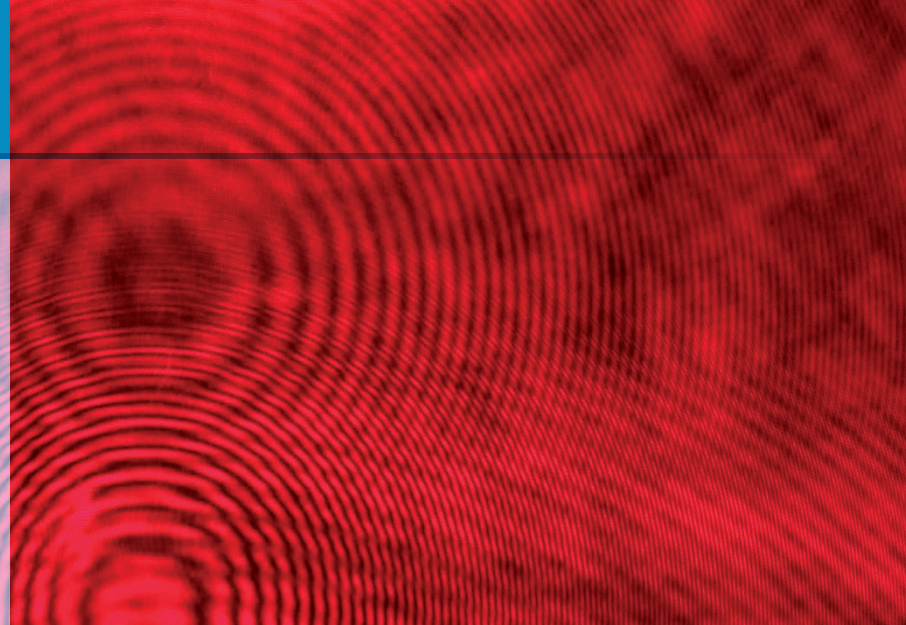


## Difracción e interferencia de la luz

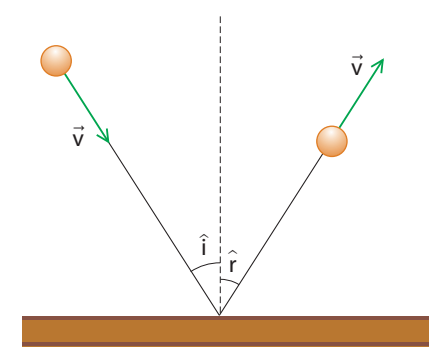


En el capítulo 1 mencionamos dos corrientes de pensamiento que intentaban explicar las propiedades de la luz: el modelo corpuscular y el modelo ondulatorio. Hagamos un resumen de las propiedades de la luz y veamos si estos modelos pueden explicarlos satisfactoriamente.

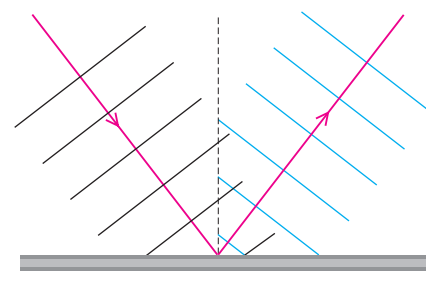
### Reflexión



**Fig. 1a.** Reflexión de un haz de luz en un espejo plano.



**Fig. 1b.** "Reflexión" de una pelotita al chocar con un obstáculo plano



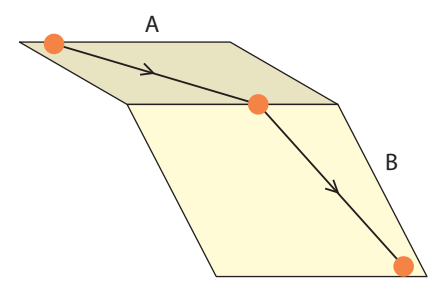
**Fig. 1c** Reflexión de un frente de ondas plano en un obstáculo plano

La reflexión de la luz y sus leyes pueden ser explicadas satisfactoriamente por los dos modelos (Fig 1a, 1b, 1c). Ondas y partículas se reflejan de forma tal que el ángulo de incidencia es igual al reflejado.

