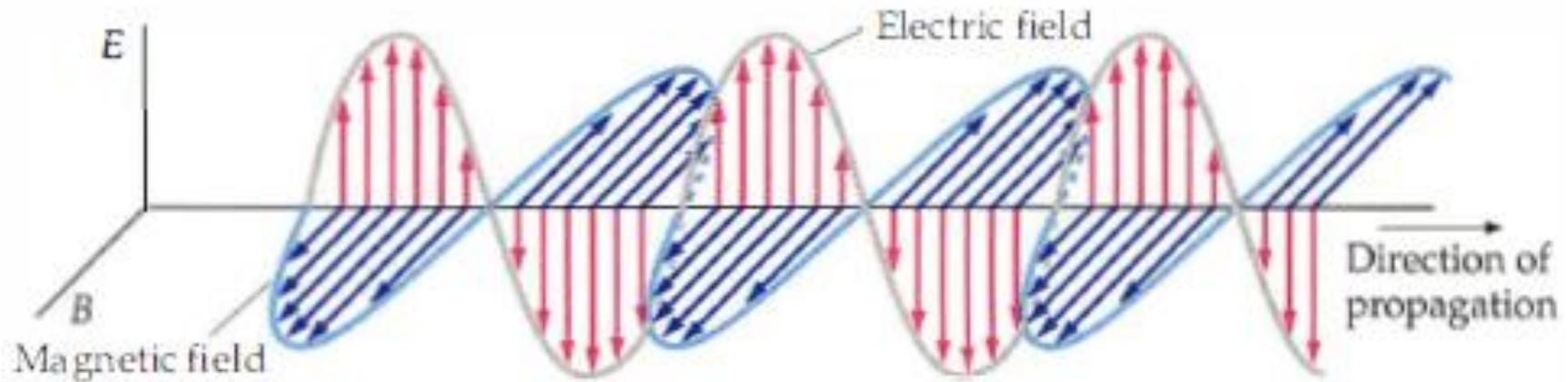


ondas electromagnéticas

En una onda electromagnética (OEM) los vectores de campo eléctrico E y campo magnético B son perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de propagación, en una onda transversal



Las OEM se propagan en el vacío y en medios materiales

Lo que oscila en una OEM son los campos E y B

La velocidad de una onda electromagnética en el vacío está dada por

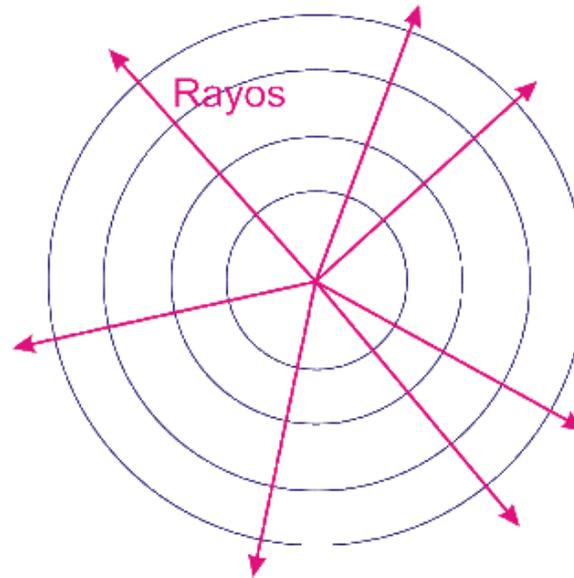
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 300\,000 \text{ km/s} \text{ (} 299\,792\,458 \text{ m/s)}$$

ondas electromagnéticas: frente de onda

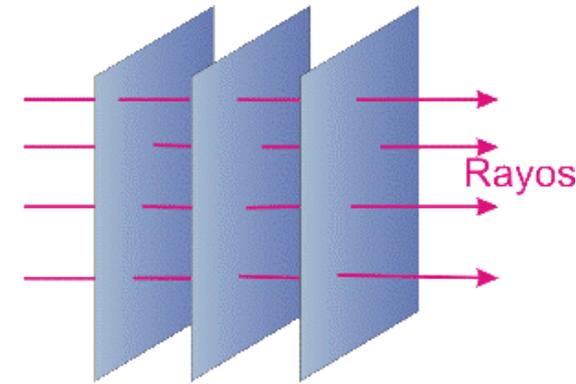
Sea un rayo la línea a lo largo de la cual viaja la OEM. Si todos los rayos son paralelos la OEM es una onda plana.

