construcciones gráficas que considere oportunas.

ÓPTICA

4. a) ¿Cuál es la longitud de onda de una estación de radio que emite con una frecuencia de 100 MHz?

b) Si las ondas emitidas se propagaran por el agua, razone si tendrían la misma frecuencia y la misma longitud de onda. En el caso de que varíe alguna de estas magnitudes, determine su valor.

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

5. Un rayo de luz pasa de un medio a otro, en el que se propaga a mayor velocidad.

a) Indique cómo varían la longitud de onda, la frecuencia y el ángulo que forma dicho rayo con la normal a la superficie de separación, al pasar del primero al segundo medio.

b) Razone si el rayo de luz pasará al segundo medio, independientemente de cuál sea el valor del ángulo de incidencia.

6. Un rayo de luz que se propaga por un medio a una velocidad de 165 Km. s^{-1} penetra en otro medio en el que la velocidad de propagación es 230 Km. s^{-1} .

a) Dibuje la trayectoria que sigue el rayo en el segundo medio y calcule el ángulo que forma con la normal si el ángulo de incidencia es de 30° .

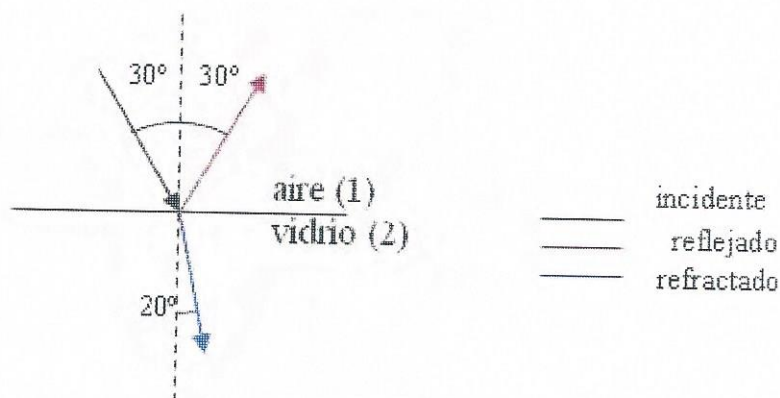
b) ¿En qué medio es mayor el índice de refracción? Justifique la respuesta.

7. a) Señale los aspectos básicos de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz e indique algunas limitaciones de dichas teorías.

b) Indique al menos tres regiones del espectro electromagnético y ordénelas en orden creciente de longitudes de onda.

1. -

a)



aplicando la ley de Snell $n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{r}$ y suponiendo que el índice de refracción del aire es $n_1 = 1$

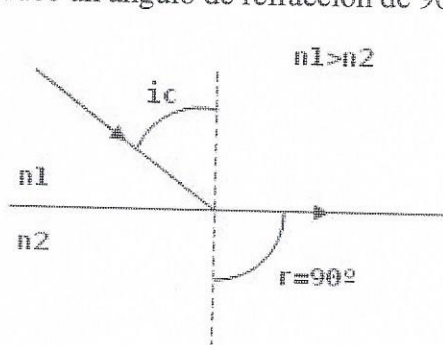
$$n_2 = \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin 20^\circ} = 1,46$$

para calcular la velocidad de propagación de la luz en el vidrio, utilizamos la definición de índice de refracción $n = \frac{c}{v}$ que aplicada al vidrio y despejando la velocidad nos

queda

$$v_v = \frac{c}{n_v} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,46} = 2,05 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

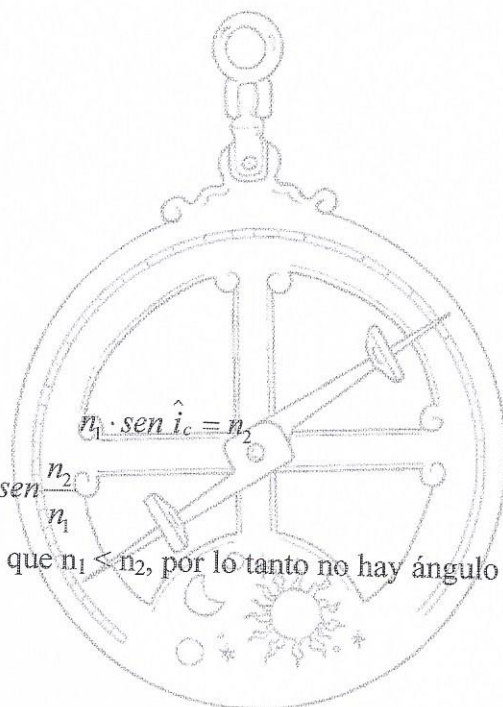
b) La reflexión total solo se puede producir en el caso en el que el rayo refractado se separe de la normal, es decir cuando $n_1 > n_2$, y lo hará siempre que el ángulo de incidencia sea mayor que un ángulo llamado límite ($\hat{i}_c$), que es el ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de 90°



aplicando la ley de Snell y como $\sin 90^\circ = 1$

$$\sin \hat{i}_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \hat{i}_c = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$

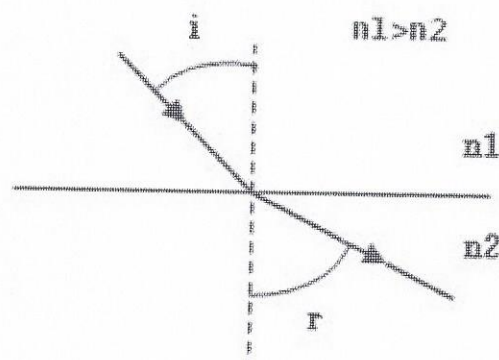
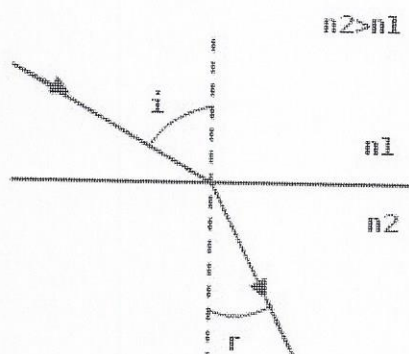
en este caso no puede haber reflexión total ya que $n_1 < n_2$, por lo tanto no hay ángulo límite.



2. -

a) La refracción es la desviación de la dirección del movimiento ondulatorio cuando cambia su propagación de un medio, con índice de refracción n_1 , a otro con índice de refracción n_2 distinto del anterior. Se debe a que la velocidad de propagación es distinta en cada medio.

Si n_2 (medio en el que entra) es mayor que n_1 (medio del que proviene), el rayo refractado se acerca a la normal. En caso contrario se aleja de la normal



se cumple la ley de Snell $n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{r}$

b) El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

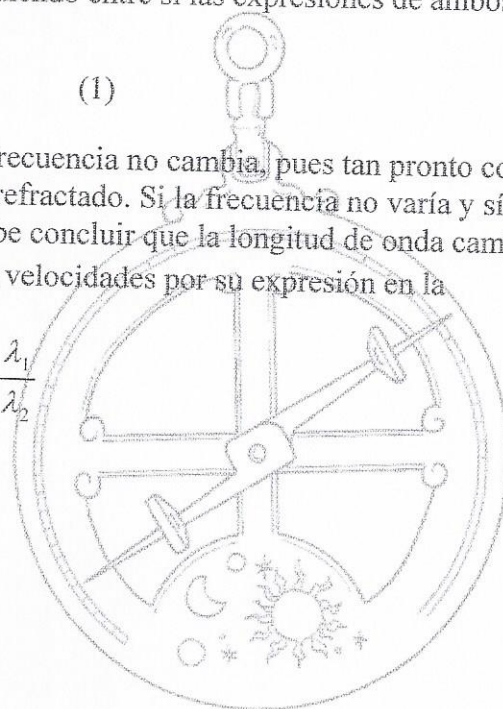
$$n = \frac{c}{v}$$

si se supone que los dos medios tienen índices de refracción diferentes, también tendrán velocidades de propagación diferentes. Dividiendo entre sí las expresiones de ambos índices obtenemos

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

cuando la onda pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro. Sustituyendo las velocidades por su expresión en la ecuación (1)

