

## CUESTIONES

1.- a) Cuando un rayo pasa de un medio a otro con mayor índice de refracción, ¿se acerca o se aleja de la normal?  
b) ¿Tienen igual frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación el rayo incidente y el refractado? Razone su respuesta.

a) La relación entre los ángulos que forman los rayos incidente y refractado con la normal viene dada por la ley de Snell:

$$n_1 \operatorname{sen} i = n_2 \operatorname{sen} r$$

Si  $n_2 > n_1$ , entonces  $\operatorname{sen} r < \operatorname{sen} i$  (para que el producto permanezca constante), con lo cual  $r < i$ . De este resultado deducimos que el rayo refractado se acerca a la normal.

b) Al pasar el rayo de un medio a otro, varía su velocidad de propagación (pues ésta depende del índice de refracción de cada medio); su frecuencia permanece constante, por lo que su longitud de onda también variará. En este caso, al aumentar el índice de refracción la longitud de onda del rayo disminuirá.

## PROBLEMAS

2.- 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  $30^\circ$  sobre la superficie del agua, cuyo índice de refracción es 1'33. Calcule:

- La frecuencia, la velocidad de propagación y la longitud de onda de la luz en el agua.
- El ángulo que forman entre sí el rayo reflejado y el refractado.

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

a) Cuando la luz pasa del aire al agua disminuye su velocidad de propagación; como su frecuencia no varía, entonces su longitud de onda también disminuirá. La frecuencia del rayo de luz se calcula de la manera siguiente:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

La velocidad de propagación de la luz será:

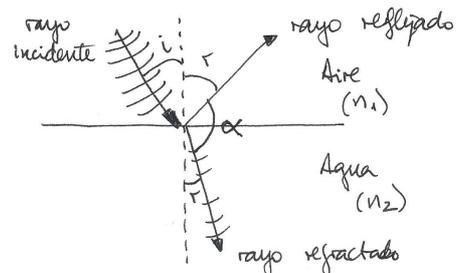
$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1'33} = 2'26 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Finalmente, la longitud de onda de la luz en el agua será:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{2'26 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{14}} = 4'51 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

b) En la figura se observa que para hallar el ángulo que forman entre sí los rayos reflejado y refractado necesitamos conocer los ángulos de reflexión y de refracción:

- De acuerdo con la 2ª ley de Snell de la reflexión, el ángulo de reflexión es igual al de incidencia.
- De acuerdo con la 2ª ley de Snell de la refracción, los ángulos de incidencia y de refracción están relacionados de la siguiente manera:



$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow \sin r = \frac{n_1}{n_2} \sin i = \frac{1}{1'33} \sin 30^\circ = 0'38 \Rightarrow r = 22'08^\circ$$

El ángulo que forman los rayos reflejado y refractado será:

$$\alpha = 180^\circ - 30^\circ - 22'08^\circ = \boxed{127'92^\circ}$$

### 3.- Una antena emite una onda de radio de $6 \cdot 10^7$ Hz.

- Explique las diferencias entre esa onda y una onda sonora de la misma longitud de onda y determine la frecuencia de esta última.
- La onda de radio penetra en un medio y su velocidad se reduce a  $0'75c$ . Determine su frecuencia y su longitud de onda en ese medio.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_s = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

a) Las ondas de radio son ondas electromagnéticas de baja frecuencia. Las principales diferencias con una onda sonora de la misma longitud de onda son las siguientes:

- La onda de radio se propaga a la velocidad de la luz (al igual que cualquier otra onda electromagnética), mientras que la onda sonora lo hace a la velocidad del sonido (que es mucho menor).
- La onda de radio propaga energía electromagnética y no necesita de un medio material para propagarse, mientras que la onda sonora propaga energía mecánica y necesita de un medio material para propagarse.
- La onda de radio es transversal, pues los campos eléctrico y magnético vibran perpendicularmente entre sí y con respecto a la dirección de propagación, mientras que la onda sonora es longitudinal.
- Como ambas ondas tienen la misma longitud de onda y distinta velocidad de propagación sus frecuencias serán distintas; la longitud de onda de la onda de radio se calcula a partir de su velocidad de propagación:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^7} = 5 \text{ m}$$

Así, la frecuencia de la onda sonora cuya longitud de onda sea de 5 m será:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{5} = \boxed{68 \text{ Hz}}$$

b) La frecuencia de la onda de radio no varía al penetrar en otro medio de distinto índice de refracción, aunque al reducirse su velocidad de propagación también se reducirá su longitud de onda:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{0'75 \cdot 3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^7} = \boxed{3'75 \text{ m}}$$

### 4.- Un rayo de luz de frecuencia $5 \cdot 10^{14}$ Hz penetra en una lámina de vidrio de caras paralelas con un ángulo de incidencia de $30^\circ$ .