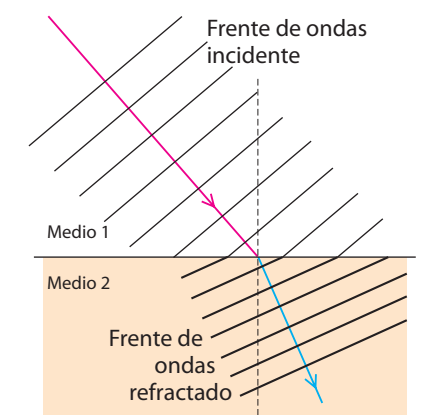
### Refracción



**Fig. 2a.** Cambio de dirección de un haz de luz al cambiar de medio.



**Fig. 2b.** Cambio en la dirección del movimiento de una pelotita al cambiar de medio. Al aumentar su velocidad se acerca a la normal.

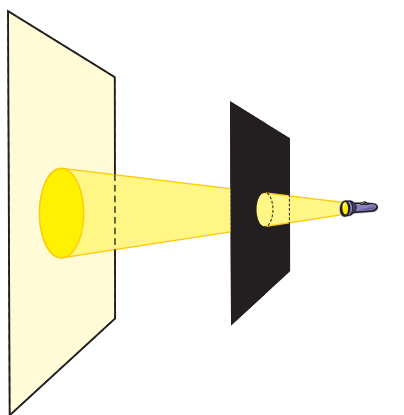


**Fig. 2c** Cambio en la dirección de propagación de un frente de ondas plano al cambiar de medio. Al disminuir la velocidad se acerca a la normal

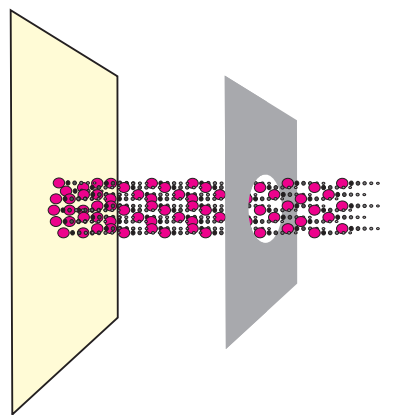
Si bien ambos modelos explican la desviación de la dirección de propagación al cambiar de medio y cambiar la velocidad, el modelo corpuscular prevé que la dirección de propagación debe acercarse a la normal si la velocidad de propagación aumenta. Experimentalmente se demostró que ocurre lo contrario. Por ejemplo, la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire, y un rayo de luz que se propaga del agua al aire se aleja de la normal (Fig 2a, 2b, 2c).

Según esta evidencia experimental el modelo ondulatorio explica mejor que el corpuscular el fenómeno de la refracción de la luz.

