

## TEMA 5

### LA LUZ Y SUS PROPIEDADES. ÓPTICA.

#### PROBLEMAS DE SELECTIVIDAD.

1. El espectro visible en el aire está comprendido entre las longitudes de onda 380 nm (violeta) y 780 nm (rojo).
- Calcule las frecuencias de estas radiaciones extremas. ¿Cuál de ellas se propaga a mayor velocidad?
  - Determine entre qué longitudes de onda está comprendido el espectro visible en el agua, cuyo índice de refracción es  $4/3$ .
- $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

a)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{VIOLETA} = 380\text{nm} = 380 \cdot 10^{-9} \text{ m} \rightarrow \text{VIOLETA} = \frac{3 \cdot 10^8}{380 \cdot 10^9} = 790 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \\ \text{ROJO} = 780\text{nm} = 780 \cdot 10^{-9} \text{ m} \rightarrow \text{ROJO} = \frac{3 \cdot 10^8}{780 \cdot 10^9} = 385 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \end{array} \right.$$

b)

Puesto que el índice de refracción es  $n = \frac{4}{3}$ , sabiendo que este valor relaciona las velocidades de las ondas en el vacío y en el medio:

$$\frac{4}{3} = \frac{c}{v} \rightarrow v = \frac{3}{4} \cdot c = 225 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \text{ (velocidad de las ondas en el agua)}$$

Hemos de realizar el proceso inverso al del apartado a), considerando que la frecuencia es un valor constante (correspondiente a cada color).

Para el rojo:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = 225 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ \text{ROJO} = 385 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \end{array} \right\} \rightarrow v = \lambda \cdot f \rightarrow 225 \cdot 10^8 = \lambda_{\text{ROJO}} \cdot 385 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \rightarrow \lambda_{\text{ROJO}} = 584 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 584 \text{ nm}$$

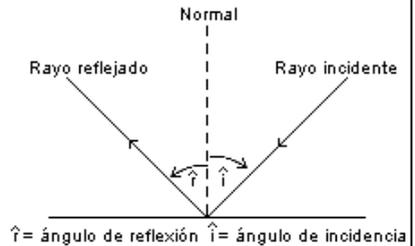
En cuanto al violeta:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = 225 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ \text{VIOLETA} = 790 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \end{array} \right\} \rightarrow v = \lambda \cdot f \rightarrow 225 \cdot 10^8 = \lambda_{\text{VIOLETA}} \cdot 790 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \rightarrow \lambda_{\text{VIOLETA}} = 285 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 285 \text{ nm}$$

2. a) Enuncie las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz. Explique las diferencias entre ambos fenómenos.  
 b) Compare lo que ocurre cuando un haz de luz incide sobre un espejo y sobre un vidrio de ventana.

a) Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio, donde puede o no ser absorbido.

La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia (véase figura 1). El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal. Los ángulos de reflexión y refracción se definen, respectivamente, como los formados entre rayo reflejado y normal, y entre rayo refractado y normal.

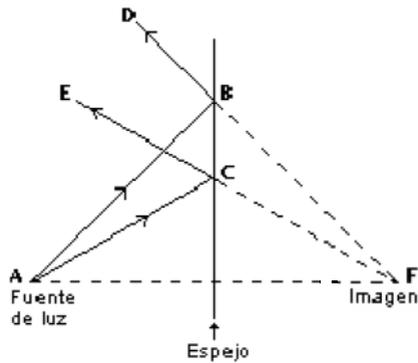


**Figura 1**  
Leyes fundamentales de la reflexión

Las leyes de la reflexión afirman que:

- i. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- ii. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano.

Si la superficie del segundo medio es lisa, puede actuar como un espejo y producir una imagen reflejada (figura 2). En la figura 2, la fuente de luz es el objeto A; un punto de A emite rayos en todas las direcciones. Los dos rayos que inciden sobre el espejo en B y C, por ejemplo, se reflejan como rayos BD y CE. Para un observador situado delante del espejo, esos rayos parecen venir del punto F que está detrás del espejo. De las leyes de reflexión se deduce que CF y BF forman el mismo ángulo con la superficie del espejo que AC y AB. En este caso, en el que el espejo es plano, la imagen del objeto parece situada detrás del espejo y separada de él por la misma distancia que hay entre éste y el objeto que está delante. Este tipo de reflexión se conoce como **REFLEXIÓN REGULAR**.



**Figura 2**  
Reflexión en un espejo plano

Si la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En ese caso, los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia, y por tanto de reflexión, aleatorio. Esto hace que se dispersen y no puedan formar una imagen. Tendremos entonces la **REFLEXIÓN DIFUSA**.

La **REFRACCIÓN** se produce cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, y se produce un cambio en su dirección de propagación, debido a la distinta velocidad de propagación que tiene la luz en los diferentes medios materiales. A este fenómeno se le llama refracción.

Si dividimos la velocidad de la luz en el vacío entre la que tiene en un medio transparente obtenemos un valor que llamamos índice de refracción de ese medio.

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

, donde  $\left\{ \begin{array}{l} n : \text{índice de refracción} \\ c : \text{velocidad de la luz en el vacío} \\ v : \text{velocidad de la luz en el medio material} \end{array} \right.$

Así, si el índice de refracción del agua es  $n = 1,33$ , querrá decir que la luz es 1,33 veces más rápida en el vacío que en el agua.

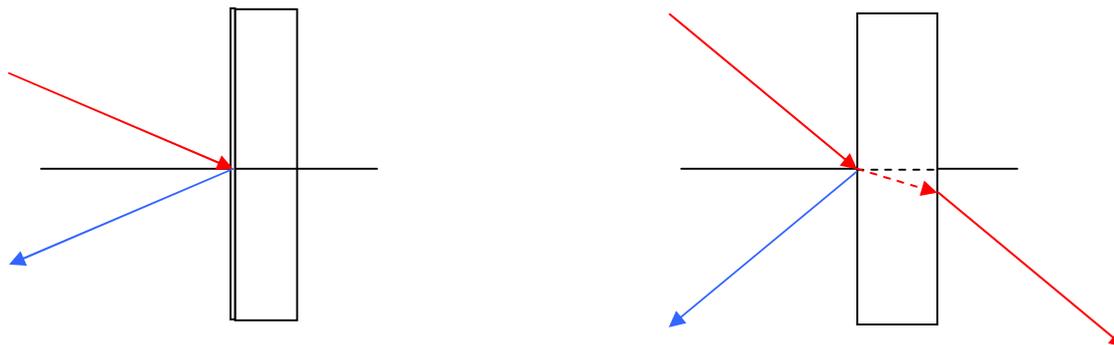
El fenómeno de la refracción queda perfectamente definido por una ecuación matemática denominada Ley de Snell, así llamada en honor del matemático holandés Willebrord van Roijen Snell, quien afirmó que el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia ( $\hat{i}$ ) de un rayo es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción ( $\hat{r}$ ):

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

Además, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano.

En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa es mayor que el de un material menos denso, es decir, la velocidad de la luz es menor en la sustancia de mayor densidad. Por tanto, si un rayo incide de forma oblicua sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella. Los rayos que inciden en la dirección de la normal son reflejados y refractados en esa misma dirección.

b) Al incidir sobre el espejo, el fenómeno que se produce es el de una reflexión regular o especular, con lo que se cumplen perfectamente las leyes de la reflexión. En cambio, al incidir el rayo sobre el vidrio de una ventana, se producen los dos fenómenos; por un lado reflexión de parte del rayo incidente, y por el otro refracción de otra parte.