La superficie que conecta los puntos de igual fase en todas las ondas es un frente de onda

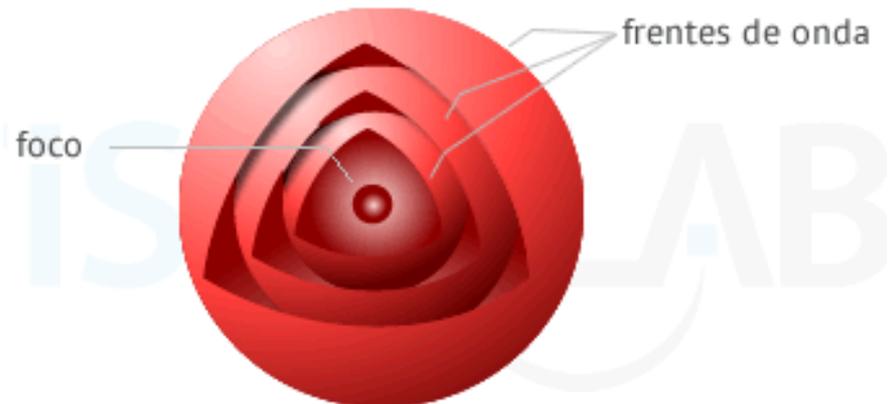
Una fuente puntual (o foco) emite OEM radialmente en todas direcciones. La superficie que conecta puntos de igual fase es una esfera y la onda se llama onda esférica



Frentes de onda esféricos

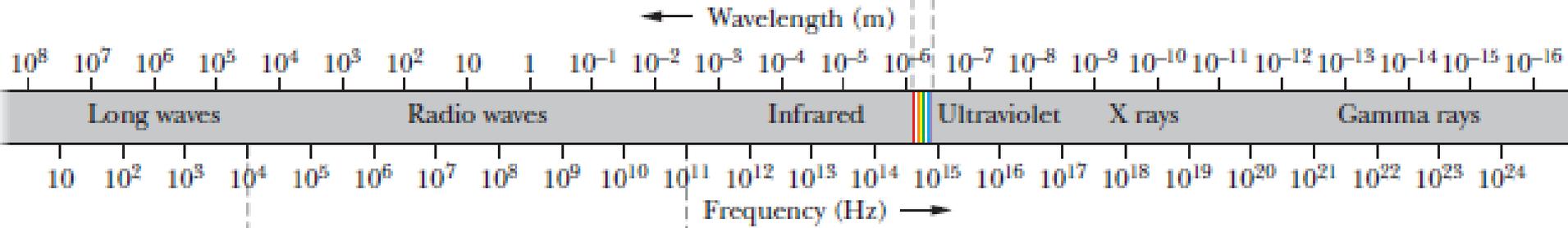
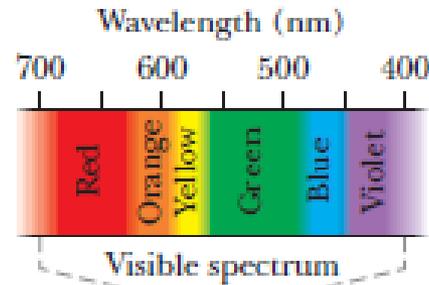