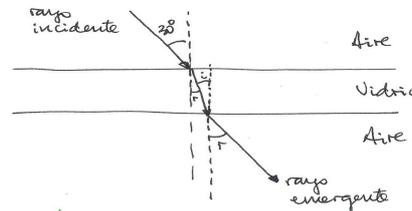
- Dibuje en un esquema los rayos incidente, refractado en el vidrio y emergente al aire y determine los ángulos de refracción y de emergencia.
- Explique qué características de la luz cambian al penetrar en la lámina de vidrio y calcule la velocidad de propagación dentro de la lámina.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; n_{\text{vidrio}} = 1'5$$

a) Para determinar el ángulo de refracción hacemos uso de la 2ª ley de Snell de la refracción:

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r \Rightarrow \text{sen } r = \frac{n_1}{n_2} \text{ sen } i = \frac{1}{1.5} \text{ sen } 30^\circ = 0.33 \Rightarrow r = 19.47^\circ$$

Deducimos del resultado obtenido que el rayo refractado se acerca a la normal. Para calcular el ángulo de emergencia tenemos en cuenta que ahora el rayo incide al aire desde la lámina de vidrio; por tanto, el ángulo de incidencia es ahora de  $19.47^\circ$ , y el ángulo de emergencia será el ángulo de refracción cuando el rayo sale de la lámina de vidrio. Aplicando de nuevo la 2ª ley de Snell de la refracción:



$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r \Rightarrow \text{sen } r = \frac{n_1}{n_2} \text{ sen } i = \frac{1.5}{1} \text{ sen } 19.47^\circ = 0.5 \Rightarrow r = 30^\circ$$

El resultado nos indica que el rayo incidente en la lámina y el que emerge de ella son paralelos.

b) Cuando la luz penetra en la lámina de vidrio disminuye su velocidad de propagación al aumentar el índice de refracción:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.5} = 2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Como la frecuencia de la luz no varía, entonces su longitud de onda también disminuirá al ser directamente proporcional a la velocidad de propagación:

$$v = \lambda f$$

**5.- 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  $30^\circ$ . Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y calcule el ángulo de refracción.

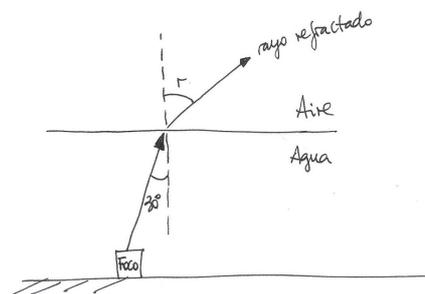
b) Explique qué es el ángulo límite y determine su valor para este caso.

$n_{\text{aire}} = 1; n_{\text{agua}} = 1.33$

a) De acuerdo con la 2ª ley de Snell de la refracción:

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

al pasar el rayo de luz del agua al aire será  $n_1 > n_2$ , por lo que  $\text{sen } i < \text{sen } r$ . Así pues, el ángulo de refracción será mayor que el de incidencia, de modo que el rayo refractado se aleja de la normal. El ángulo que forma el rayo refractado con la normal será:



$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r \Rightarrow \text{sen } r = \frac{n_1}{n_2} \text{ sen } i = \frac{1.33}{1} \text{ sen } 30^\circ = 0.665 \Rightarrow r = 41.68^\circ$$

b) Cuando un rayo pasa de un medio más refringente a otro menos refringente ( $n_1 > n_2$ ) hay ciertos valores del ángulo de incidencia para los cuales el rayo no atraviesa la superficie de separación de los dos medios (pues conforme aumenta el ángulo de incidencia también aumenta el ángulo de refracción), sino que se refleja en ella (de manera que el ángulo de refracción será de  $90^\circ$ ). A este fenómeno se le llama reflexión total, y el valor mínimo del ángulo de incidencia para que tenga lugar este fenómeno se conoce como ángulo

límite (L):

$$n_1 \sin L = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \sin L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1'33} = 0'75 \Rightarrow L = 48'75^\circ$$

6.- 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  $30^\circ$ . La lámina está situada en el aire, su espesor es de 5 cm y su índice de refracción 1'5.

- Dibuje el camino seguido por el rayo y calcule el ángulo que forma el rayo que emerge de la lámina con la normal.
- Calcule la longitud recorrida por el rayo en el interior de la lámina.

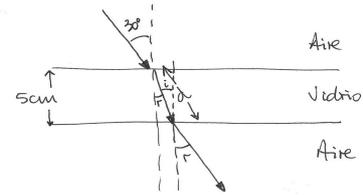
a) De acuerdo con la 2ª ley de Snell de la refracción:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

al pasar el rayo de luz del aire al vidrio será  $n_2 > n_1$ , por lo que  $\sin i > \sin r$ . Así pues, el ángulo de refracción será menor que el de incidencia, de modo que el rayo refractado se acerca a la normal. Tras la primera refracción, el ángulo que forma el rayo refractado con la normal será:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow \sin r = \frac{n_1}{n_2} \sin i = \frac{1}{1'5} \sin 30^\circ = 0'33 \Rightarrow r = 19'47^\circ$$

Para calcular el ángulo de emergencia tenemos en cuenta que ahora el rayo incide al aire desde la lámina de vidrio; por tanto, el ángulo de incidencia es ahora de  $19'47^\circ$ , y el ángulo de emergencia será el ángulo de refracción cuando el rayo sale de la lámina de vidrio. Aplicando de nuevo la 2ª ley de Snell de la refracción:



$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow \sin r = \frac{n_1}{n_2} \sin i = \frac{1'5}{1} \sin 19'47^\circ = 0'5 \Rightarrow r = 30^\circ$$

b) Observar en el dibujo anterior que la distancia,  $d$ , recorrida por el rayo en el interior de la lámina se calculará de la manera siguiente:

$$\cos 19'47^\circ = \frac{5}{d} \Rightarrow d = \frac{5}{\cos 19'47^\circ} = 5'3 \text{ cm}$$