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

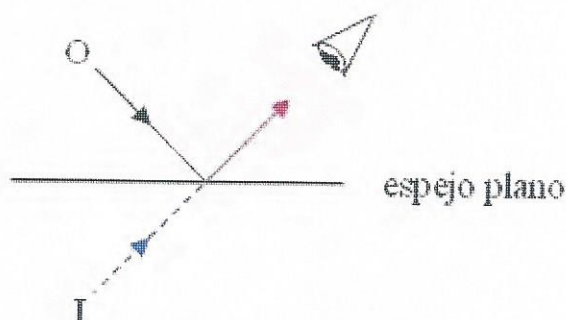


3. -

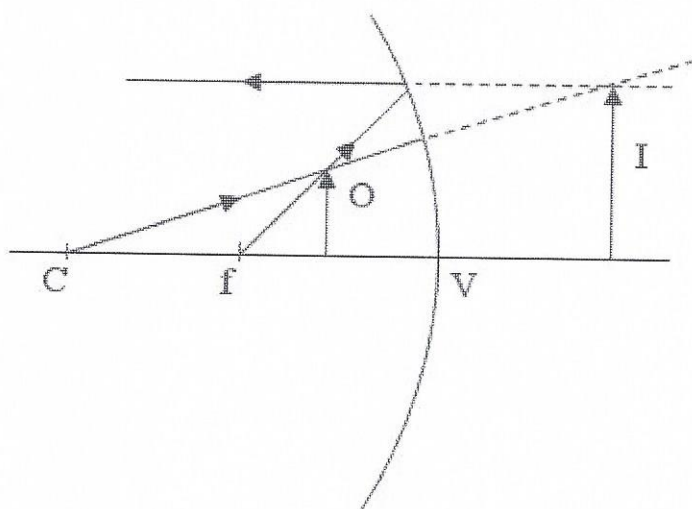
a) Una imagen real es aquella que puede registrarse realmente al colocar en el punto en el que se forma una pantalla o un registro fotográfico, por ejemplo la imagen obtenida detrás de una lente o delante de un espejo esférico.

Una imagen virtual es aquella que no puede registrarse en una pantalla o registro fotográfico, es el caso de la imagen que se forma detrás de un espejo plano, por ejemplo.

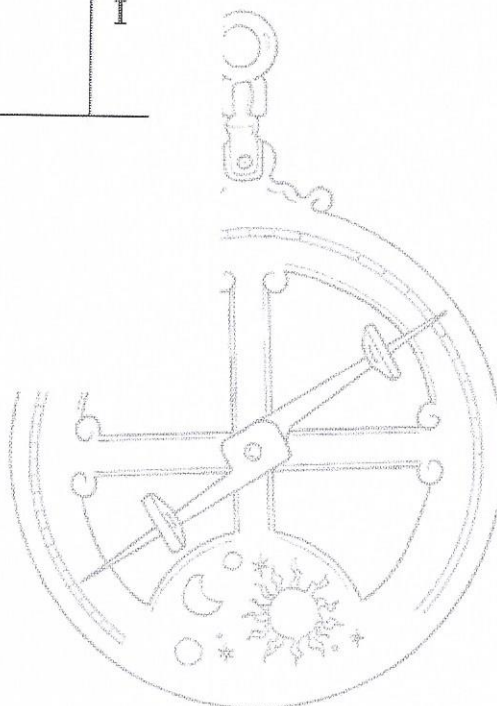
En la imagen virtual, los rayos parecen provenir del punto imagen (como en el caso de las imágenes reales), pero no pasan realmente por dicho punto, solo lo hacen sus prolongaciones.



b) En un espejo cóncavo se produce una imagen virtual, solo cuando la distancia objeto es menor que la distancia focal ($s_0 < f$)



la imagen es virtual, derecha y aumentada.



4. -

a) $f = 100 \text{ MHz} = 10^8 \text{ s}^{-1}$ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{10^8 \text{ s}^{-1}} = 3 \text{ m}$$

b) El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

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

como los dos medios tienen índices de refracción diferentes, también tendrán velocidades de propagación diferentes. Dividiendo entre sí las expresiones de ambos índices obtenemos

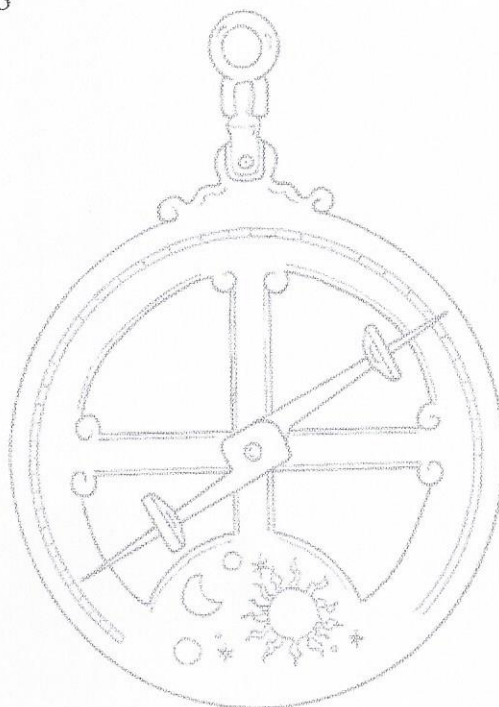
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

cuando la onda pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro. Sustituyendo las velocidades por su expresión en la ecuación (1)

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

despejamos la longitud de onda en el agua (λ_2)

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{n_{2,1}} = \frac{3 \text{ m}}{1,3} = 2,3 \text{ m}$$



5. -

a) Como los dos medios tienen velocidades de propagación diferentes, también tendrán índices de refracción diferentes. Dividiendo entre sí las expresiones de ambos índices obtenemos

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

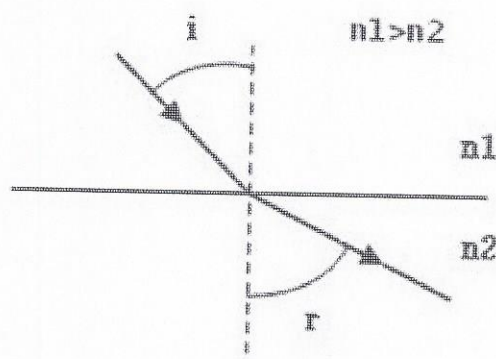
en este caso $v_2 > v_1$, por lo tanto $n_1 > n_2$.

Cuando la onda pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro. Sustituyendo las velocidades por su expresión en la ecuación (1)

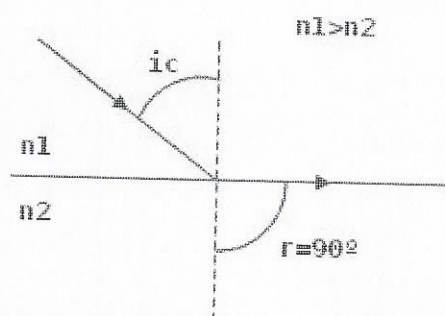
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad \text{despejando} \quad \lambda_2 = \lambda_1 \frac{n_1}{n_2}$$

la longitud de onda aumenta.

Al aplicar la ley de Snell $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1}$ como $n_1 > n_2$ implica que $\hat{r} > \hat{i}$, por lo tanto el rayo se separa de la normal

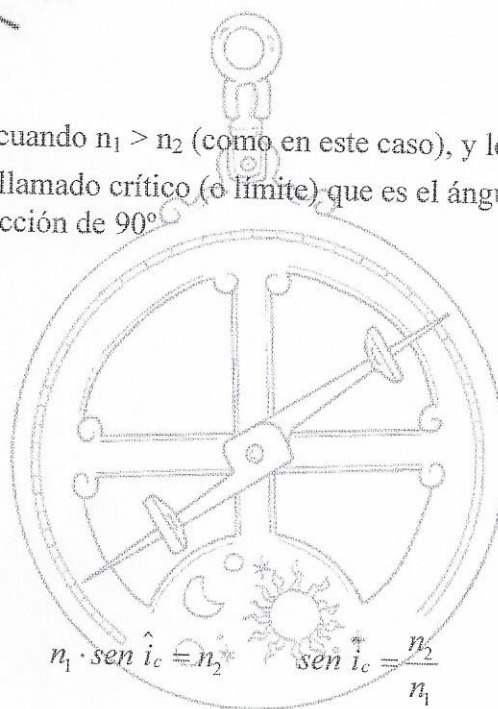


b) La reflexión total solo se puede producir cuando $n_1 > n_2$ (como en este caso), y lo hará siempre que $\hat{i}$ sea mayor que un ángulo llamado crítico (o límite) que es el ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de 90° .