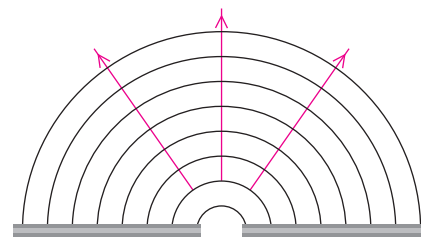
### Difracción



**Fig. 3a.** Al pasar por un orificio pequeño el haz de luz no se desvía.

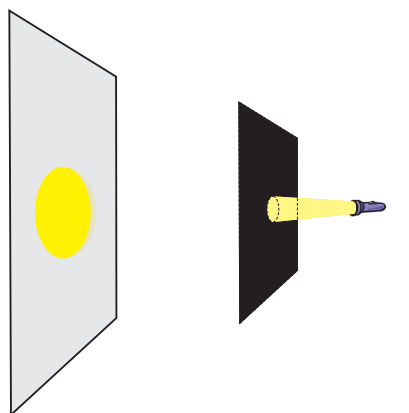


**Fig. 3b.** Al pasar por un orificio pequeño, el chorro de esferitas no se desvía.

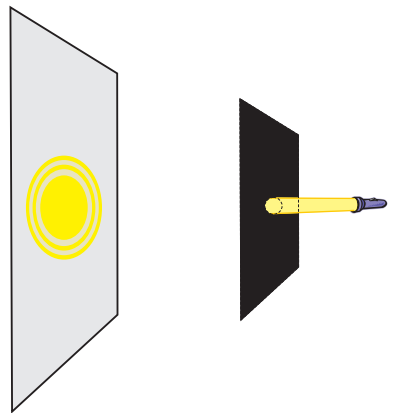


**Fig. 3c.** Al pasar por un orificio pequeño, el frente de ondas se desvía, propagándose en todas direcciones.

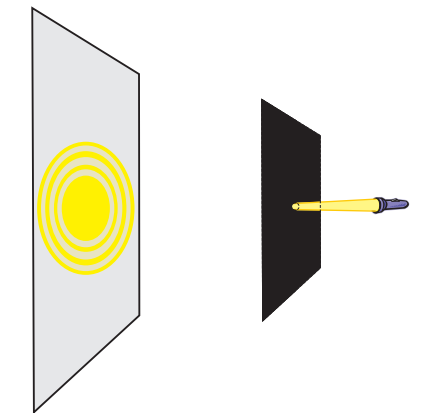
Se encuentran grandes similitudes entre lo que ocurre con un haz de luz al pasar por un orificio y lo que sucede con un chorro de partículas al pasar por una abertura (Fig 3a, 3b y 3c). Esto nos haría descartar el modelo ondulatorio. Pero ¿y si la luz es una onda de  $\lambda$  tan pequeño que su difracción no es fácilmente apreciable? Para que la difracción sea notoria, la longitud de onda y el tamaño de la abertura deben ser similares. Si hacemos que un haz de luz atraviese un orificio circular, en una pantalla se obtendrá una mancha de luz de tamaño semejante al del orificio (fig 3a). ¿Qué sucede si disminuimos el tamaño del orificio? Como muestran las figuras 4a, 4b y 4c (las figuras no están a escala), el diámetro de la zona luminosa aumenta. Esta evidencia experimental abre la posibilidad que la luz sea una onda de  $\lambda$  extremadamente pequeña.



**Fig. 4a.** Al disminuir el tamaño del orificio, el diámetro de la zona luminosa aumenta.

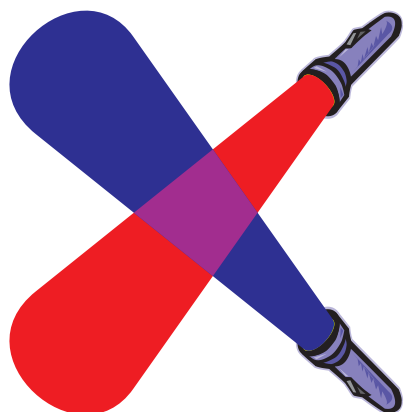
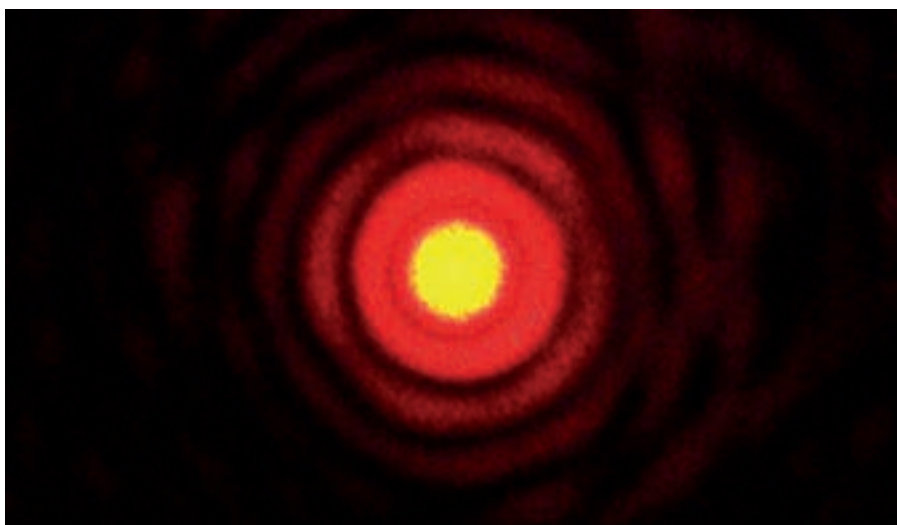


**Fig. 4b** Si disminuimos aún más el orificio, la difracción es más notoria. Se aprecian anillos oscuros y brillantes.



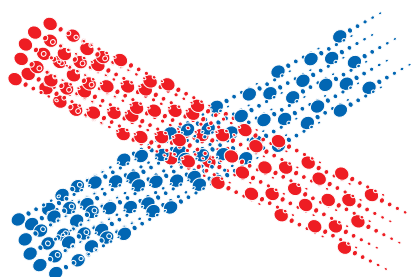
**Fig. 4c.** La difracción de la luz es muy notoria si el diámetro del orificio es menor que 0,1mm.