- 3.- 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?

a) La REFRACCIÓN se produce cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, y se produce un cambio en su dirección de propagación, debido a la distinta velocidad de propagación que tiene la luz en los diferentes medios materiales. A este fenómeno se le llama refracción.

Si dividimos la velocidad de la luz en el vacío entre la que tiene en un medio transparente obtenemos un valor que llamamos índice de refracción de ese medio.

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

, donde  $\left\{ \begin{array}{l} n : \text{índice de refracción} \\ c : \text{velocidad de la luz en el vacío} \\ v : \text{velocidad de la luz en el medio material} \end{array} \right.$

Así, si el índice de refracción del agua es  $n = 1,33$ , querrá decir que la luz es 1,33 veces más rápida en el vacío que en el agua.

El fenómeno de la refracción queda perfectamente definido por una ecuación matemática denominada Ley de Snell, así llamada en honor del matemático holandés Willebrord van Roijen Snell, quien afirmó que el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia ( $\hat{i}$ ) de un rayo es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción ( $\hat{r}$ ):

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

Además, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano.

b) Desde luego, la velocidad de propagación, que disminuye cuando el rayo penetra en un medio de menor densidad. Pero además, considerando que la frecuencia se mantiene constante (puesto que un haz de luz no cambia su color al penetrar en un medio diferente, y la frecuencia de una onda visible está relacionada con su color), la expresión:

$$v_{\text{PROPAG}} = \lambda \cdot f$$

Solo se cumplirá, en el nuevo medio, si se produce una disminución de la longitud de onda asociada.

4. a) Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con velocidad  $c$ . ¿Cambia su velocidad de propagación en un medio material? Defina el índice de refracción de un medio.  
 b) Sitúe en orden creciente de frecuencias, las siguientes regiones del espectro electromagnético: infrarrojo, rayos X, ultravioleta y luz visible. Dos colores del espectro visible: rojo y verde, por ejemplo, ¿pueden tener la misma intensidad? ¿y la misma frecuencia?

- a) Efectivamente, la velocidad de la luz varía dependiendo del medio a través del cual se desplaza. El valor máximo se produce cuando la onda electromagnética viaja en el vacío, siendo el valor de tal velocidad  $c=3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Para cualquier otro medio, su velocidad será inferior.  
 Respecto a este último aspecto, se define **índice de refracción de un medio** al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad en el medio en cuestión:

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

- b)  $\text{IR} < \text{VIS} < \text{UV} < \text{R-X}$
- c) El color de una determinada onda electromagnética (visible) no es sino la sensación producida en nuestro cerebro ante los diferentes estímulos producidos en la retina por ondas de distinta frecuencia. Por tanto, la frecuencia de una onda electromagnética es lo que caracteriza su color.  
 En cuanto a la intensidad, si es posible que dos haces electromagnéticos de diferente color tengan la misma intensidad, puesto que esta propiedad indica la energía que por unidad de tiempo atraviesa la unidad de superficie, colocada perpendicularmente a la dirección de propagación.

### Flujo luminoso

Para hacernos una primera idea consideraremos dos bombillas, una de 25 W y otra de 60 W. Está claro que la de 60 W dará una luz más intensa. Pues bien, esta es la idea: ¿cuál luce más? o dicho de otra forma ¿cuánto luce cada bombilla?



Cuando hablamos de 25 W o 60 W nos referimos sólo a la **potencia** consumida por la bombilla de la cual solo una parte se convierte en luz visible, es el llamado flujo luminoso. Podríamos medirlo en watts (W), pero parece más sencillo definir una nueva unidad, el **lumen**, que tome como referencia la radiación visible. Empíricamente se demuestra que a una radiación de 555 nm de 1 W de potencia emitida por un **cuerpo negro** le corresponden 683 lumen.

Se define el **flujo luminoso** como la potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su símbolo es  $\Phi$  y su unidad es el lumen (lm). A la relación entre watts y lúmenes se le llama **equivalente luminoso de la energía** y equivale a:

$$1 \text{ watt-luz a } 555 \text{ nm} = 683 \text{ lm}$$

Flujo luminoso	Símbolo: $\Phi$
	Unidad: lumen (lm)

### Intensidad luminosa

El **flujo luminoso** nos da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente de luz, por ejemplo una bombilla, en todas las direcciones del espacio. Por contra, si pensamos en un proyector es fácil ver que sólo ilumina en una dirección. Parece claro que necesitamos conocer cómo se distribuye el flujo en cada dirección del espacio y para eso definimos la intensidad luminosa.



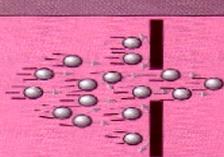
Diferencia entre flujo e intensidad luminosa.

Se conoce como **intensidad luminosa** al **flujo luminoso** emitido por unidad de **ángulo sólido** en una dirección concreta. Su símbolo es  $I$  y su unidad la candela (cd).

Intensidad luminosa $I = \frac{\Phi}{\omega}$	Símbolo: $I$	
	Unidad: candela (cd)	

5. a) Describa brevemente el modelo corpuscular de la luz. ¿Puede explicar dicho modelo los fenómenos de interferencia luminosa?  
 b) Dos rayos de luz inciden sobre un punto. ¿Pueden producir oscuridad? Explique razonadamente este hecho.

a) Descartes, a finales del siglo XVI, fue el primer gran defensor de la teoría corpuscular, diciendo que la luz se comportaba como un proyectil que se propulsaba a velocidad infinita, sin especificar absolutamente nada sobre su naturaleza, pero rechazando que cierta materia fuera de los objetos al ojo.  
 Explicó claramente la reflexión, pero tuvo alguna dificultad con la refracción.  
 Según Newton, las fuentes luminosas emiten corpúsculos muy livianos que se desplazan a gran velocidad y en línea recta. Podemos fijar ya la idea de que esta teoría además de concebir la propagación de la luz por medio de corpúsculos, también sienta el principio de que los rayos se desplazan en forma rectilínea.  
 Newton explicó que la variación de intensidad de la fuente luminosa es proporcional a la cantidad de corpúsculos que emite en determinado tiempo.  
 La reflexión de la luz consiste en la incidencia de dichos corpúsculos en forma oblicua en una superficie lisa, de manera que al llegar a ella varía de dirección pero siempre en el mismo medio.  
 La igualdad del ángulo de incidencia con el de reflexión se debe a la circunstancia de que tanto antes como después de la reflexión los corpúsculos conservan la misma velocidad (debido a que permanece en el mismo medio).  
 La refracción la resolvió expresando que los corpúsculos que inciden oblicuamente en una superficie de separación de dos medios de distinta densidad son atraídos por la masa del medio más denso y, por lo tanto, aumenta la componente de la velocidad que es la velocidad que es perpendicular a la superficie de separación, razón por la cual los corpúsculos luminosos se acercan a la normal.  
 Según lo expresado por Newton, la velocidad de la luz aumentaría en los medios de mayor densidad, lo cual contradice los resultados de los experimentos realizados años después. Esta explicación, contradictoria con los resultados experimentales sobre la velocidad de la luz en medios más densos que el vacío, obligó al abandono de la teoría corpuscular.