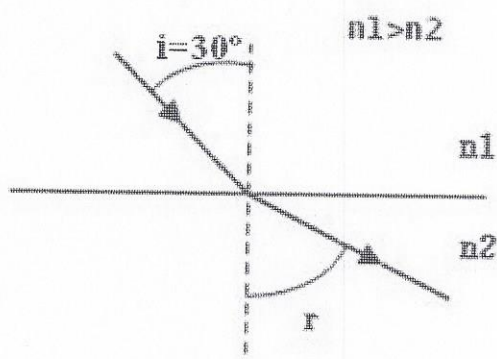
aplicando la ley de Snell y como $\sin 90^\circ = 1$

$$n_1 \cdot \sin \hat{i}_c = n_2 \quad \sin \hat{i}_c = \frac{n_2}{n_1}$$



6. -

a)



El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

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

Como los dos medios tienen velocidades de propagación diferentes, también tendrán índices de refracción diferentes. Dividiendo entre sí las expresiones de ambos índices obtenemos

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{1,65 \cdot 10^5 \text{ m/s}}{2,3 \cdot 10^5 \text{ m/s}} = 0,72$$

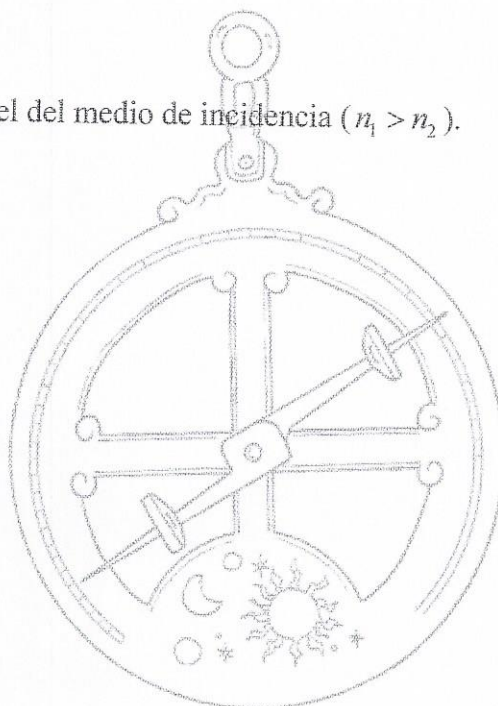
aplicamos la ley de Snell

$$\frac{\sin 30^\circ}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} = 0,72 \quad \sin \hat{r} = \frac{0,5}{0,72} = 0,69 \quad \hat{r} = \arcsen 0,69 = 43,63^\circ$$

b) Como hemos visto en el apartado anterior

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} < 1$$

por lo tanto el índice de refracción mayor es el del medio de incidencia ($n_1 > n_2$).



7. -

a) En el siglo XVII se forman dos concepciones opuestas sobre la naturaleza de la luz, la teoría corpuscular, defendida por Newton y que supone que la luz está constituida por corpúsculos o partículas, y la teoría ondulatoria, enunciada por Huygens y más tarde desarrollada por Maxwell y que supone que la luz es un fenómeno ondulatorio de naturaleza electromagnética. La teoría corpuscular gozó de mayor aceptación debido al peso específico de la persona que lo avalaba, Newton.

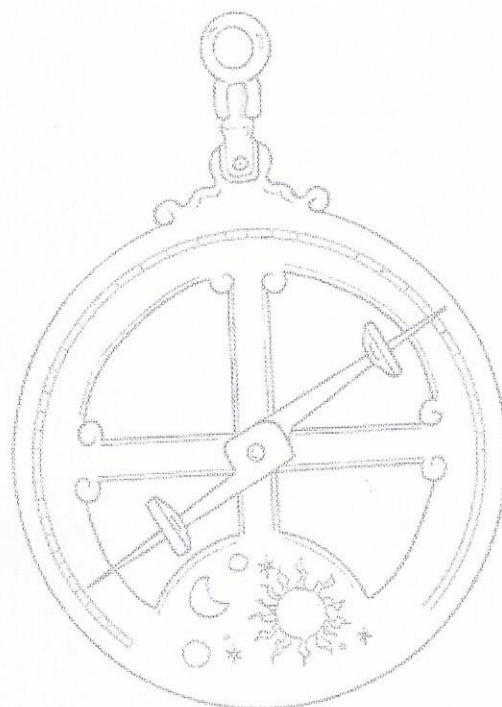
Posteriormente los estudios de Young y Fresnel sobre la interferencia y difracción de la luz, utilizando la teoría ondulatoria de Huygens, supusieron un duro revés para la teoría corpuscular.

El golpe definitivo se lo dio Foucault, al determinar experimentalmente que la velocidad de la luz en medios más densos que el aire (como el agua) era menor, en contra de lo que se deducía de la teoría de Newton.

Cuando todo parecía aclarado, surge un fenómeno curioso relacionado con la luz, el efecto fotoeléctrico, por el que la luz que incide sobre una placa metálica arranca electrones y les comunica energía cinética. Einstein explicó este fenómeno basándose en la hipótesis de Planck, resucitando una nueva forma de teoría corpuscular en la que se hablaba de "cuantos" o paquetes de energía que posteriormente recibirían el nombre de fotones.

Llegamos de este modo a la actualidad en la que se adopta una postura sintética: La naturaleza de la luz es dual, la ondulatoria se pone de manifiesto con fenómenos como la interferencia y la difracción, y la corpuscular se evidencia al interaccionar con la materia.

b) Ultravioleta, visible e infrarrojo.



1.- a) Razone si tres haces de luz visible de colores azul, amarillo y rojo, respectivamente: i) tienen la misma frecuencia; ii) tienen la misma longitud de onda; iii) se propagan en el vacío con la misma velocidad. ¿Cambiaría alguna de estas magnitudes al propagarse en el agua?

b) ¿Qué es la reflexión total de la luz? ¿Cuándo puede ocurrir?

2.- Un rayo de luz monocromática incide en una de las caras de una lámina de vidrio, de caras planas y paralelas, con un ángulo de incidencia de 30° . La lámina está situada en el aire, su espesor es de 5 cm y su índice de refracción 1,5.

a) Dibuje el camino seguido por el rayo y calcule el ángulo que forma el rayo que emerge de la lámina con la normal.

b) Calcule la longitud recorrida por el rayo en el interior de la lámina.

3.-a) Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz con ayuda de un esquema.

b) Un haz de luz pasa del aire al agua. Razone cómo cambian su frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación.

4.- Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque formando un ángulo de 20° con la normal.

a) ¿Qué ángulo formarán entre sí los rayos reflejado y refractado?

b) Variando el ángulo de incidencia, ¿podría producirse el fenómeno de reflexión total? Razone la respuesta.

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

5.- Dibuje la marcha de los rayos e indique el tipo de imagen formada con una lente convergente si:

a) La distancia objeto, s , es igual al doble de la focal, f .

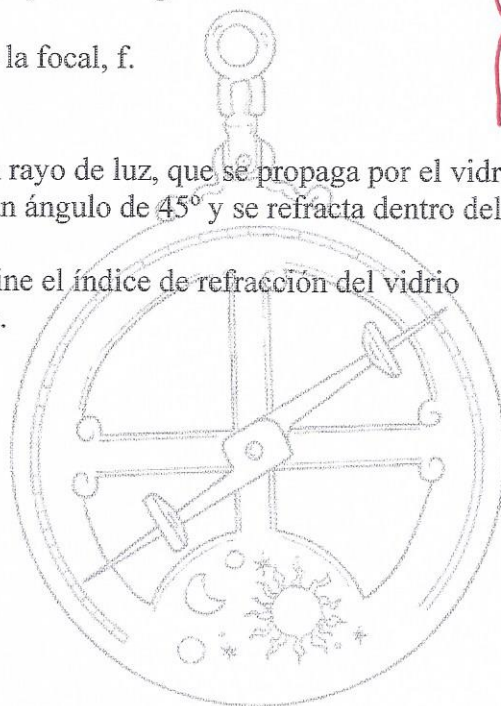
b) La distancia objeto es igual a la focal.

6.- El ángulo límite vidrio-agua es de 60° . Un rayo de luz, que se propaga por el vidrio, incide sobre la superficie de separación con un ángulo de 45° y se refracta dentro del agua.

a) Explique qué es el ángulo límite y determine el índice de refracción del vidrio

b) Calcule el ángulo de refracción en el agua.