**Fig. 5.** Patrón de difracción obtenido en un laboratorio. Se utilizó un láser de Helio-Neón y el diámetro de la abertura fue de 0,1 mm.



**Fig. 6a.** Dos haces de luz que se superponen, continúan cada uno con sus características iniciales.

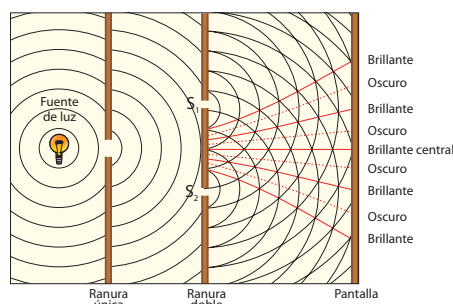
### Interferencia. Experimento de Young.



**Fig. 6b.** Dos chorros de partículas pequeñísimas se superponen y luego continúan con sus características iniciales.



**Fig. 6c.** Interferencia de ondas en la cubeta. Se observan claramente las líneas nodales (interferencia destructiva)



**Fig. 7.** Experimento de Young. La luz pasa por la primera rendija y se difracta, pasando por  $S_1$  y  $S_2$  que se comportan como focos coherentes.

Los defensores de la teoría ondulatoria encontraban en la interferencia de ondas un gran obstáculo. Dos haces luminosos que se superponen continúan su camino sin alteraciones igual que dos chorros de partículas pequeñísimas, que se cruzan sin chocar (fig 6a y 6b). Al superponerse ondas se aprecian zonas de interferencia destructiva, líneas nodales cuyos puntos no se ven afectados por las perturbaciones (fig. 6c). Si la luz fuera un fenómeno ondulatorio, debería apreciarse esta interferencia destructiva, es decir que a partir de dos focos luminosos, deberíamos obtener zonas de oscuridad. En el siglo XVIII esto no parecía posible. Si colocamos dos lámparas cercanas emitiendo luz simultáneamente, no esperamos encontrar zonas de sombra. Recordemos las condiciones necesarias para obtener interferencia de sonido: dos focos que emiten **en fase** ondas idénticas. Las dos lámparas pueden ser idénticas, pero la emisión de luz se da en forma aleatoria por los átomos del filamento, por lo que difícilmente las lámparas emitan en fase.

En 1801 (5 años antes de las invasiones inglesas a nuestro territorio), Thomas Young, un médico inglés, logró obtener dos focos luminosos en fase con un ingenioso dispositivo (fig 7). Hizo pasar luz solar por un orificio pequeño, que cumplía la función de foco puntual. La luz proveniente de este foco incidía en dos orificios pequeños. Como la luz en cada orificio



provenía de un foco puntual, cualquier cambio de la luz en un orificio se repetía en el otro, por lo tanto se comportaban como dos focos que emitían en fase.

En su experimento, Young obtuvo a partir de dos focos de luz zonas oscuras (fig 9). Estas zonas oscuras corresponden a regiones donde se produce interferencia destructiva. La imagen presenta grandes similitudes con lo que puedes observar en una burbuja de jabón o en una mancha de aceite en el pavimento (fig 8). También en estos casos se produce interferencia de luz.

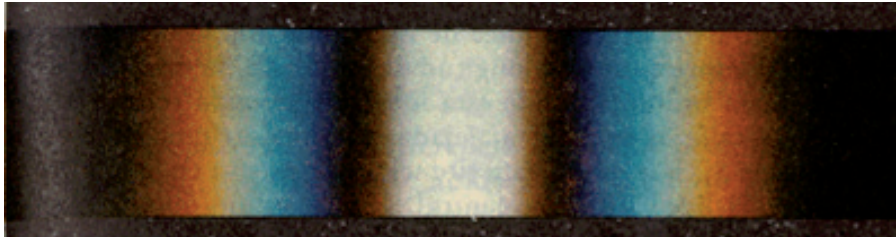


Fig. 9. Patrón de interferencia de luz blanca. Las franjas de distintos colores aparecen a distintas distancias del centro del patrón.

Repetiendo el experimento, pero agregando un filtro a la luz solar para que la luz incidente sea de un solo color, podemos obtener patrones de interferencia para luz monocromática (fig 10). En ellos se observa que la separación entre franjas luminosas y oscuras es diferente para cada color.