HECHO	MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS
<b>PRODUCCIÓN Y PROPAGACIÓN</b>	Si estaban en reposo es necesario una fuerza que actúe inicialmente. Es la partícula la que se desplaza, no necesita medio.
<b>TRANSMISIÓN DE ENERGÍA</b>	La energía y la cantidad de movimiento la tiene la misma partícula que se mueve con velocidad " $v$ " respecto a un sistema de referencia. La energía localizada en un haz de partículas, sería la suma de las energías de cada partícula individual.
<b>CHOQUE O SUPERPOSICIÓN</b>	<p>Cuando chocan dos partículas se desvían, rebotan, ... Si a una zona llegan dos haces de partículas, simplemente se sumará el nº partículas por unidad de superficie, no tiene ningún significado la superposición o la interferencia de partículas. El movimiento de las partículas es distinto después de la colisión.</p> 
<b>DIFRACCIÓN</b> <b>ATRAVESAR UNA RENDIJA (AGUJERO) O SUPERAR UN OBSTÁCULO</b>	<p>Una porción de las partículas pasará, sin desviarse de su trayectoria inicial. Aquellas que inciden sobre el obstáculo no consiguen pasar y dan lugar a zonas de sombra.</p>  <p>Cuando un conjunto de partículas incide sobre un obstáculo sólo pasan las que no chocan con él, dando lugar a regiones donde es imposible localizarlas (sombras).</p> 
<b>REFLEXIÓN</b>	Rebotarían del mismo modo: es decir la trayectoria de la partícula incidente, la normal y la trayectoria de la partícula reflejada están en un mismo plano, y el ángulo de incidencia es igual al de reflexión.
<b>REFRACCIÓN</b>	 <p>Se desvían al pasar oblicuamente de un medio a otro (por ejemplo del aire al agua).</p>
<b>REFLEXIÓN/ TRANSMISIÓN SIMULTÁNEAS</b>	Para una sola partícula no pueden suceder ambos fenómenos a la vez; o rebota o pasa.

b) La interferencia de ondas luminosas requiere que los focos sean coherentes, es decir, que mantengan una diferencia de fase constante y que las ondas sean monocromáticas (una sola frecuencia).

Sin embargo, la mayoría de los focos suelen ser incoherentes, por lo que si colocamos dos fuentes luminosas cercanas entre sí, no se observaría interferencia, ya que cada una de ellas emite trenes de ondas independientemente de la otra. Al no permanecer constante la fase entre los diferentes trenes de onda, debido a la forma aleatoria en que estos se producen en los átomos, no es posible obtener en la práctica interferencias de forma estable.

Ahora bien, si los dos rayos proceden de un solo foco monocromático que atraviesan dos rendijas cercanas sí se logrará la interferencia estable, y por lo tanto, se observarán zonas de oscuridad.

6. a) Los rayos X, la luz visible y los rayos infrarrojos son radiaciones electromagnéticas. Ordénalas en orden creciente de sus frecuencias e indique algunas diferencias entre ellas.  
 b) ¿Qué es una onda electromagnética? Explique sus características.

a) IR<VIS<R-X

Las diferencias se encuentran en la frecuencia, longitud de onda y en la energía asociada.

\* Respecto a la frecuencia, el orden será el indicado más arriba.

\* La longitud de onda sigue la secuencia contraria; puesto que  $c = \lambda \cdot \nu \rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$ , al aumentar la frecuencia, decrecerá la longitud de onda.

\* Por último, puesto que la energía asociada a una onda electromagnética es directamente proporcional a la frecuencia ( $E = h \cdot \nu$ ), los más energéticos serán los rayos X..

b) (Pertenece al Tema NATURALEZA DE LA LUZ)

Son ondas transversales que consisten en la propagación, sin necesidad de soporte material alguno, de dos campos perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, uno magnético y otro eléctrico.

Entre sus características, cabe destacar:

- Se originan por cargas eléctricas aceleradas
- Variación periódica del estado electromagnético del espacio
- No necesita soporte material
- Los vectores de los campos eléctrico y magnético varían sinusoidalmente, por lo que se les pueden aplicar las ecuaciones de ondas armónicas
- Los módulos de  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en una posición y tiempo cumplen:

$$\frac{\vec{E}}{\vec{B}} = c$$

- La velocidad de las ondas electromagnéticas depende del medio de propagación
- Se cumple que:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

7. a) Explique la naturaleza de las ondas electromagnéticas. ¿Cómo caracterizaría mejor una onda electromagnética, por su frecuencia o por su longitud de onda?
- b) Ordene, según longitudes de onda crecientes, las siguientes regiones del espectro electromagnético: microondas, rayos X, luz verde, luz roja, ondas de radio.

a1) (Pertenece al Tema NATURALEZA DE LA LUZ)

Son ondas transversales que consisten en la propagación, sin necesidad de soporte material alguno, de dos campos perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, uno magnético y otro eléctrico.

Entre sus características, cabe destacar:

- Se originan por cargas eléctricas aceleradas
- Variación periódica del estado electromagnético del espacio
- No necesita soporte material
- Los vectores de los campos eléctrico y magnético varían sinusoidalmente, por lo que se les pueden aplicar las ecuaciones de ondas armónicas
- Los módulos de  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en una posición y tiempo cumplen:

$$\frac{\vec{E}}{\vec{B}} = c$$

- La velocidad de las ondas electromagnéticas depende del medio de propagación
- Se cumple que:

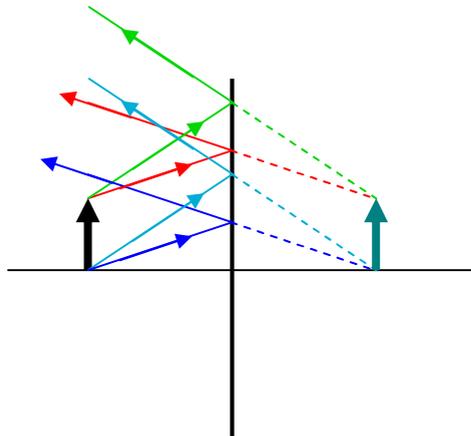
$$c = \lambda \cdot \nu$$

a2) Desde luego que a través de su frecuencia, puesto que la longitud de onda varía en función del medio a través de que se desplaza la perturbación.

b) R-X < verde < rojo < microondas < ondas radio

8. a) Un objeto se encuentra frente a un espejo plano a una distancia de 4 m del mismo. Construya gráficamente la imagen y explique sus características.  
 b) Repita el apartado anterior si se sustituye el espejo plano por uno cóncavo de 2 m de radio.