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



ÓPTICA

1.-

- a) i) Lo que el ojo humano diferencia como colores son las distintas frecuencias de la zona del visible del espectro electromagnético, en consecuencia a cada color le corresponde una frecuencia distinta, en este caso la mayor sería la del azul y la menor la del rojo.
- ii) La velocidad de propagación c de las ondas electromagnéticas en el vacío es constante, no depende de la frecuencia y se relaciona con la longitud de onda y con la frecuencia mediante la siguiente expresión

$$c = \lambda \cdot f$$

por lo tanto, si varía la frecuencia ha de hacerlo inversamente la longitud de onda para que c sea constante, en consecuencia a cada color le corresponde una longitud de onda distinta, en este caso la mayor sería la del rojo y la menor la del azul.

iii) Como hemos visto en el apartado anterior, la velocidad de la luz en el vacío es constante y es independiente de la longitud de onda, su valor, calculado por Maxwell es el siguiente

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

los tres colores se propagan en el vacío con la misma velocidad.

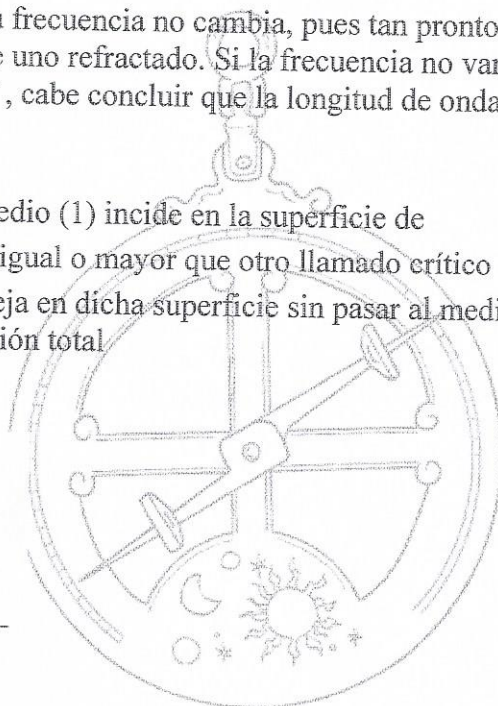
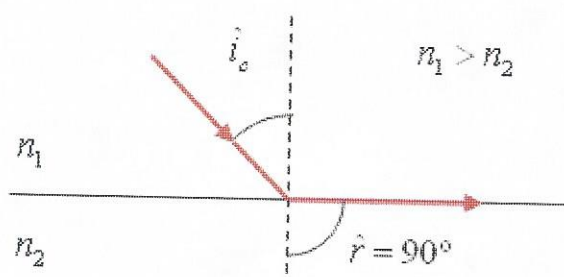
El agua tiene un índice de refracción distinto al del vacío. El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

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

si se supone que los dos medios tienen índices de refracción diferentes, también tendrán velocidades de propagación diferentes.

Cuando la onda pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro.

- b) Cuando un haz de luz que viaja por un medio (1) incide en la superficie de separación con otro medio (2) con un ángulo igual o mayor que otro llamado crítico $\hat{i}_c$ no se produce refracción y todo el haz se refleja en dicha superficie sin pasar al medio (2), este fenómeno recibe el nombre de reflexión total



1.-

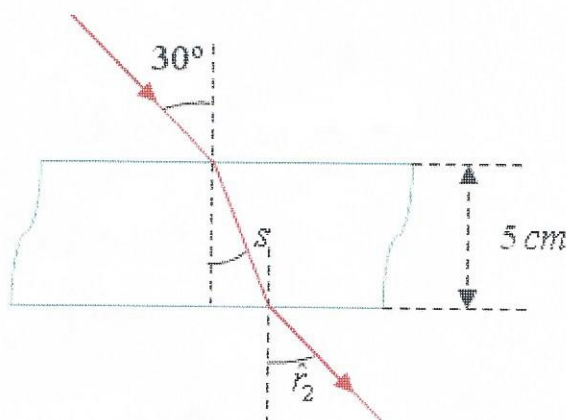
b) (continuación) el ángulo llamado crítico (o límite) es el ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de 90° , aplicando la ley de Snell y como $\sin 90^\circ = 1$

$$n_1 \cdot \sin \hat{i}_c = n_2 \quad \sin \hat{i}_c = \frac{n_2}{n_1}$$

como se ve en la figura para que se produzca reflexión total el rayo refractado ha de separarse de la normal, es decir que $n_1 > n_2$

2.-

a)



Aplicamos la ley de Snell a la primera refracción

$$\sin \hat{r}_1 = \frac{n_1}{n_2} \sin \hat{i}_1 \quad \hat{r}_1 = \arcsen\left(\frac{1}{1,5} \sin 30^\circ\right) = 19,47^\circ$$

Aplicamos la ley de Snell a la segunda refracción sabiendo que $\hat{i}_2 = \hat{r}_1$ y que ahora el medio de incidencia es el vidrio (2) y el de refracción es el aire (1)

$$\sin \hat{r}_2 = \frac{n_2}{n_1} \sin \hat{i}_2 \quad \hat{r}_2 = \arcsen\left(\frac{1,5}{1} \sin 19,47^\circ\right) = 30^\circ$$

b) Para calcular la longitud "s" recorrida por el rayo en el interior de la lámina, aplicamos trigonometría al triángulo rectángulo definido en el interior de la lámina de vidrio

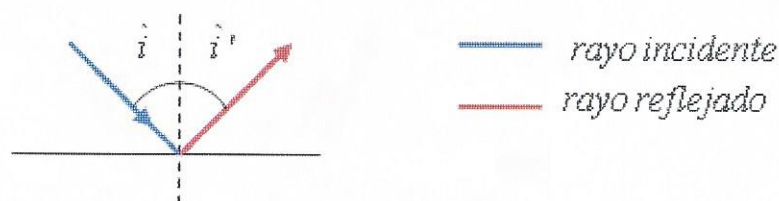
$$\cos 19,47^\circ = \frac{5 \text{ cm}}{s} \quad s = \frac{5 \text{ cm}}{\cos 19,47^\circ} = 5,3 \text{ cm}$$

3.-

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.



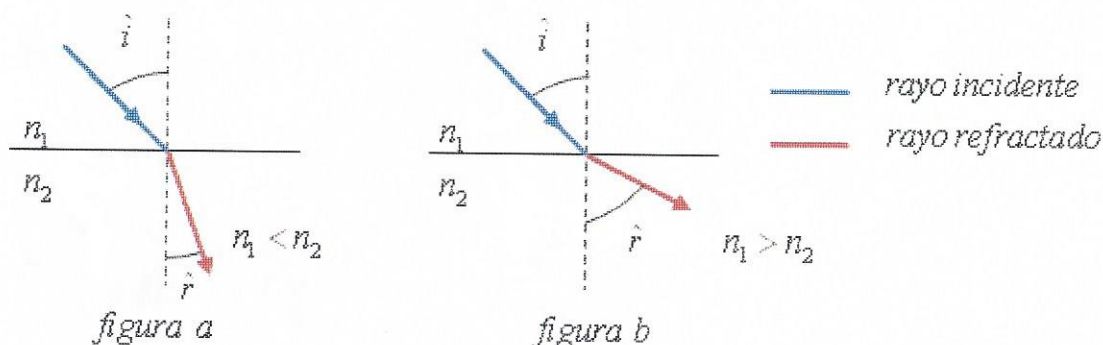
estos dos hechos se agrupan en lo que se conoce como **ley de la reflexión**.

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 en 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



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)

3.-

a) (continuación) Si llamamos $\hat{r}$ al ángulo que forma el rayo refractado con la normal, experimentalmente se puede comprobar que:

- El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano
- El ángulo de refracción $\hat{r}$, depende del ángulo de incidencia $\hat{i}$
- El ángulo de refracción depende de la relación entre los índices de refracción de los medios.

estos tres hechos se agrupan en lo que se conoce como **ley de la refracción**, que expresada matemáticamente recibe el nombre de **ley de Snell**

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

b) El agua tiene un índice de refracción mayor que el del aire. El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

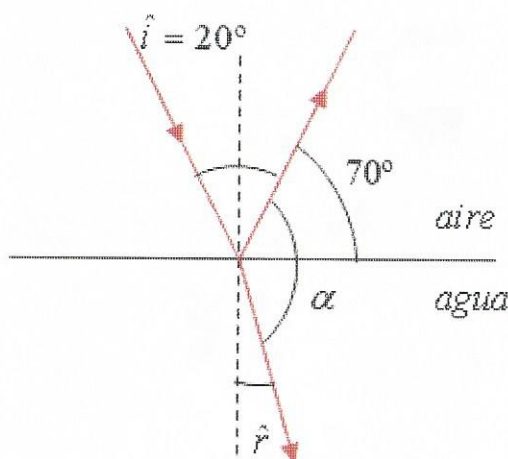
$$n = \frac{c}{v}$$

si se supone que los dos medios tienen índices de refracción diferentes, también tendrán velocidades de propagación diferentes. En este caso la velocidad en el agua es menor que en el aire.

Cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente a la superficie de separación de ambos medios, surge uno refractado. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro, como $v_{\text{agua}} < v_{\text{aire}}$, la longitud de onda en el agua es menor que en el aire.

4.-

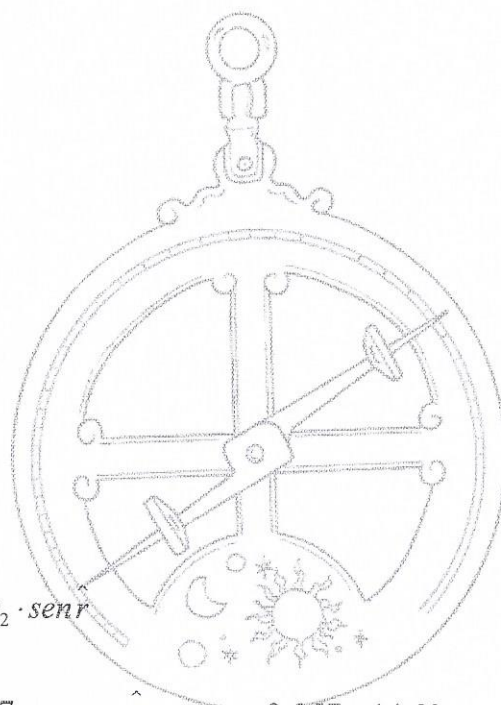
a)



aplicando la ley de Snell

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

$$\text{sen } \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen } \hat{i} = \frac{1}{1,33} \cdot \text{sen } 20^\circ = 0,257$$



$$\hat{r} = \arcsen 0,257 = 14,9^\circ$$

4.-

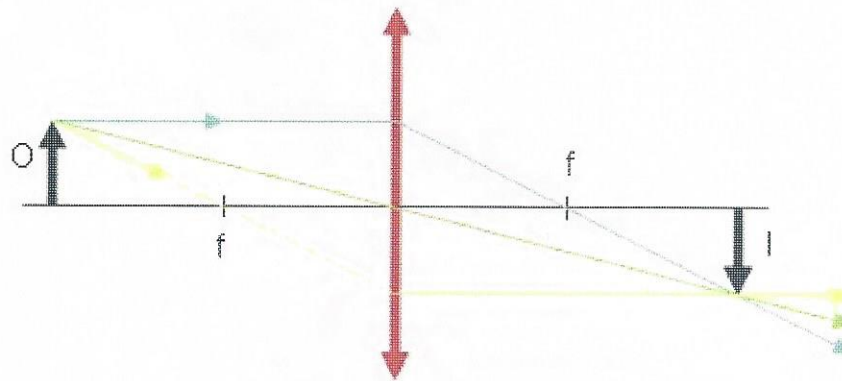
a) (continuación) el ángulo entre el rayo reflejado y refractado

$$\alpha = 70^\circ + (90^\circ - 14,9^\circ) = 145,1^\circ$$

b) No se puede producir reflexión total porque $n_1 < n_2$, es decir el rayo refractado se acerca a la normal y para que se produzca ha de ser al contrario.

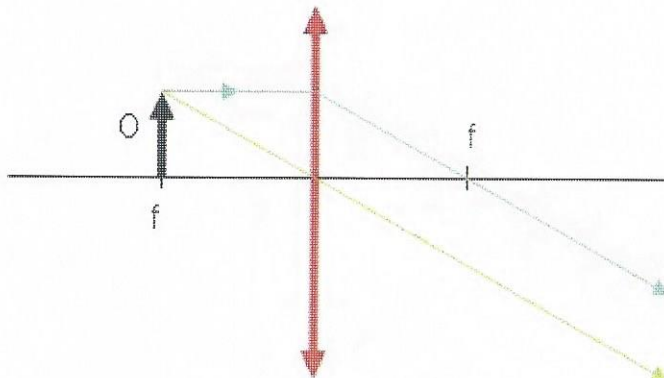
5.-

a)



La imagen es real, invertida y del mismo tamaño.

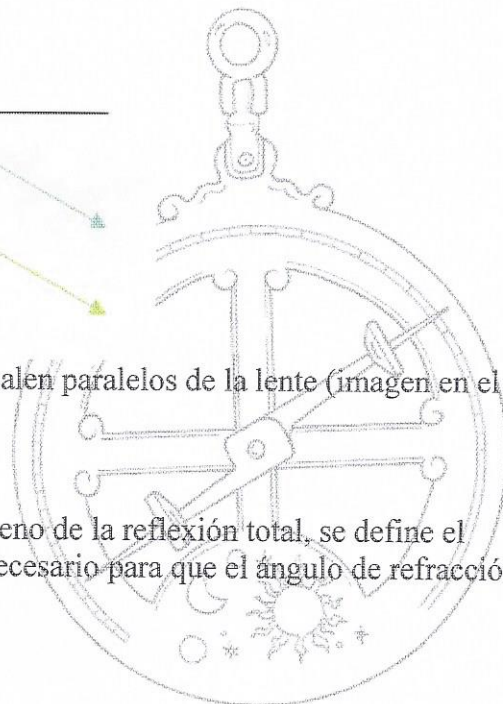
b)



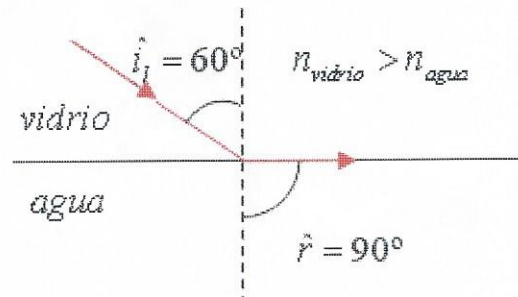
No se forma ninguna imagen pues los rayos salen paralelos de la lente (imagen en el infinito).

6.-

a) Como $n_1 > n_2$ se puede producir el fenómeno de la reflexión total, se define el ángulo límite como el ángulo de incidencia necesario para que el ángulo de refracción sea de 90° (como se ve en la figura)



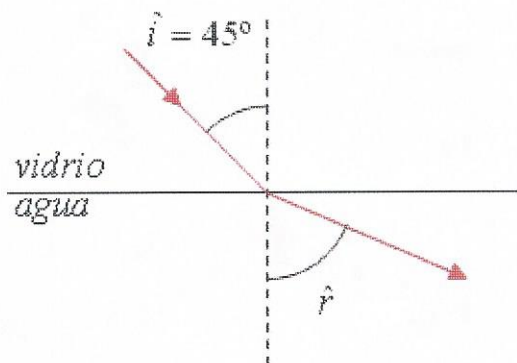
6.- a) (continuación)



como $\sin 90^\circ = 1$, aplicamos la ley de Snell

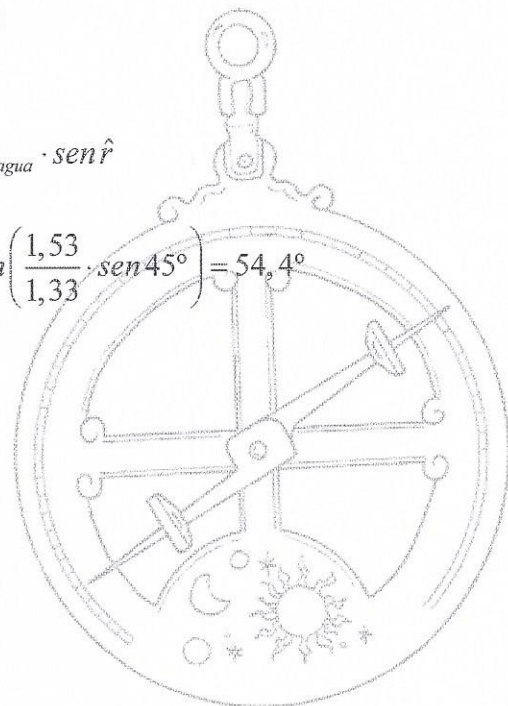
$$n_{\text{vidrio}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{agua}} \quad n_{\text{vidrio}} = \frac{n_{\text{agua}}}{\sin \hat{i}} = \frac{1,33}{\sin 60^\circ} = 1,53$$

b)



aplicamos la ley de Snell $n_{\text{vidrio}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{agua}} \cdot \sin \hat{r}$

$$\sin \hat{r} = \frac{n_{\text{vidrio}}}{n_{\text{agua}}} \cdot \sin \hat{i} \quad \hat{r} = \arcsen \left(\frac{1,53}{1,33} \cdot \sin 45^\circ \right) = 54,4^\circ$$



1. Un foco luminoso puntual está situado bajo la superficie de un estanque de agua.

a) Un rayo de luz pasa del agua al aire con un ángulo de incidencia de 30° . Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y calcule el ángulo de refracción.

b) Explique qué es el ángulo límite y determine su valor para este caso.