Frentes de onda planos

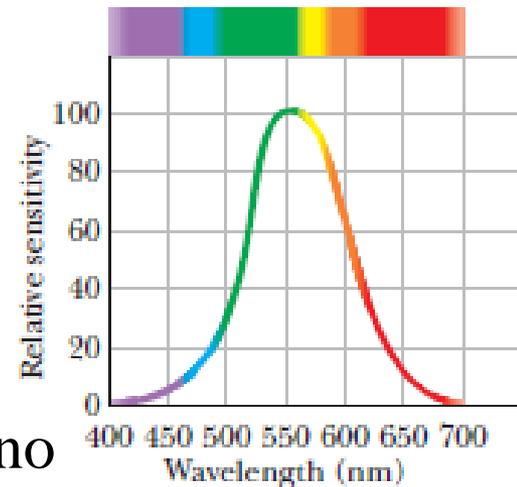


ondas electromagnéticas: espectro

Dentro del espectro electromagnético, las ondas difieren solo en longitud de onda, λ , y frecuencia, f , siguiendo $c = \lambda f$.



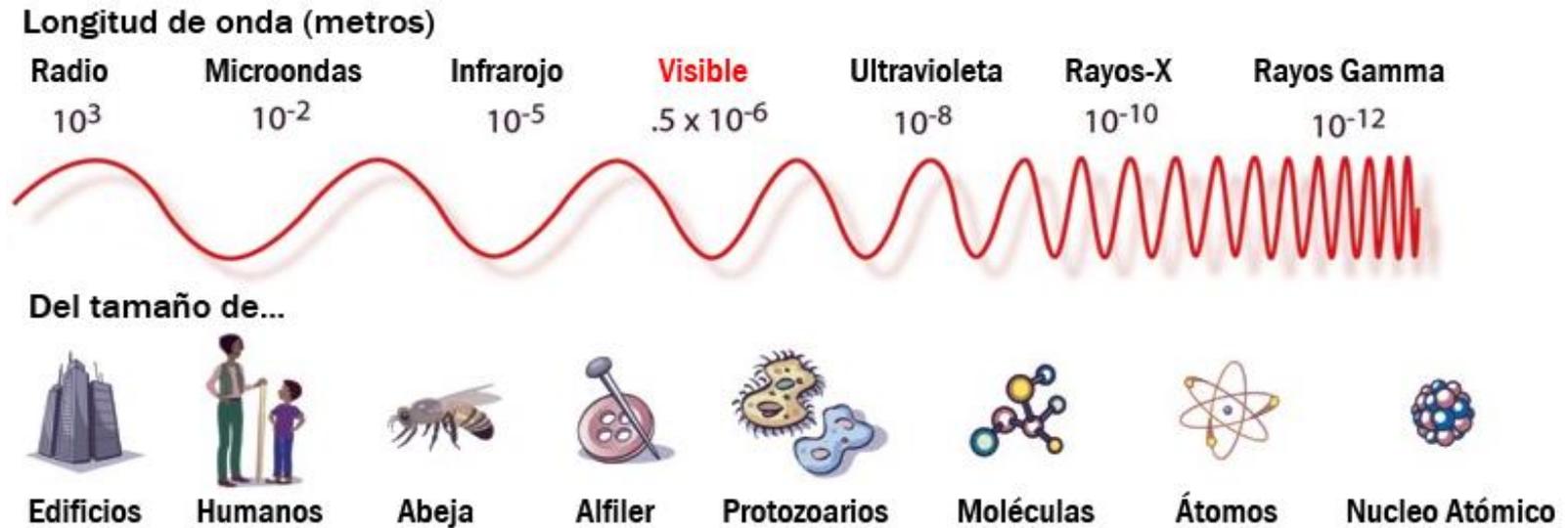
Dentro del espectro electromagnético, distintas regiones tienen distintos usos, en particular el ojo humano es sensible a la región de longitudes de onda entre ≈ 400 y ≈ 700 nm.



ojo humano

ondas electromagnéticas

El comportamiento de las OEM depende fuertemente de la relación entre la longitud de onda y el tamaño del objeto con el cual se encuentran. También la frecuencia de vibración está relacionado con la interacción con la materia.