Fig. 10. Patrones de interferencia para luz roja, azul, verde y violeta. Se observa que la separación entre zonas oscuras es mayor para el color rojo y menor para el violeta.

Hoy podemos realizar fácilmente este experimento haciendo incidir un haz de luz laser (fig 11) en una rendija doble muy estrecha. Como se trata de luz monocromática y coherente, el foco laser se comporta como el primer orificio del experimento de Young.

Estos experimentos sobre interferencia luminosa, fortalecieron la concepción ondulatoria de la luz.

### Determinación de la longitud de onda a partir del patrón de interferencia

La evidencia experimental parece verificar la teoría ondulatoria. Si la luz es una onda, ¿cual es su longitud de onda? ¿y su frecuencia? Realizando el experimento de Young con luz monocromática coherente podemos determinar la longitud de onda de la luz incidente.



Fig. 8a. Interferencia de luz en burbujas de jabón.

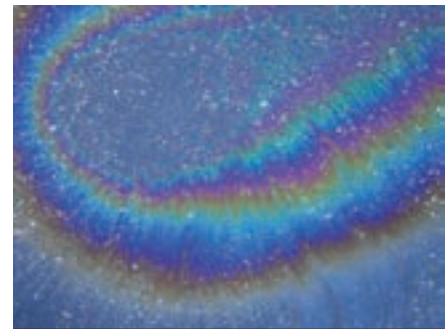


Fig. 8b. Mancha de aceite.

**LASER:** "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación.

Construido por primera vez en 1960 y basado en ideas de Einstein, el laser nos permite obtener un haz de luz monocromático y coherente. Sus aplicaciones hoy en día son muy numerosas: CD, DVD, tecnología médica, comunicaciones.

Luz policromática



Luz monocromática



Luz monocromática coherente

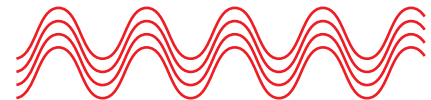
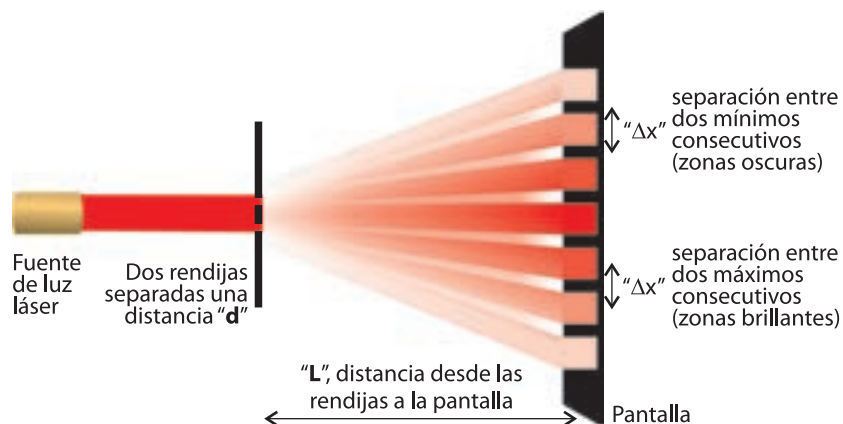


Fig. 11. Características de la luz laser.



**Fig. 12.** Recreación del experimento de Young con láser. Las franjas oscuras (llamadas mínimos) en la pantalla están igualmente espaciadas, lo mismo que las franjas brillantes (llamadas máximos).

Si hacemos pasar luz monocromática coherente por dos rendijas separadas una distancia “d” y colocamos una pantalla a una distancia “L” de las rendijas, podemos apreciar en ella zonas brillantes y oscuras (fig 12), correspondientes al patrón de interferencia de la luz incidente. Si “L” es mucho mayor que “d”, se observa que la separación entre dos mínimos consecutivos (zonas oscuras) es siempre la misma, y coincide además con la separación entre dos máximos consecutivos (zonas brillantes). La denominaremos “ $\Delta x$ ” y cumple las siguientes relaciones.