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

2. Razone las respuestas a las siguientes cuestiones:

a) Cuando un rayo pasa a un medio con mayor índice de refracción, ¿se acerca o se aleja de la normal?

b) ¿Qué es el ángulo límite? ¿Existe este ángulo en la situación anterior?

3. a) Enuncie las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz, explicando las diferencias entre ambos fenómenos.

b) Un rayo de luz pasa de un medio a otro más denso. Indique cómo varían las siguientes magnitudes: amplitud, frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación.

4. El láser de un reproductor de CD genera luz con una longitud de onda de 780 nm medida en el aire.

a) Explique qué características de la luz cambian al penetrar en el plástico del CD y calcule la velocidad de la luz en él.

b) Si la luz láser incide en el plástico con un ángulo de 30° , determine el ángulo de refracción.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; n_{\text{aire}} = 1; n_{\text{plástico}} = 1,55$$

5. Es corriente utilizar espejos convexos como retrovisores en coches y camiones o en vigilancia de almacenes, con objeto de proporcionar mayor ángulo de visión con un espejo de tamaño razonable.

a) Explique con ayuda de un esquema las características de la imagen formada en este tipo de espejos.

b) En estos espejos se suele indicar: "Atención, los objetos están más cerca de lo que parece". ¿Por qué parecen estar más alejados?

6. Un haz de luz de $5 \cdot 10^4 \text{ Hz}$ viaja por el interior de un diamante.

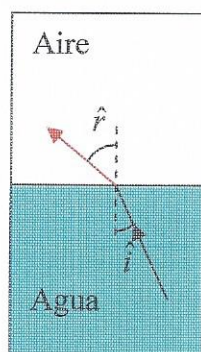
a) Determine la velocidad de propagación y la longitud de onda de esa luz en el diamante.

b) Si la luz emerge del diamante al aire con un ángulo de refracción de 10° , dibuje la trayectoria del haz y determine el ángulo de incidencia.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; n_{\text{diamante}} = 2,42$$

ÓPTICA

1.- a)



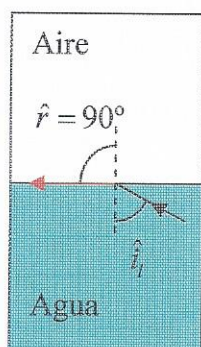
Aplicamos la ley de Snell

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

despejamos el ángulo de refracción

$$\hat{r} = \arcsen\left(\frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{aire}}} \text{sen } \hat{i}\right) = \arcsen\left(\frac{1,33}{1} \text{sen } 30^\circ\right) = 41,7^\circ$$

b)



El ángulo límite es el ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de 90° , para ángulos de incidencia mayores que él, se produce la reflexión total. Este fenómeno solo ocurre cuando el rayo viaja de un medio a otro con menor índice de refracción como en este caso.

Si aplicamos la ley de Snell cuando $r = 90^\circ$ y como $\text{sen } 90^\circ = 1$, obtenemos

$$\hat{i}_l = \arcsen \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \arcsen \frac{1}{1,33} = 48,75^\circ$$

2.- a) aplicamos la ley de Snell y despejamos el seno del ángulo de refracción

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

como $\frac{n_1}{n_2} < 1$, el ángulo de refracción es menor que el de incidencia, por lo tanto, el rayo se acerca a la normal.

b) El ángulo límite es el ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de 90° , para ángulos de incidencia mayores que él, se produce la reflexión total. Este fenómeno solo ocurre cuando el rayo viaja de un medio a otro con menor índice de refracción, al contrario que en este caso.

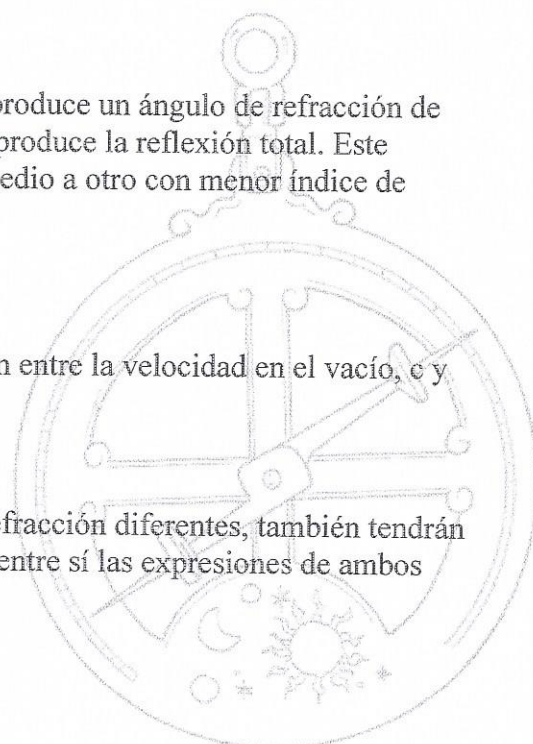
3.- a) Ver teoría

b) El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

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

si se supone que los dos medios tienen índices de refracción diferentes, también tendrán velocidades de propagación diferentes. Dividiendo entre sí las expresiones de ambos índices obtenemos

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$



3.- b) (continuación) como el medio 2 es más denso que el 1, $\frac{n_2}{n_1} > 1$ y $v_2 < v_1$, es decir

la velocidad de propagación disminuye.

Cuando la onda pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro. Sustituyendo las velocidades por su expresión en la ecuación (1)

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \text{ es decir } \lambda_2 < \lambda_1$$

La amplitud del rayo no varía.

4.- a) La frecuencia no cambia por el principio de Huygens (tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado), al tener ambos medios distinto índice de refracción, la velocidad cambia y puesto que $v = \lambda \cdot f$, también cambia la longitud de onda.

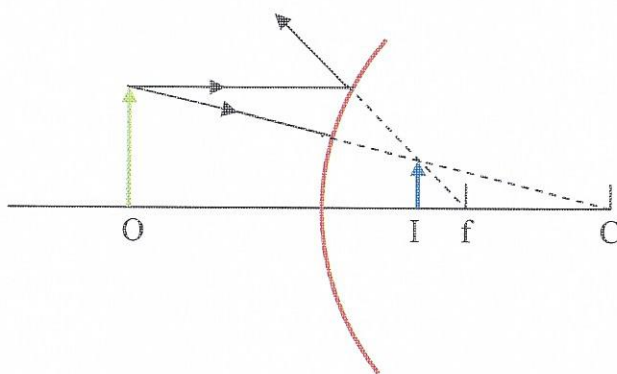
Para calcular la velocidad de la luz en el plástico aplicamos

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{1,55} = 1,93 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

b) Aplicamos la ley de Snell $n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \hat{i} = n_{\text{plástico}} \cdot \text{sen } \hat{r}$

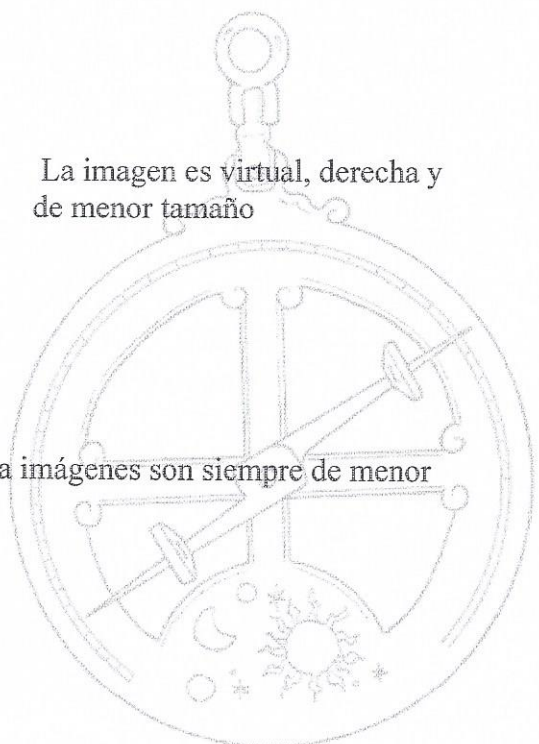
$$\hat{r} = \arcsen\left(\frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{plástico}}} \text{sen } \hat{i}\right) = \arcsen\left(\frac{1}{1,55} \text{sen } 30^\circ\right) = 18,8^\circ$$

5.- a)



La imagen es virtual, derecha y de menor tamaño

b) Los objetos parecen estar más alejados, porque la imágenes son siempre de menor tamaño.