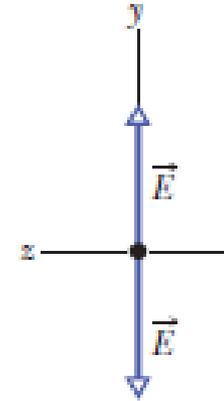
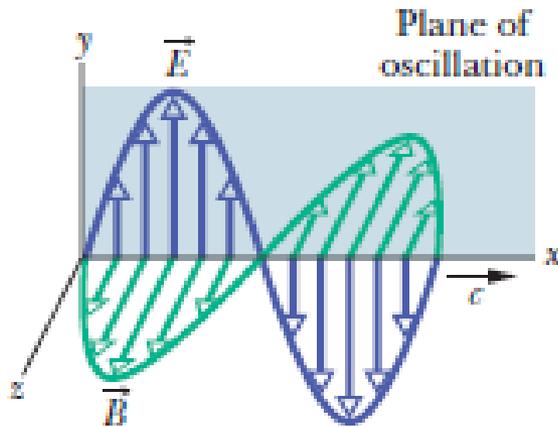
La longitud de onda de las OEM del visible es mucho menor que el tamaño de los objetos macroscópicos y la aproximación de rayo de luz en la óptica geométrica es válida y útil.

Cuando la longitud de onda de las OEM es del tamaño de los objetos aparecen fenómenos como interferencia y difracción de ondas, en la óptica física.

polarización

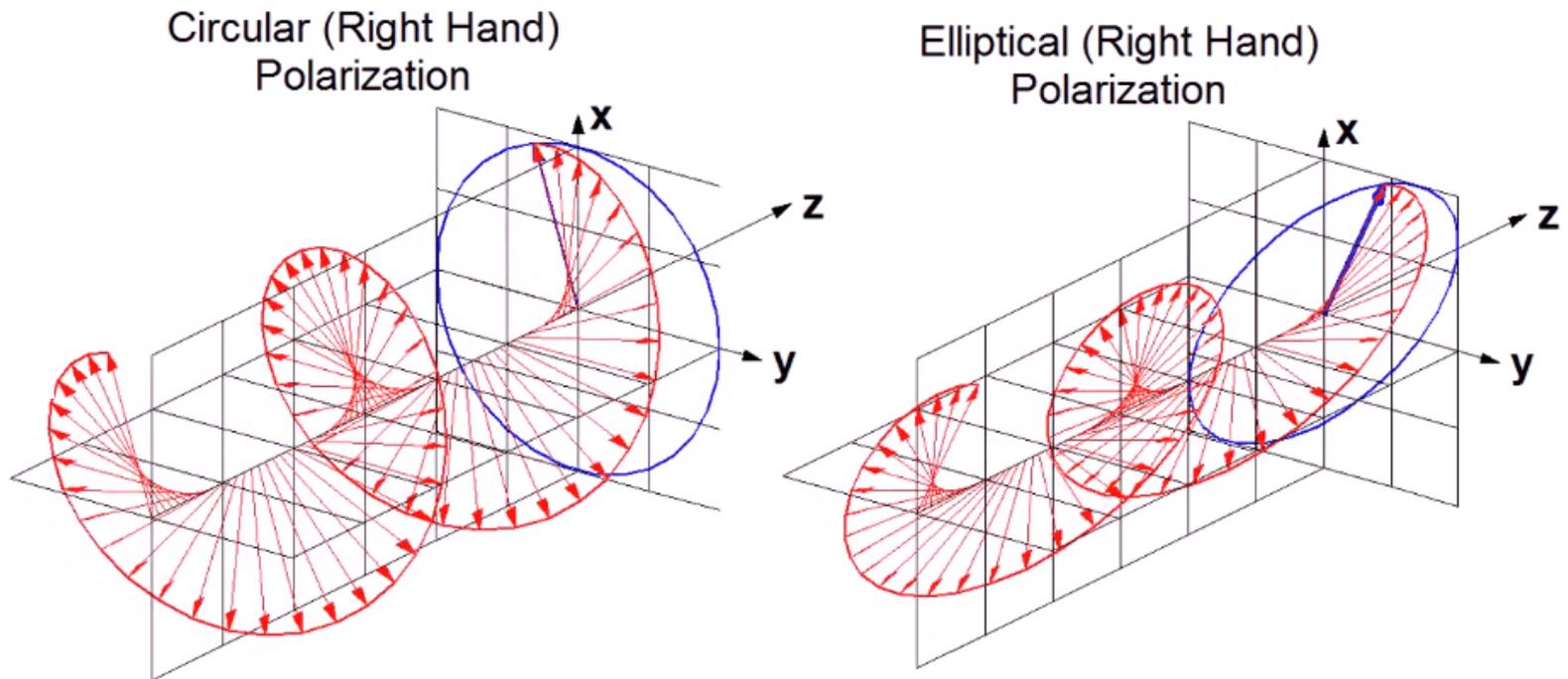
La polarización es una característica de todas las ondas transversales