a)



$$r = \infty$$

$$n = -n'$$

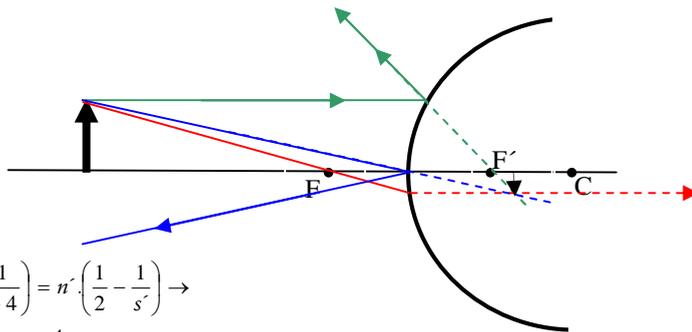
$$s = -4$$

$$n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) \rightarrow -n' \left( \frac{1}{\infty} - \frac{1}{-4} \right) = n' \left( \frac{1}{\infty} - \frac{1}{s'} \right)$$

$$\rightarrow -\frac{1}{4} = -\frac{1}{s'} \rightarrow s' = 4m$$

$$A_L = \frac{y}{y'} = \frac{n \cdot s'}{n' \cdot s} = 1$$

b) Espejo convexo



$$r = 2$$

$$n = -n'$$

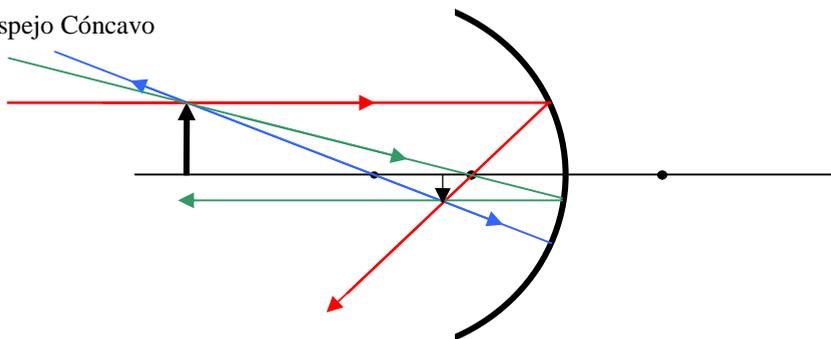
$$s = -4$$

$$n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) \rightarrow -n' \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{-4} \right) = n' \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{s'} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow -\frac{1}{2} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2} = -\frac{1}{s'} \rightarrow \frac{-5}{4} = -\frac{1}{s'} \rightarrow s' = \frac{4}{5}m$$

$$A_L = \frac{y}{y'} = \frac{n \cdot s'}{n' \cdot s} = \frac{-n' \cdot \left(\frac{4}{5}\right)}{n' \cdot (-4)} = \frac{1}{5}$$

c) Espejo Cóncavo



$$r = -2$$

$$n = -n'$$

$$s = -4$$

$$n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) \rightarrow -n' \left( \frac{1}{-2} - \frac{1}{-4} \right) = n' \left( \frac{1}{-2} - \frac{1}{s'} \right) \rightarrow$$

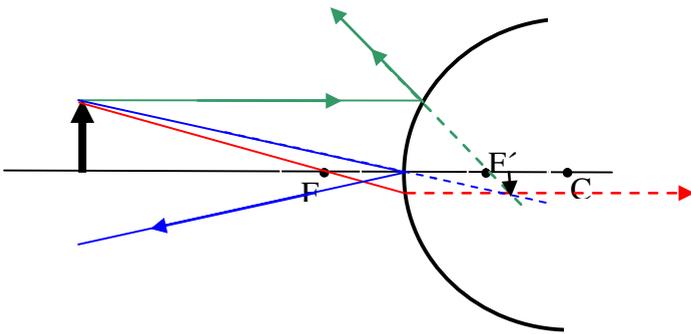
$$\rightarrow \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \right) = \left( \frac{1}{-2} - \frac{1}{s'} \right) \rightarrow \frac{1}{2} - \frac{1}{4} + \frac{1}{2} = -\frac{1}{s'} \rightarrow \frac{3}{4} = -\frac{1}{s'} \rightarrow s' = -\frac{4}{3}m$$

$$A_L = \frac{y}{y'} = \frac{n \cdot s'}{n' \cdot s} = \frac{-n' \cdot s'}{n' \cdot s} = \frac{-\left(-\frac{4}{3}\right)}{-4} = -\frac{1}{3}$$

9. a) Explique con ayuda de un esquema, los fenómenos de reflexión y refracción de la luz y escriba sus leyes.  
b) ¿Puede formarse una imagen real con un espejo convexo? Razone la respuesta utilizando los esquemas oportunos.

a) Ver ejercicio 2

b)



No será posible, independientemente de la posición del objeto con respecto al foco del espejo. El motivo, como puede desprenderse de la figura, es que, tomando dos rayos cualesquiera, por ejemplo el rayo paralelo al eje óptico (que incide sobre el espejo) y el rayo que incide sobre el espejo en el punto en el que este intersecta con el eje óptico salen reflejados en direcciones tales que siempre sucede que sólo se pueden formar imágenes virtuales por intersección de las proyecciones de los rayos elegidos.

10. a) ¿Qué se entiende por interferencia de la luz? b) ¿Por qué no observamos la interferencia de la luz producida por los dos faros de un automóvil?

a) Cuando dos movimientos ondulatorios de diferentes orígenes coinciden en dirección, su efecto es una combinación (superposición) de los movimientos que pertenecen a cada uno

Por tanto, las interferencias luminosas son una consecuencia de la interacción luz-luz, y la perturbación resultante que se produce como resultado de la superposición de dos movimientos ondulatorios en un lugar determinado es la suma de las perturbaciones que produciría cada movimiento ondulatorio por separado.

No obstante, una vez traspasado el lugar de la superposición, los movimientos ondulatorios vuelven a conservar su forma original. Esta propiedad, de conservar su forma después del cruce o superposición, es una característica propia del movimiento ondulatorio a diferencia, por ejemplo, del choque de cuerpos o partículas materiales en movimiento.

Como consecuencia de una interferencia o superposición luminosa se pueden producir, en determinadas condiciones, franjas claras y oscuras en una pantalla. Este hecho no admite explicación alguna mediante la teoría corpuscular de Newton, por lo que Young acude a la teoría ondulatoria y predice las condiciones en las que como consecuencia de las interferencias se producen franjas claras y oscuras en función de la longitud de onda  $\lambda$  de las ondas luminosas que se superponen.

Young explica las interferencias apuntando la idea de que todos los problemas del modelo ondulatorio de Huygens pueden resolverse admitiendo que las vibraciones luminosas son transversales, como las de una onda en una cuerda, en donde la oscilación de la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Pero aún se avanza más, pues, en 1816, el francés Fresnel (1788-1827) sintetiza en uno sólo los conceptos de la teoría ondulatoria de Huygens y el principio de interferencia, al redefinir el principio de Huygens y formular el principio de Huygens-Fresnel, el cual establece que:

Cada punto sin obstrucción de un frente de onda y en un instante dado sirve como un foco de ondas elementales secundarias de cuya superposición resulta el estado luminoso en una región cualquiera del espacio.

Para que el fenómeno de interferencia de las franjas se pueda detectar y sea un fenómeno permanente, se requiere que se cumplan las condiciones:

a) Las ondas que se superponen deben ser coherentes, lo cual significa que la diferencia de fase  $\delta$  entre las ondas que interfieren debe ser una constante para cada punto del espacio, independientemente del tiempo.

b) Las ondas que interfieren deben poseer la misma amplitud y frecuencia o longitud de onda (ondas monocromáticas) y, además, las amplitudes de dichas ondas deben tener direcciones paralelas.

La forma más sencilla de producir interferencias es mediante la experiencia de Young, que consiste en dejar pasar la luz de una fuente luminosa a través de dos rendijas.