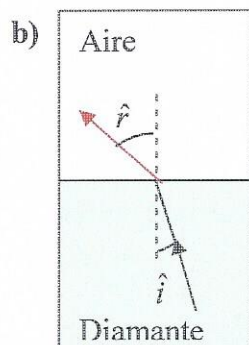
6.- a) Para calcular la velocidad de la luz en el diamante aplicamos

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2,42} = 1,24 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

Para calcular la longitud de onda aplicamos

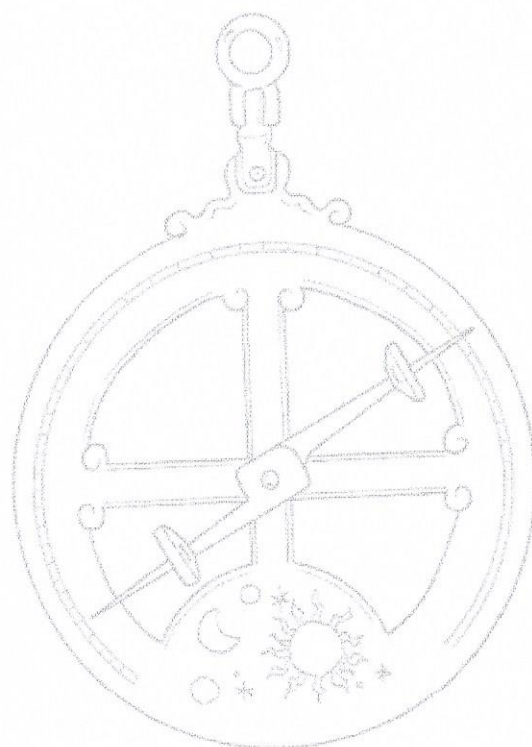
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1,24 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}} = 2480 \text{ m}$$

sale un valor enorme para la longitud de onda, es debido a un fallo en el dato de la frecuencia.



Aplicamos la ley de Snell $n_{\text{diamante}} \cdot \text{sen } \hat{i} = n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \hat{r}$

$$\hat{i} = \arcsen\left(\frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{diamante}}} \text{sen } \hat{r}\right) = \arcsen\left(\frac{1}{2,42} \text{sen } 10^\circ\right) = 4,1^\circ$$



1. Un teléfono móvil opera con ondas electromagnéticas de frecuencia $f = 9 \cdot 10^8$ Hz.
- Determine la longitud de onda y el número de onda en el aire.
 - Si la onda entra en un medio en el que su velocidad de propagación se reduce a $3c/4$, razone qué valores tienen la frecuencia y la longitud de onda en ese medio y el índice de refracción del medio.
- $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹; $n_{\text{aire}} = 1$

2. a) Explique la formación de imágenes y sus características en una lente divergente.
b) ¿Pueden formarse imágenes virtuales con lentes convergentes? Razone la respuesta.

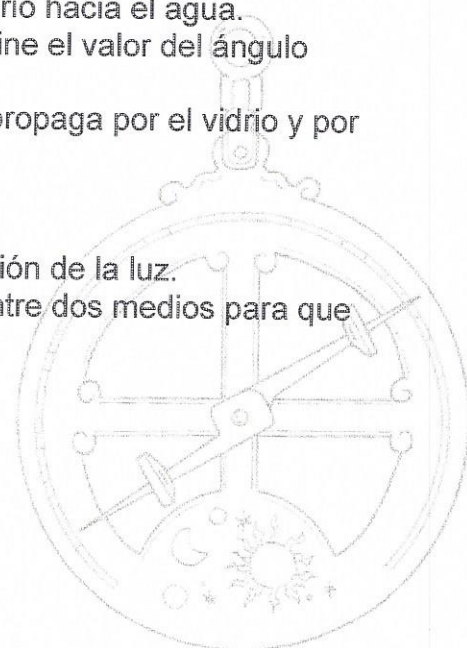
ÓPTICA

3. Un haz de luz láser cuya longitud de onda en el aire es $550 \cdot 10^{-9}$ m incide en un bloque de vidrio.
- Describa con ayuda de un esquema los fenómenos ópticos que se producen.
 - Si el ángulo de incidencia es de 40° y el de refracción 25° , calcule el índice de refracción del vidrio y la longitud de onda de la luz láser en el interior del bloque.
- $n_{\text{aire}} = 1$

4. a) Explique los fenómenos de reflexión y refracción de una onda en la superficie que separa dos medios.
b) Razone qué magnitudes de una onda cambian cuando pasa de un medio a otro.

5. Sobre la superficie de un bloque de vidrio de índice de refracción 1,60 hay una capa de agua de índice 1,33. Una luz amarilla de sodio, cuya longitud de onda en el aire es $589 \cdot 10^{-9}$ m, se propaga por el vidrio hacia el agua.
- Describa el fenómeno de reflexión total y determine el valor del ángulo límite para esos dos medios.
 - Calcule la longitud de onda de la luz cuando se propaga por el vidrio y por el agua.
- $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹

6. a) Describa los fenómenos de reflexión y de refracción de la luz.
b) Explique las condiciones que deben cumplirse entre dos medios para que el rayo incidente no se refracte.



1.-a) Cuando la onda pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el aire es la misma que en el vacío, c .

Calculamos la longitud de onda en el aire y el número de onda

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{9 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}} = \frac{1}{3} \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 6\pi \text{ m}^{-1}$$

b) La frecuencia no cambia por lo explicado en el apartado anterior. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro

en el aire $\lambda = \frac{c}{f}$, en el medio $\lambda' = \frac{v}{f}$. Dividimos ambas ecuaciones, teniendo en

cuenta que $v = \frac{3c}{4}$ y que $\lambda = \frac{1}{3} \text{ m}$

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{c}{v} \quad \lambda' = \lambda \frac{v}{c} = \lambda \frac{3c/4}{c} = \lambda \frac{3}{4} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{4} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ m}$$

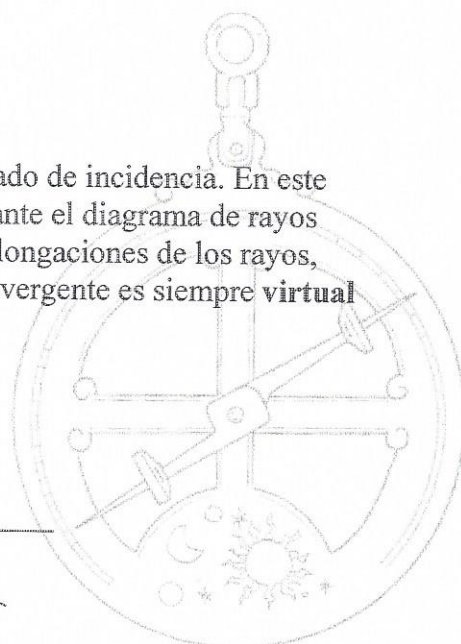
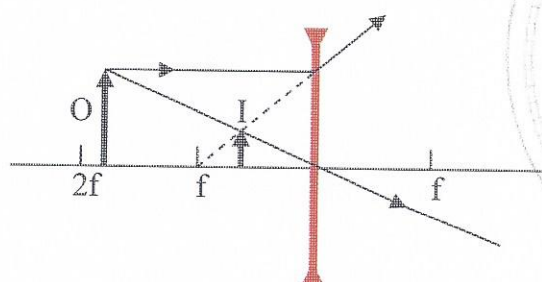
El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{3c/4} = \frac{4}{3}$$

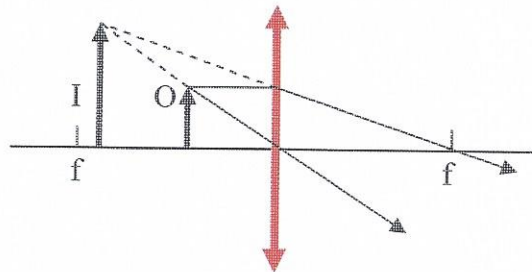
2.-a) En el caso de las lentes divergentes, r_1 es negativo y r_2 positivo, f será negativa y sea cual sea s_o , tendremos que

$$\frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s_o} \Rightarrow s_i < 0$$

es decir la imagen será siempre virtual pues se forma en el lado de incidencia. En este caso, el procedimiento para la formación de imágenes mediante el diagrama de rayos consiste en buscar en dicho lado el punto de corte de las prolongaciones de los rayos, como se ve en la figura. La imagen formada por una lente divergente es siempre **virtual derecha y disminuida**.