Una OEM está polarizada linealmente si el vector de campo eléctrico E oscila en un plano, llamado plano de oscilación.



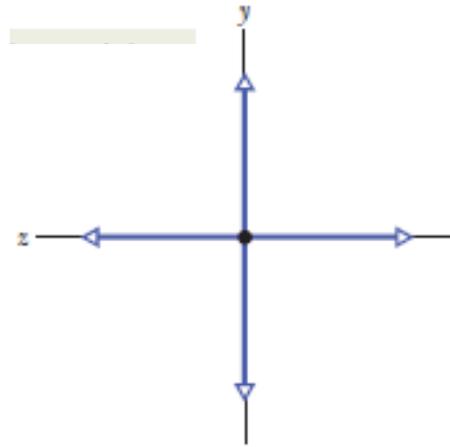
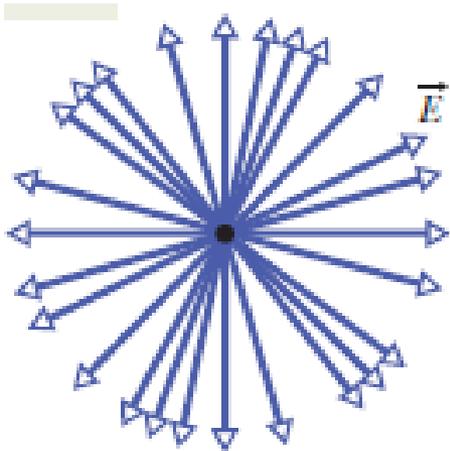
polarización

Una OEM está polarizada circular o elípticamente si el vector \mathbf{E} describe un círculo o una elipse en el plano perpendicular a la dirección de propagación



polarización

Una OEM no polarizada o con polarización al azar (random): el vector de campo eléctrico E oscila en cualquier plano al azar.