Con la teoría corpuscular de la luz cabe esperar el obtener dos puntos bien iluminados semejantes al tamaño de las rendijas en una pantalla situada en frente de las rendijas, pero lo que Young obtuvo fue una disposición de franjas claras y oscuras. Para ello, las rendijas deben ser poca anchas, tienen que encontrarse en el mismo plano y estar separadas entre sí por una distancia pequeña. Además, la luz que atraviesa las rendijas debe satisfacer las condiciones de interferencia ya conocidas.

Por el principio de Huygens-Fresnel, cada rendija se convierte en un centro emisor de ondas, de forma que en la pantalla situada a la distancia  $D$  de las rendijas y en un plano perpendicular al plano en donde se sitúan las rendijas, se recoge una imagen con franjas de luz y oscuridad.

b) [Ver Ejercicio 5b\)](#)

11. a) ¿Qué es una onda electromagnética? b) ¿Cambian las magnitudes características de una onda electromagnética que se propaga en el aire al penetrar en un bloque de vidrio? Si cambia alguna, ¿aumenta o disminuye? ¿Por qué?

a) Ver Ejercicio 6b)

b) La única magnitud que permanece constante es la frecuencia de la onda. La velocidad de propagación de la onda se hace menor al pasar a un medio más refrigente. Debido a esto, y a través de la ecuación  $v = \lambda \cdot f$ , se desprende que la longitud de onda también deberá disminuir, puesto que al hacerlo la velocidad de propagación y ser constante la frecuencia, no queda otra opción, para que la igualdad se mantenga, que el valor de la longitud de onda disminuya.

12. a) ¿Qué se entiende por refracción de la luz? Explique que es el ángulo límite y, utilizando un diagrama de rayos, indique cómo se determina.

b) Una fibra óptica es un hilo transparente a lo largo del cual puede propagarse la luz, sin salir al exterior. Explique por qué la luz "no se escapa" a través de las paredes de la fibra.

a) La **REFRACCIÓN** se produce cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, y se produce un cambio en su dirección de propagación, debido a la distinta velocidad de propagación que tiene la luz en los diferentes medios materiales. A este fenómeno se le llama refracción.

Si dividimos la velocidad de la luz en el vacío entre la que tiene en un medio transparente obtenemos un valor que llamamos índice de refracción de ese medio.

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

, donde  $\left\{ \begin{array}{l} n : \text{índice de refracción} \\ c : \text{velocidad de la luz en el vacío} \\ v : \text{velocidad de la luz en el medio material} \end{array} \right.$

Así, si el índice de refracción del agua es  $n = 1,33$ , querrá decir que la luz es 1,33 veces más rápida en el vacío que en el agua.

El fenómeno de la refracción queda perfectamente definido por una ecuación matemática denominada Ley de Snell, así llamada en honor del matemático holandés Willebrord van Roijen Snell, quien afirmó que el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia ( $\hat{i}$ ) de un rayo es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción ( $\hat{r}$ ):

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

Además, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano.

En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa es mayor que el de un material menos denso, es decir, la velocidad de la luz es menor en la sustancia de mayor densidad. Por tanto, si un rayo incide de forma oblicua sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella. Los rayos que inciden en la dirección de la normal son reflejados y refractados en esa misma dirección.

Para un observador situado en un medio menos denso, como el aire, un objeto situado en un medio más denso parece estar más cerca de la superficie de separación de lo que está en realidad. Un ejemplo habitual es el de un objeto sumergido, observado desde encima del agua, como se muestra en la figura 3 (sólo se representan rayos oblicuos para ilustrar el fenómeno con más claridad). El rayo DB procedente del punto D del objeto se desvía alejándose de la normal, hacia el punto A. Por ello, el objeto parece situado en C, donde la línea ABC intersecta una línea perpendicular a la superficie del agua y que pasa por D.

La siguiente figura muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas. El índice de refracción del agua es más bajo que el del vidrio. Como el índice de refracción del primer y el último medio es el mismo, el rayo emerge en dirección paralela al rayo incidente AB, pero resulta desplazado.

Por otro lado, y puesto que los rayos se alejan de la normal cuando entran en un medio menos denso, y la desviación de la normal aumenta a medida que aumenta el ángulo de incidencia, hay un determinado ángulo de incidencia, denominado **ÁNGULO CRÍTICO**, para el que el rayo refractado forma un ángulo de  $90^\circ$ . Con la normal, por lo que avanza justo a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios.

Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados.

Ya se indicó en el tema anterior la forma de determinar el ángulo a partir del cual se produce reflexión total:

$$\left. \begin{array}{l} n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r} \\ \hat{r} = 90^\circ \rightarrow \text{sen } \hat{r} = 1 \end{array} \right\} \rightarrow n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \rightarrow \text{sen } \hat{i} = \frac{n_2}{n_1}$$

La reflexión total no puede producirse cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso.

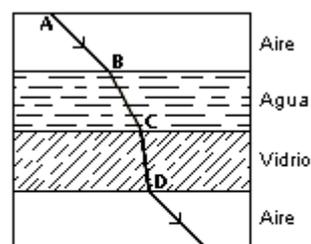


Figura 4

Rayo refractado que atraviesa tres medios diferentes

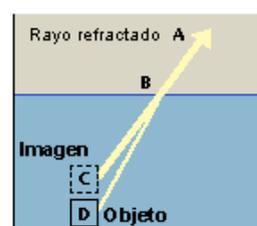


Figura 3

Como resultado de la refracción, el objeto sumergido parece estar más cerca de la superficie del agua

b)

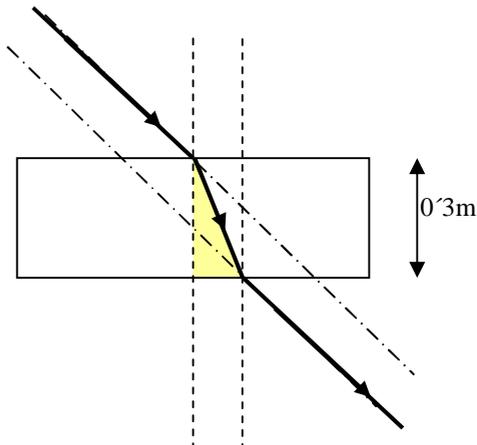
La fibra óptica es una nueva aplicación práctica de la reflexión total. Cuando la luz entra por un extremo de un tubo macizo de vidrio o plástico, puede verse reflejada totalmente en la superficie exterior del tubo y, después de una serie de reflexiones totales sucesivas, salir por el otro extremo. Es posible fabricar fibras de vidrio de diámetro muy pequeño, recubrirlas con un material de índice de refracción menor y juntarlas en haces flexibles o placas rígidas que se utilizan para transmitir imágenes. Los haces flexibles, que pueden emplearse para iluminar además de para transmitir imágenes, son muy útiles para la exploración médica, ya que pueden introducirse en cavidades estrechas e incluso en vasos sanguíneos.

La fibra óptica es una delgada hebra de vidrio o silicio fundido que conduce la luz. El grosor del filamento es comparable al grosor de un cabello humano, es decir, aproximadamente de 0,1 mm. En cada filamento de fibra óptica podemos apreciar 3 componentes:

- La fuente de luz: LED o laser.
- el medio transmisor : fibra óptica.
- el detector de luz: fotodiodo.