- “ $\Delta x$ ” es directamente proporcional a “L”
- “ $\Delta x$ ” es directamente proporcional a “ $\lambda$ ”
- “ $\Delta x$ ” es inversamente proporcional a “d”

Podemos resumir estas relaciones en la siguiente ecuación:

$$\Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$$

Por lo tanto si conocemos “ $\Delta x$ ”, “L” y “d” podemos determinar “ $\lambda$ ” de la luz incidente.

$$\lambda = \frac{\Delta x \times d}{L}$$

### Ejemplo 1

Un haz de luz laser rojo incide por dos rendijas finas separadas 0,30mm. En la pantalla se aprecian zonas oscuras separadas 4,2 mm entre si. La distancia de la pantalla a las rendijas es de 2,00m.

a) Determina  $\lambda$  de la luz incidente

De la ecuación  $\Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$  despejamos  $\lambda$   $\lambda = \frac{\Delta x \times d}{L}$

Expresando todas las magnitudes en el Sistema Internacional y sustituyendo

$$\lambda = \frac{0,0042\text{m} \times 0,00030\text{m}}{2,00\text{m}} \quad \lambda = 6,3 \times 10^{-7}\text{m}$$

b) Determina la frecuencia de la luz incidente.

$$v = \lambda \times f, \text{ por lo tanto } f = \frac{v}{\lambda}.$$

Recordando que la luz se propaga en el aire con  $v = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$  y

$$\text{sustituyendo } f = \frac{3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6,3 \times 10^{-7}\text{m}} \quad f = 4,8 \times 10^{14}\text{Hz}$$

c) Si hacemos incidir en las rendijas luz monocromática coherente de  $\lambda = 5,0 \times 10^{-7}\text{m}$ . ¿Cuál es el valor de la separación entre dos mínimos consecutivos?

La separación entre dos mínimos consecutivos es  $\Delta x$ . Utilizando la

$$\text{ecuación } \Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$$

y sustituyendo  $\Delta x = \frac{2,00\text{m} \times 5,0 \times 10^{-7}\text{m}}{0,00030\text{m}} \quad \Delta x = 0,0033\text{m}$

### Color, longitud de onda y frecuencia

Si realizamos el experimento de Young para luz monocromática de distintos colores manteniendo "L" y "d" constante, obtenemos patrones de interferencia con diferentes  $\Delta x$  para cada color (fig 10). Como  $\Delta x = \frac{L \times \lambda}{d}$  podemos deducir que a cada color le corresponde una longitud de onda diferente (fig 13).

Los valores de la tabla corresponden a luz que se propaga en el aire, medio en el cual fue realizado el experimento. Si un haz de luz roja pasa del aire al vidrio, su color no cambia. Vimos en el capítulo 8 que la longitud de onda sí cambia cuando una onda cambia de medio. La magnitud que no varía en ese caso es la frecuencia. Podemos calcular la frecuencia correspondiente a cada color de luz utilizando  $f = \frac{c}{\lambda}$ .

Esta frecuencia es característica de cada color y su valor no se altera al cambiar de medio (fig 14).

#### En resumen

El modelo ondulatorio explica satisfactoriamente la reflexión, refracción, difracción e interferencia de la luz. De acuerdo a la evidencia experimental, ésta se comporta como una onda de longitud de onda muy pequeña ( $10^{-7}\text{m}$ ) y frecuencia muy grande ( $10^{14}\text{Hz}$ ), que se propaga en el aire con  $v = 3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . A cada color le corresponde una frecuencia diferente.

Color	$\lambda$ (x $10^{-7}\text{m}$ )
rojo	6,1 - 7,0
naranja	5,9 - 6,1
amarillo	5,7 - 5,9
verde	5,0 - 5,7
azul	4,5 - 5,0
violeta	4,0 - 4,5

Fig. 13. Tabla de colores y longitudes de onda. El rojo presenta mayor  $\lambda$ .

Color	f (x $10^{14}\text{Hz}$ )
rojo	4,3 - 4,9
naranja	4,9 - 5,1
amarillo	5,1 - 5,3
verde	5,3 - 6,0
azul	6,0 - 6,7
violeta	6,7 - 7,5

Fig. 14. Tabla de colores y frecuencias. El violeta presenta la mayor frecuencia.