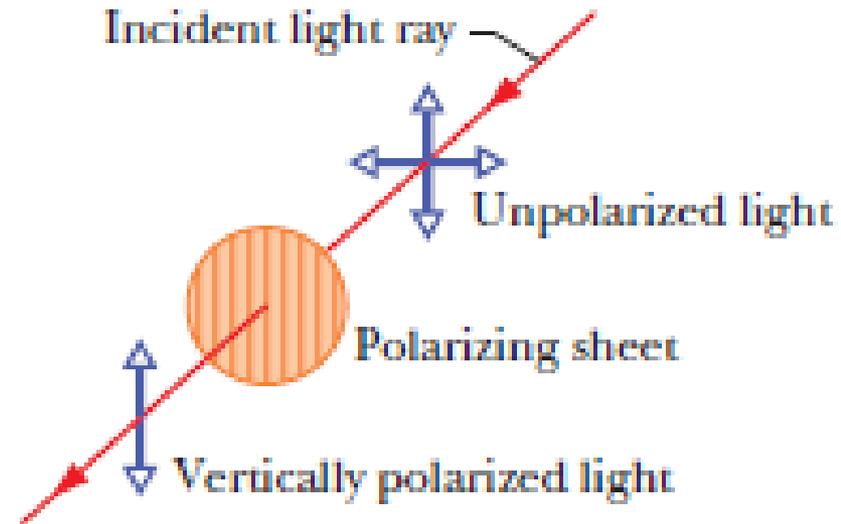


Existen cuatro fenómenos que pueden producir una OEM polarizada a partir de una OEM no polarizada: absorción, reflexión, dispersión o scattering y birrefringencia

polarización

Es posible transformar luz no polarizada en luz polarizada utilizando un polarizador.

El polarizador deja pasar el campo eléctrico en cierta dirección llamada eje de transmisión y absorbe las demás componentes del campo.



Partiendo de luz no polarizada, si el polarizador deja pasar la componente y del campo eléctrico y absorbe la componente z , la intensidad de la OEM emergente es

$$I = \frac{1}{2} I_0 \text{ donde } I_0 \text{ es la intensidad de la OEM incidente}$$

polarización

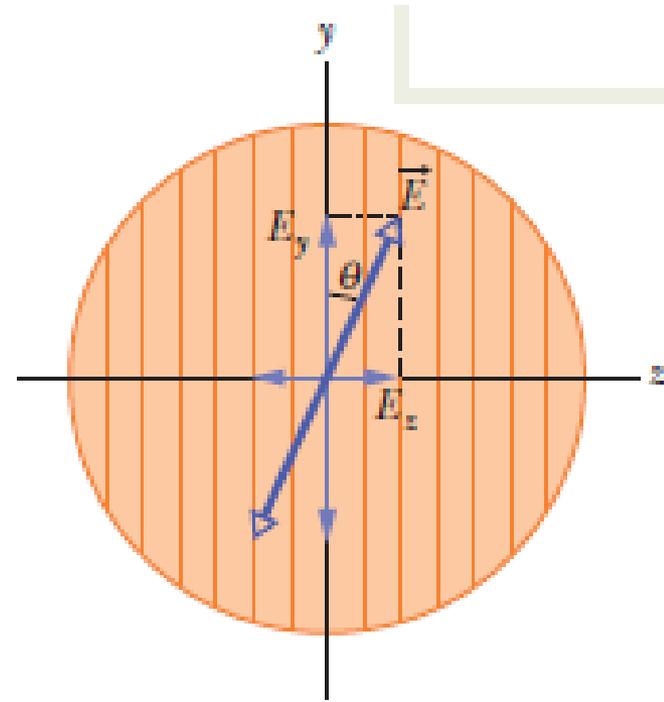
Sea la OEM incidente con intensidad I_0 que ya está polarizada con campo eléctrico \mathbf{E} y con un ángulo θ respecto al polarizador

La componente no absorbida del campo eléctrico \mathbf{E} es $E_y = E \cos \theta$

La intensidad de la OEM transmitida por el polarizador es $I = I_0 \cos^2 \theta$ (ley de Malus)