Un cable de fibra óptica está compuesto por: Núcleo, manto, recubrimiento, tensores y chaqueta. Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro, el rayo se refracta (se dobla) entre las fronteras de los medios. De esta forma, el rayo queda atrapado dentro de la fibra y se puede propagar por muchos kilómetros virtualmente sin pérdidas

13. Un haz de luz penetra en una lámina de vidrio, de 30 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ .
- Explique si cambia el color de la luz al penetrar en el vidrio y determine el ángulo de refracción.
  - Determine el ángulo de emergencia (ángulo del rayo que sale de la lámina con la normal).  
¿Qué tiempo tarda la luz en atravesar la lámina de vidrio?  
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $n(\text{vidrio}) = 1,3$



- a) No, no se produce cambio en el color de la onda electromagnética puesto que no se produce variación en la frecuencia de la onda (magnitud que determina su color).

Se produce una variación en la velocidad de propagación. Este hecho lleva asociado un cambio en la longitud de onda, para mantener válida la expresión:

$$v_{\text{PROPAG}} = \dots$$

Por otro lado, la determinación del ángulo de refracción se determinará fácilmente a través de la igualdad correspondiente a la LEY DE SNELL:

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

Sustituyendo para nuestro caso particular:

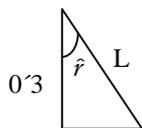
$$1 \cdot \text{sen} 45 = 1,3 \cdot \text{sen} \hat{r} \rightarrow \text{sen} \hat{r} = \frac{\text{sen} 45}{1,3} \rightarrow \hat{r} = 32,95^\circ$$

- b) Si aplicamos Snell por segunda vez:

$$1,3 \cdot \text{sen} 32,95^\circ = 1 \cdot \text{sen} \hat{r}_2 \rightarrow \text{sen} \hat{r}_2 = 0,70745^\circ \rightarrow \hat{r}_2 = 45^\circ$$

(Paralelo al haz inicial)

Para determinar el tiempo invertido en atravesar la lámina, deberemos conocer las características del triángulo coloreado en la figura superior



$$L = 0,3 \cdot \cos \hat{r} = 0,3 \cdot \cos 32,95^\circ = 0,252 \text{ m}$$

El tiempo invertido será:  $L = v \cdot t \rightarrow 0,252 = \left(\frac{3 \cdot 10^8}{1,3}\right) \cdot t \rightarrow t = 1,09 \cdot 10^{-9} \text{ sg}$

14. a) Explique los fenómenos de reflexión y refracción de una onda.  
 b) ¿Tienen igual frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación la onda incidente, la reflejada y la refractada?

a) Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio, donde puede o no ser absorbido. La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia (véase figura 1). El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal. Los ángulos de reflexión y refracción se definen, respectivamente, como los formados entre rayo reflejado y normal, y entre rayo refractado y normal.

Las leyes de la reflexión afirman que:

- i. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- ii. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano.

Si la superficie del segundo medio es lisa, puede actuar como un

espejo y producir una imagen reflejada (figura 2). En la figura 2, la fuente de luz es el objeto A; un punto de A emite rayos

en todas las direcciones. Los dos rayos que inciden sobre el espejo en B y C, por ejemplo, se reflejan como rayos BD y CE. Para un observador situado delante del espejo, esos rayos parecen venir del punto F que está detrás del espejo. De las leyes de reflexión se deduce que CF y BF forman el mismo ángulo con la superficie del espejo que AC y AB. En este caso, en el que el espejo es plano, la imagen del objeto parece situada detrás del espejo y separada de él por la misma distancia que hay entre éste y el objeto que está delante. Este tipo de reflexión se conoce como **REFLEXIÓN REGULAR**.

Si la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En ese caso, los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia diferente, y por tanto de reflexión,

aleatorio. Esto hace que se dispersen y no puedan formar una imagen. Tendremos entonces la **REFLEXIÓN DIFUSA**.

La **REFRACCIÓN** se produce cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, y se produce un cambio en su dirección de propagación, debido a la distinta velocidad de propagación que tiene la luz en los diferentes medios materiales.

A este fenómeno se le llama refracción.

Si dividimos la velocidad de la luz en el vacío entre la que tiene en un medio transparente obtenemos un valor que llamamos índice de refracción de ese medio.

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

, donde

$$\begin{cases} n : \text{índice de refracción} \\ c : \text{velocidad de la luz en el vacío} \\ v : \text{velocidad de la luz en el medio material} \end{cases}$$

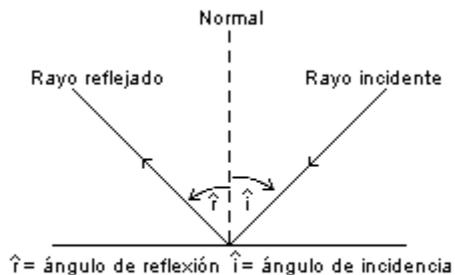
Así, si el índice de refracción del agua es  $n = 1,33$ , querrá decir que la luz es 1,33 veces más rápida en el vacío que en el agua.

El fenómeno de la refracción queda perfectamente definido por una ecuación matemática denominada **Ley de Snell**, así llamada en honor del matemático holandés Willebrord van Roijen Snell, quien afirmó que el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia ( $\hat{i}$ ) de un rayo es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción ( $\hat{r}$ ):

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

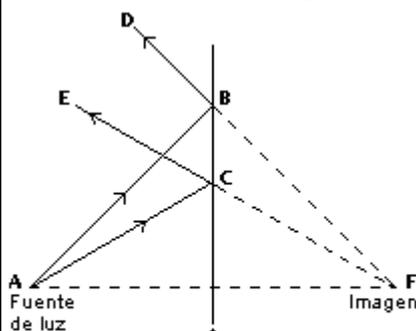
Además, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano.

En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa es mayor que el de un material menos denso, es decir, la velocidad de la luz es menor en la sustancia de mayor densidad. Por tanto, si un rayo incide de forma oblicua sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella. Los rayos que inciden en la dirección de la normal son reflejados y refractados en esa misma dirección.



**Figura 1**

*Leyes fundamentales de la reflexión*



**Figura 2**

*Reflexión en un espejo plano*

Para un observador situado en un medio menos denso, como el aire, un objeto situado en un medio más denso parece estar más cerca de la superficie de separación de lo que está en realidad. Un ejemplo habitual es el de un objeto sumergido, observado desde encima del agua, como se muestra en la figura 3 (sólo se representan rayos oblicuos para ilustrar el fenómeno con más claridad). El rayo  $DB$  procedente del punto  $D$  del objeto se desvía alejándose de la normal, hacia el punto  $A$ . Por ello, el objeto parece situado en  $C$ , donde la línea  $ABC$  intersecta una línea perpendicular a la superficie del agua y que pasa por  $D$ .