## PREGUNTAS

- 1) ¿El modelo corpuscular de la luz explica satisfactoriamente la reflexión? Explica.
- 2) ¿El modelo ondulatorio de la luz explica satisfactoriamente la reflexión? Explica.
- 3) ¿El modelo corpuscular explica satisfactoriamente la refracción de la luz? Explica.
- 4) ¿El modelo ondulatorio explica satisfactoriamente la refracción de la luz? Explica.
- 5) ¿Qué condiciones deben cumplirse para poder apreciar la difracción de la luz?
- 6) ¿Por qué no podemos apreciar interferencia de luz con dos linternas?
- 7) Describe el experimento de Young.
- 8) ¿Qué es la luz láser?
- 9) Nombra cuatro aplicaciones del láser.
- 10) ¿Qué observamos en una pantalla si hacemos pasar luz láser por una rendija doble muy fina?
- 11) ¿Cómo varía el patrón de interferencia luminosa si aumentamos "L", distancia de las rendijas a la pantalla?
- 12) ¿Cómo varía el patrón de interferencia luminosa si aumentamos "d", separación entre las rendijas?
- 13) ¿Qué diferencia existe entre los patrones de interferencia de la luz roja y la luz violeta?
- 14) ¿A qué color de luz corresponde una longitud de onda de  $\lambda = 4,3 \times 10^7 \text{m}$ ?
- 15) ¿A qué color de luz corresponde una frecuencia de  $f = 7,0 \times 10^{14} \text{Hz}$ ?



Láser indicando la posición del meridiano 0. Greenwich, Reino Unido.

## PROBLEMAS

- Un laser de Helio-Neón emite luz de  $\lambda = 632,8\text{nm}$ . (Fig. 15)
  - ¿De qué color es la luz emitida?
  - Expresa su longitud de onda en metros.
  - Determina su frecuencia.
- Repite el problema anterior para  $\lambda_1 = 405\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 473\text{nm}$  y  $\lambda_3 = 593\text{nm}$ .
- Determina la longitud de onda de un haz de luz de  $f = 5,0 \times 10^{14}\text{Hz}$ . ¿A qué color corresponde?
- Realizando el experimento de Young con luz monocromática se obtienen franjas oscuras separadas  $2,0\text{cm}$ . Determina la nueva separación entre las franjas oscuras en los siguientes casos:
  - Aumentamos al doble la separación entre las rendijas.
  - Disminuimos a la mitad la separación entre las rendijas.
  - Aumentamos al doble la distancia de las rendijas a la pantalla.
  - Disminuimos a la mitad la distancia de las rendijas a la pantalla.
- Determina la separación entre mínimos para el patrón de interferencia obtenido en las siguientes condiciones.  
 $L = 5,50\text{m}$   $d = 0,25\text{mm}$   $\lambda = 6,33 \times 10^{-7}\text{m}$



Fig. 15. Problema 1.

- Un laser de Helio-Neón de  $\lambda = 6,328 \times 10^{-7}\text{m}$  incide en dos rendijas muy finas. En una pantalla ubicada a  $4,20\text{m}$  de las rendijas se obtiene el patrón que muestra la figura 16. Determina la separación entre las rendijas.

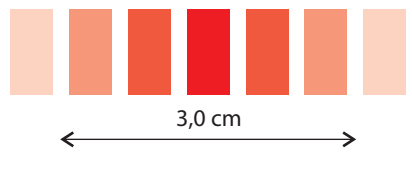


Fig. 16. Problema 6.

- Un laser verde de  $\lambda = 5,32 \times 10^{-7}\text{m}$  incide en dos rendijas muy finas separadas  $0,15\text{mm}$ . En una pantalla se obtiene el patrón de interferencia que muestra la figura 17. Determina la distancia entre las rendijas y la pantalla.

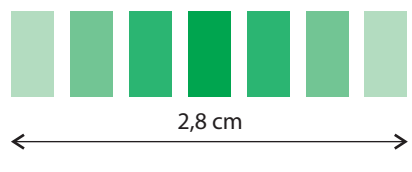


Fig. 17. Problema 7.

- Un puntero laser azul incide en dos rendijas finas separadas  $0,20\text{mm}$ . En una pantalla situada a  $6,35\text{m}$  de las rendijas se obtiene el siguiente patrón de interferencia. (Fig. 18). Determina la longitud de onda del laser.

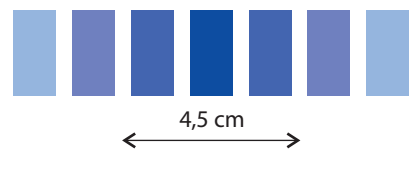


Fig. 18. Problema 8.