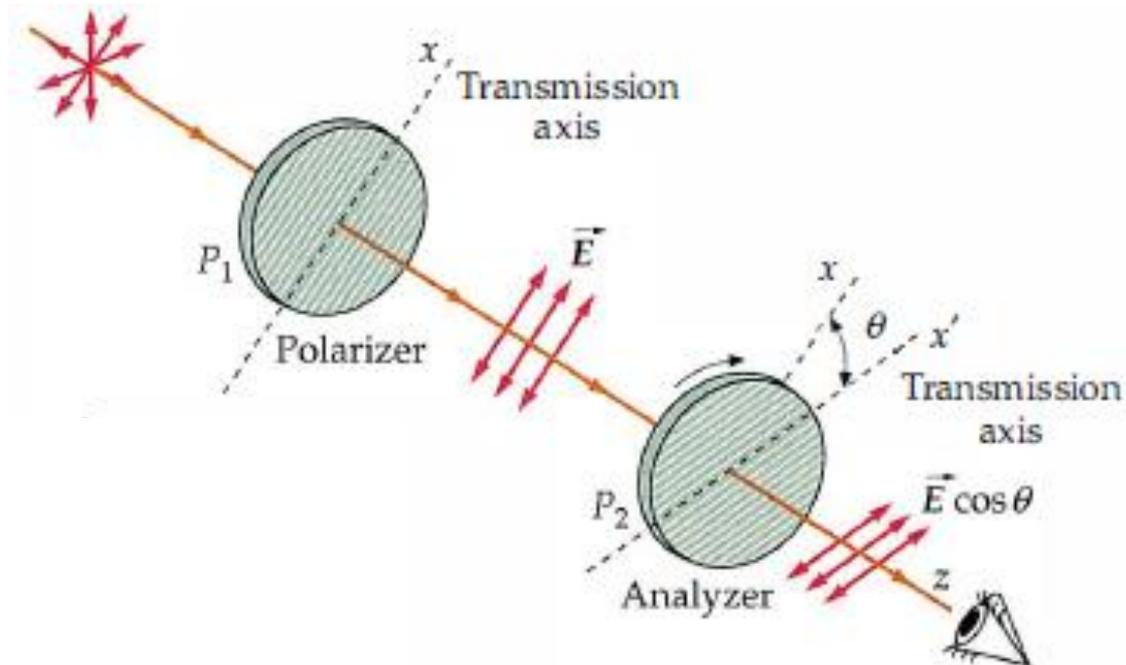
La intensidad de la OEM transmitida por el polarizador es I_0 si la polarización de la OEM incidente es paralela a la dirección del polarizador ($\theta = 0^\circ$ o 180°).

La intensidad de la OEM transmitida es cero si la polarización de la OEM incidente es perpendicular a la dirección del polarizador, $\theta = 90^\circ$.



polarización

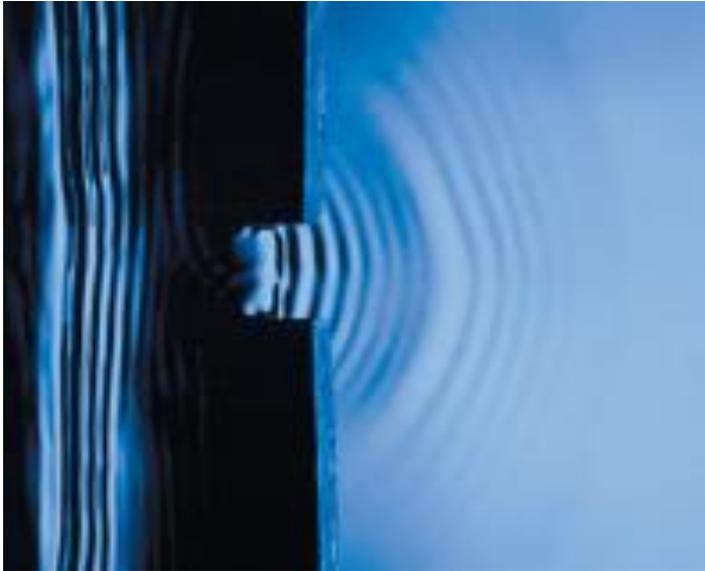
Cuando se utilizan dos polarizadores seguidos al primero se lo llama polarizador y al segundo analizador



Si los ejes de transmisión del polarizador y el analizador son perpendiculares la intensidad de la luz saliente es nula

interferencia y difracción

Interferencia y difracción son fenómenos importantes que diferencian ondas o fenómenos ondulatorios de partículas y trayectorias rectilíneas.