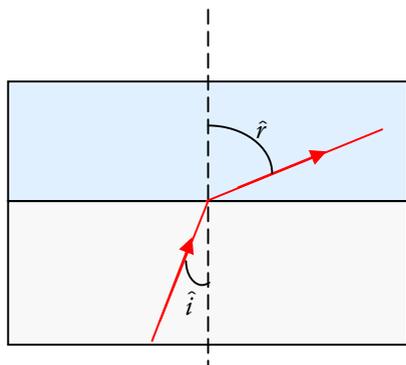
La siguiente figura muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas. El índice de refracción del agua es más bajo que el del vidrio. Como el índice de refracción del primer y el último medio es el mismo, el rayo emerge en dirección paralela al rayo incidente  $AB$ , pero resulta desplazado.

b) La onda incidente y la reflejada tienen igual frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación. En cuanto a la onda refractada, la frecuencia seguirá siendo la misma, pero la longitud de onda y la velocidad de propagación variarán, concretamente, si el segundo medio tiene mayor índice de refracción, la longitud de onda decrecerá, así como la velocidad de propagación (Ver ejercicio 11 a))

15. Un rayo de luz monocromática emerge desde el interior de un bloque de vidrio hacia el aire. Si el ángulo de incidencia es de  $19,5^\circ$  y el de refracción de  $30^\circ$ .

- a) Determine el índice de refracción y la velocidad de propagación de la luz en el vidrio.  
 b) Como sabe, pueden existir ángulos de incidencia para los que no hay rayo refractado; es decir, no sale luz del vidrio. Explique este fenómeno y calcule los ángulos para los que tiene lugar.  
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $n_{\text{aire}} = 1$

a)



La LEY DE SNELL relaciona los ángulos de incidencia y refracción para un haz luminoso que atraviesa un dioptrio cualquiera.

$$n \cdot \text{sen } \hat{i} = n' \cdot \text{sen } \hat{r}$$

La cuestión es tan simple como no tener nada más que sustituir los valores que nos aporta el problema:

$$n \cdot \text{sen } \hat{i} = n' \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow n \cdot \text{sen } 19,5^\circ = 1 \cdot \text{sen } 30^\circ \rightarrow$$

$$\rightarrow n = \frac{\text{sen } 30^\circ}{\text{sen } 19,5^\circ} = 1,498 \cong 1,5$$

Para determinar la velocidad de propagación en el medio, recordemos que:

$$1,498 = \frac{c}{v} = \frac{3 \cdot 10^8}{v} \rightarrow v = \frac{3 \cdot 10^8}{1,498} = 2,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

b) Por otro lado, y puesto que los rayos se alejan de la normal cuando entran en un medio menos denso, y la desviación de la normal aumenta a medida que aumenta el ángulo de incidencia, hay un determinado ángulo de incidencia, denominado **ÁNGULO CRÍTICO**, para el que el rayo refractado forma un ángulo de  $90^\circ$  con la normal, por lo que avanza justo a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios. Este fenómeno se conoce como **REFLEXIÓN TOTAL**

Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados.

La forma de determinar el ángulo a partir del cual se produce reflexión total:

$$\left. \begin{array}{l} n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r} \\ \hat{r} = 90^\circ \rightarrow \text{sen } \hat{r} = 1 \end{array} \right\} \rightarrow n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \rightarrow \text{sen } \hat{i} = \frac{n_2}{n_1}$$

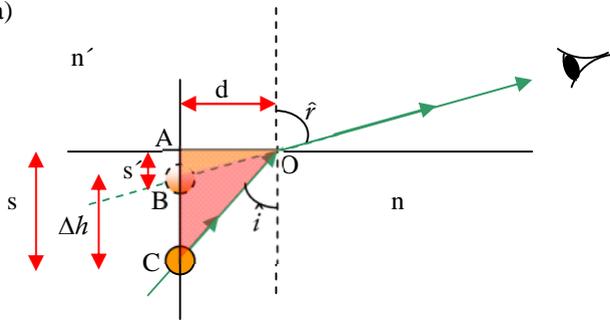
En nuestro caso:

$$\text{sen } \hat{i} = \frac{1}{1,5} = \frac{2}{3} \rightarrow \hat{i} = 41,81^\circ$$

La reflexión total no puede producirse cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso.

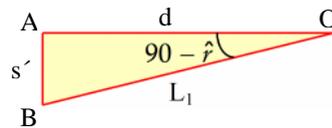
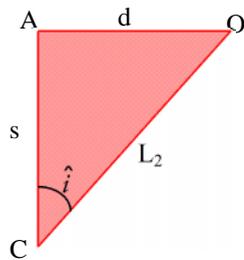
16. a) ¿Por qué la profundidad real de una piscina llena de agua es siempre mayor que la profundidad aparente?  
 b) Explique qué es el ángulo límite bajo qué condiciones puede observarse.

a)



Cuando la refracción se produce desde un medio más refrigente a otro de menor índice de refracción, el haz de luz que sale a través de la superficie de separación de los medios (dioptrio plano) se alejará de la normal. Nuestro sentido de la vista percibirá el rayo de luz emergido como un haz recto desde su foco, como indica la figura (el ojo no es capaz de percibir el cambio sufrido por el haz al atravesar un medio distinto del inicial

Por lo tanto, el objeto parece estar situado a menor profundidad de lo que se haya en realidad. Veamos los triángulos:



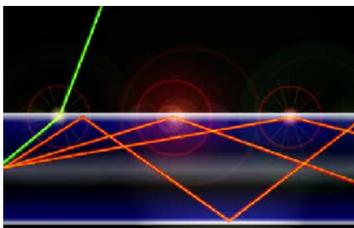
De las figuras se observa que:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \hat{i} = \frac{d}{s} \\ \operatorname{tg}(90 - \hat{r}) = \frac{s'}{d} \rightarrow \operatorname{tg} \hat{r} = \frac{d}{s'} \end{cases}$$

Si consideramos ahora la ley de Snell para ángulos muy pequeños:

$$n \cdot \operatorname{sen} \hat{i} = n' \cdot \operatorname{sen} \hat{r} \cong n \cdot \operatorname{tg} \hat{i} = n' \cdot \operatorname{tg} \hat{r} \cong n \cdot \hat{i} = n' \cdot \hat{r} \rightarrow n \cdot \frac{d}{s} = n' \cdot \frac{d}{s'} \rightarrow \frac{n}{s} = \frac{n'}{s'} \rightarrow \frac{n}{n'} = \frac{s}{s'}$$

, y puesto que  $n > n'$ , resultará que  $s > s'$ .



b) Por otro lado, y puesto que los rayos se alejan de la normal cuando entran en un medio menos denso, y la desviación de la normal aumenta a medida que aumenta el ángulo de incidencia, hay un determinado ángulo de incidencia, denominado **ÁNGULO CRÍTICO**, para el que el rayo refractado forma un ángulo de  $90^\circ$  con la normal, por lo que avanza justo a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios. Este fenómeno se conoce como **REFLEXIÓN TOTAL**.

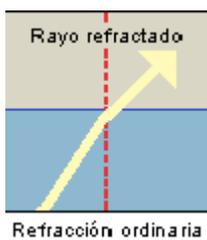
Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados.

La forma de determinar el ángulo a partir del cual se produce reflexión total:

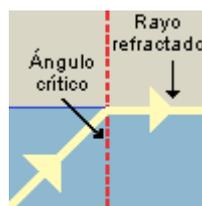
$$\left. \begin{aligned} n_1 \cdot \operatorname{sen} \hat{i} &= n_2 \cdot \operatorname{sen} \hat{r} \\ \hat{r} &= 90^\circ \rightarrow \operatorname{sen} \hat{r} = 1 \end{aligned} \right\} \rightarrow n_1 \cdot \operatorname{sen} \hat{i} = n_2 \rightarrow \operatorname{sen} \hat{i} = \frac{n_2}{n_1}$$

La reflexión total no puede producirse cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso.