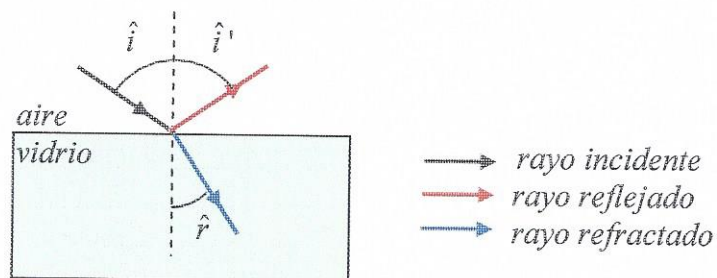


2.-b) Se forman imágenes virtuales con lentes convergentes cuando el objeto está situado entre el foco y el centro óptico de la lente, es decir $s_o < f$, como puede verse en la figura del diagrama de rayos



La imagen formada es **virtual derecha y aumentada**.

3.-a)



Cuando el rayo incide en la superficie del bloque de vidrio, se producen dos fenómenos, parte del haz se refleja y sigue propagándose por el aire con un ángulo de reflexión ($\hat{i}'$) que es igual al de incidencia ($\hat{i}$), y otra parte pasa a propagarse por el vidrio (refracción) que como tiene más densidad que el aire, hace que la velocidad de propagación de la luz sea menor en su interior con lo cual, cambia de dirección formando un ángulo de refracción ($\hat{r}$) que es menor que el de incidencia, como predice la ley de Snell.

b) Para calcular el índice de refracción del vidrio, aplicamos la ley de Snell

$$n_{\text{aire}} \sen \hat{i} = n_{\text{vidrio}} \sen \hat{r} \quad n_{\text{vidrio}} = n_{\text{aire}} \frac{\sen 40^\circ}{\sen 25^\circ} = 2,48$$

El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

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

Dividiendo entre sí las expresiones de ambos índices obtenemos

$$\frac{n_{\text{vidrio}}}{n_{\text{aire}}} = \frac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{vidrio}}} \quad (1)$$

3.-b) (continuación) Sustituyendo las velocidades por su expresión $v = \lambda \cdot f$

$$\frac{n_{\text{vidrio}}}{n_{\text{aire}}} = \frac{\lambda_{\text{aire}} \cdot f}{\lambda_{\text{vidrio}} \cdot f} = \frac{\lambda_{\text{aire}}}{\lambda_{\text{vidrio}}} \quad \lambda_{\text{vidrio}} = \lambda_{\text{aire}} \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{vidrio}}} = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \frac{1}{2,48} = 221 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

4.- a) Ver libro de texto

b) El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad en el vacío, c y la velocidad en el medio, v .

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

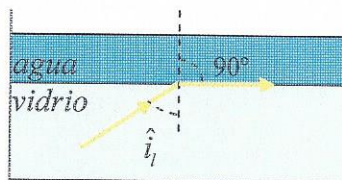
si se supone que los dos medios tienen índices de refracción diferentes, también tendrán velocidades de propagación diferentes. Dividiendo entre sí las expresiones de ambos índices obtenemos

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

Cuando la onda pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. Si la frecuencia no varía y sí lo hace la velocidad y puesto que $v = \lambda \cdot f$, cabe concluir que la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro. Sustituyendo las velocidades por su expresión en la ecuación anterior

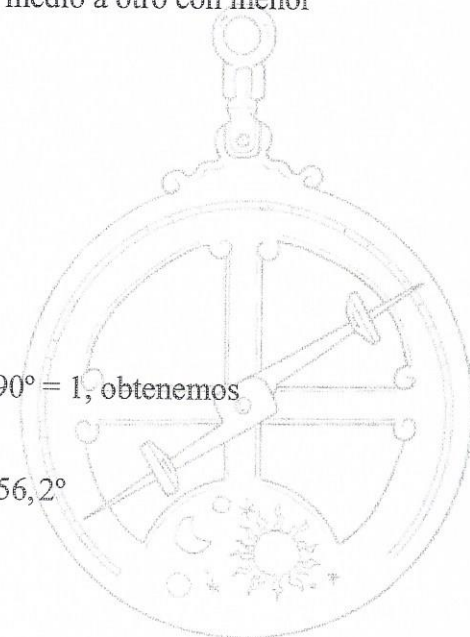
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

5.-a) El ángulo límite ($\hat{i}_l$) es el ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de 90° , para ángulos de incidencia mayores que él, se produce la reflexión total. Este fenómeno solo ocurre cuando el rayo viaja de un medio a otro con menor índice de refracción.



Si aplicamos la ley de Snell cuando $r = 90^\circ$ y como $\sin 90^\circ = 1$, obtenemos

$$\hat{i}_l = \arcsen \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{vidrio}}} = \arcsen \frac{1,33}{1,60} = 56,2^\circ$$



5.-b) Tendiendo en cuenta la ecuación que relaciona el índice de refracción y la longitud de onda, deducida en el apartado anterior, para el vidrio

$$\frac{n_{\text{vidrio}}}{n_{\text{aire}}} = \frac{\lambda_{\text{aire}}}{\lambda_{\text{vidrio}}} \quad \lambda_{\text{vidrio}} = \lambda_{\text{aire}} \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{vidrio}}} = 589 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \frac{1}{1,60} = 368 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

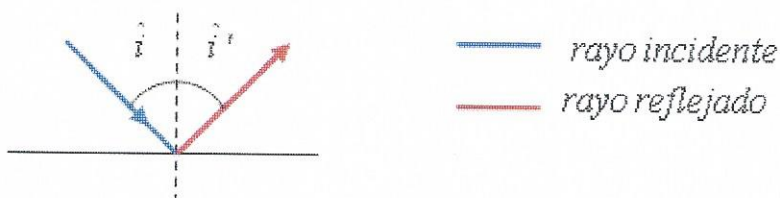
para el agua

$$\frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{aire}}} = \frac{\lambda_{\text{aire}}}{\lambda_{\text{agua}}} \quad \lambda_{\text{agua}} = \lambda_{\text{aire}} \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = 589 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \frac{1}{1,33} = 443 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

6.-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**.

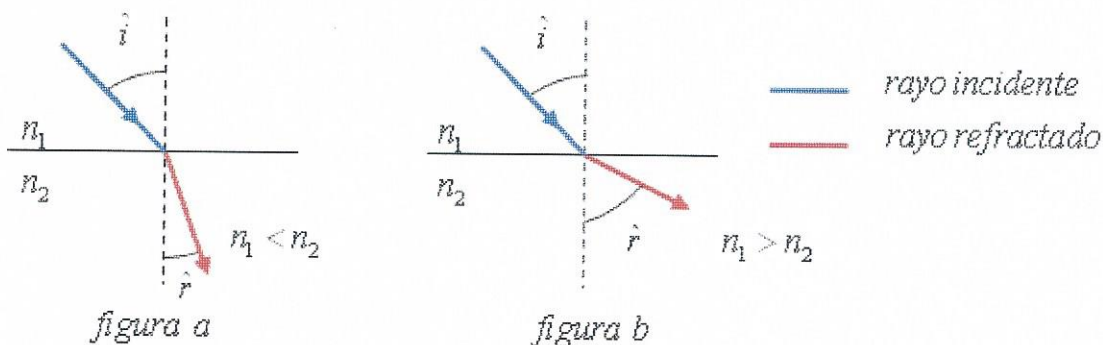
Cuando la luz se propaga por un medio transparente distinto del vacío, lo hace siempre a una velocidad menor.

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 en 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 distintas velocidades, sufre una desviación de su trayectoria original, 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)

6.-a) (continuación)



Si llamamos $\hat{r}$ al ángulo que forma el rayo refractado con la normal, experimentalmente se puede comprobar que:

- El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano
- El ángulo de refracción $\hat{r}$, depende del ángulo de incidencia $\hat{i}$
- El ángulo de refracción depende de la relación entre los índices de refracción de los medios.

estos tres hechos se agrupan en lo que se conoce como **ley de la refracción**, que expresada matemática mente recibe el nombre de **ley de Snell**

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

b) Se trata del fenómeno de la reflexión total, las condiciones que han de cumplirse son dos:

- El índice de refracción del medio de incidencia sea mayor que el índice de refracción del medio al que se transfiere

$$n_1 > n_2$$

- El ángulo de incidencia ha de ser mayor que el ángulo límite

$$\hat{i} > \hat{i}_l$$