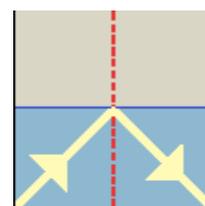
Las tres ilustraciones adjuntas muestran la refracción ordinaria, la refracción en el ángulo crítico y la reflexión total.



Refracción ordinaria



Refracción en el ángulo crítico



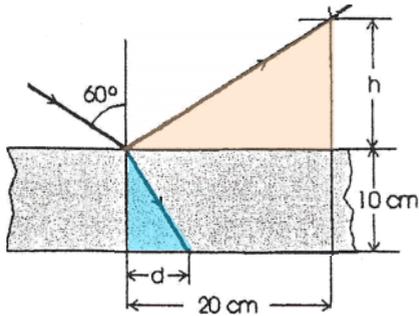
Reflexión total

**Figura 6**  
Ángulo crítico

17. 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:
- La altura  $h$  y la distancia  $d$  marcadas en la figura.
  - El tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina.
- $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

a)

Tomemos en primer lugar el rayo reflejado:



Si observamos el triángulo coloreado en sepia,

$$\begin{cases} \alpha = 30^\circ \\ \text{cateto opuesto} = h \\ \text{cateto contiguo} = 0'2\text{m} \end{cases}$$

Fácilmente, se deduce que:

$$\text{tg}30 = \frac{h}{0'2} \rightarrow h = 0'2 \cdot \text{tg}30 = 0'115\text{m}$$

Sigamos ahora con el haz refractado; utilizando la ley de Snell:

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

$$1 \cdot \text{sen}60 = 1'5 \cdot \text{sen } \hat{r} \rightarrow \text{sen } \hat{r} = \frac{\text{sen}60}{1'5} = 0'577 \rightarrow \hat{r} = 35'26^\circ$$

Observando ahora el triángulo azul:

$$\left. \begin{cases} \hat{r} = 35'26^\circ \\ \text{cateto opuesto} = d \\ \text{cateto contiguo} = 0'1\text{m} \end{cases} \right\} \rightarrow \text{tg } \hat{r} = \frac{d}{0'1} \rightarrow d = 0'1 \cdot \text{tg}35'26^\circ = 7'1 \cdot 10^{-2}\text{m}$$

b)

$$n_{\text{vidrio}} = 1'5$$

$$\frac{c}{v} = 1'5 \rightarrow v_{\text{vidrio}} = \frac{c}{1'5} = \frac{3 \cdot 10^8}{1'5} = 2 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

El tramo recorrido en el vidrio se corresponderá con la hipotenusa del triángulo azul. Sirviéndonos de Pitágoras:

$$L^2 = 0'1^2 + (7'1 \cdot 10^{-2})^2 \rightarrow L = 0'123\text{m}$$

Ahora, simplemente calculamos el tiempo:

$$L = v \cdot t \rightarrow 0'123 = 2 \cdot 10^8 \cdot t \rightarrow t = \frac{0'123}{2 \cdot 10^8} = 6'15 \cdot 10^{-10} \text{ sg}$$

18. 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.

**Modelo Corpuscular De La Luz.** Descartes, a finales del siglo XVI, fue el primer gran defensor de la teoría corpuscular, diciendo que la luz se comportaba como un proyectil que se propulsaba a velocidad infinita, sin especificar absolutamente nada sobre su naturaleza, pero rechazando que cierta materia fuera de los objetos al ojo.

Explicó claramente la reflexión, pero tuvo alguna dificultad con la refracción.

Según Newton, las fuentes luminosas emiten corpúsculos muy livianos que se desplazan a gran velocidad y en línea recta.

Podemos fijar ya la idea de que esta teoría además de concebir la propagación de la luz por medio de corpúsculos, también sienta el principio de que los rayos se desplazan en forma rectilínea.

Newton explicó que la variación de intensidad de la fuente luminosa es proporcional a la cantidad de corpúsculos que emite en determinado tiempo.

La reflexión de la luz consiste en la incidencia de dichos corpúsculos en forma oblicua en una superficie lisa, de manera que al llegar a ella varía de dirección pero siempre en el mismo medio. La igualdad del ángulo de incidencia con el de reflexión se debe a la circunstancia de que tanto antes como después de la reflexión los corpúsculos conservan la misma velocidad (debido a que permanece en el mismo medio).

La refracción la resolvió expresando que los corpúsculos que inciden oblicuamente en una superficie de separación de dos medios de distinta densidad son atraídos por la masa del medio más denso y, por lo tanto, aumenta la componente de la velocidad que es la velocidad que es perpendicular a la superficie de separación, razón por la cual los corpúsculos luminosos se acercan a la normal.

Según lo expresado por Newton, la velocidad de la luz aumentaría en los medios de mayor densidad, lo cual contradice los resultados de los experimentos realizados años después. Esta explicación, contradictoria con los resultados experimentales sobre la velocidad de la luz en medios más densos que el vacío, obligó al abandono de la teoría corpuscular.

En la misma época, otro investigador, Christian Huygens (en el año 1678), define a la luz como un movimiento ondulatorio semejante al que se produce con el sonido. Propone el:

**Modelo Ondulatorio**, según el cual la luz no es más que una perturbación ondulatoria de tipo mecánico, que necesita un medio material para propagarse. Supuso tres hipótesis:

1. Todos los puntos de un frente de ondas eran centros emisores de ondas secundarias;
2. De todo centro emisor se propagaban ondas en todas direcciones del espacio con velocidad distinta en cada medio;
3. Como la luz se propagaba en el vacío y necesitaba un material perfecto sin rozamiento, se supuso que todo el espacio estaba ocupado por éter, que hacía de soporte de las ondas.

Ahora, como los físicos de la época consideraban que todas las ondas requerían de algún medio que las transportaran en el vacío, para las ondas lumínicas se postula como medio a una materia insustancial e invisible a la cual se le llamó éter.

- b) R-X < VIS < ondas de radio (Pertenece al Tema "Naturaleza de la Luz")

19. 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.

a) **Ver ejercicio 2. Apartado a)**

- b) Se trata de una refracción en la que el haz luminoso pasa de un medio de un índice de refracción mayor a otro de menor índice de refracción; por lo tanto, la desviación que sufre lo aleja de la normal. La velocidad aumentará al pasar al nuevo medio (aire). Esta afirmación puede desprenderse del concepto de índice de refracción.

$$\left. \begin{array}{l} n_1 = \frac{c}{v_1} \\ n_2 = \frac{c}{v_2} \end{array} \right\} n_1 > n_2 \rightarrow \frac{c}{v_1} > \frac{c}{v_2} \rightarrow \frac{1}{v_1} > \frac{1}{v_2} \rightarrow v_2 > v_1$$

La frecuencia de la onda permanecerá constante, puesto que esta magnitud es una propiedad característica de la onda.

En cuanto a la longitud de onda, puesto que:

$$v_2 > v_1 \rightarrow \lambda_2 \cdot \nu > \lambda_1 \cdot \nu \rightarrow \lambda_2 > \lambda_1$$