Difracción es el fenómeno en el cual la onda ‘se abre’ o se ‘desparrama’ cuando el frente de onda se encuentra con un obstáculo del tamaño de la longitud de onda.

Interferencia es la combinación por superposición de ondas que se encuentran en un punto del espacio.

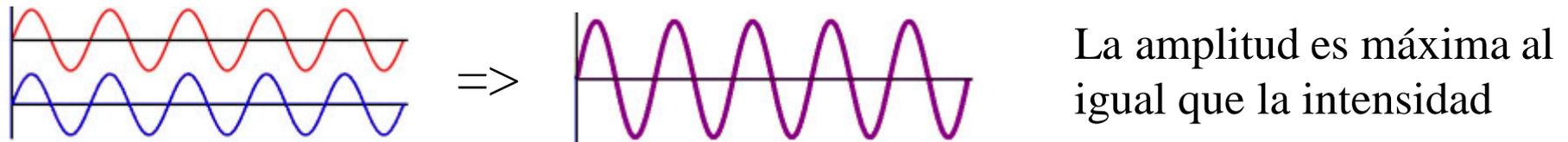
Cuando dos o mas OEM se solapan en algún punto y momento, los campos resultantes son la suma de los campos de cada OEM como si estuvieran solas



interferencia

Cuando dos ondas armónicas que tienen las mismas frecuencias y longitudes de onda pero diferente fase se combinan, la amplitud de la onda resultante depende de la diferencia de fase. Onda monocromática tiene una sola frecuencia.

Si la diferencia de fase cuando las ondas se solapan es cero o un número entero de veces 360° , las ondas están en fase y la interferencia es constructiva



La amplitud es máxima al igual que la intensidad

Si la diferencia de fase entre las ondas que se solapan es un número entero de veces 180° , las ondas están fuera de fase y la interferencia es destructiva



La amplitud es nula al igual que la intensidad

interferencia

Dos fuentes de ondas monocromáticas de igual frecuencia y con una relación de fase constante (no necesariamente en fase) se dice que son coherentes y generan ondas coherentes

Luz coherente

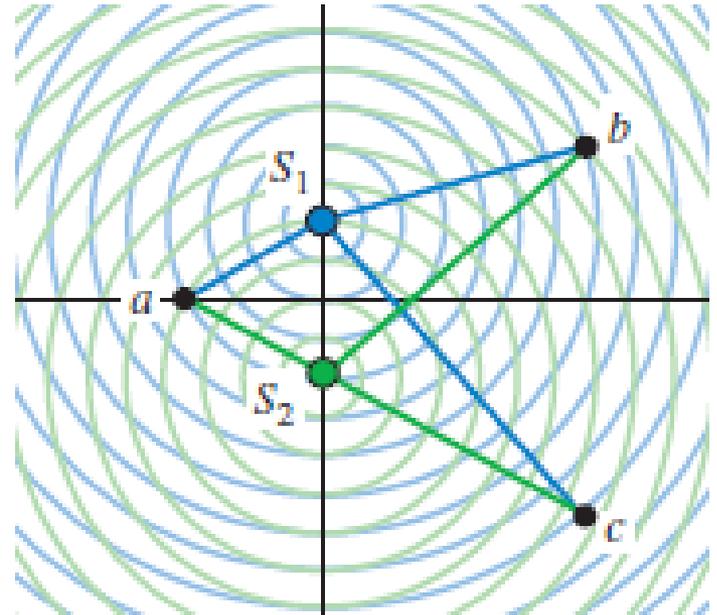


Luz no coherente



S_1 y S_2 son dos fuentes idénticas que emiten ondas con igual amplitud y longitud de onda (no de colores verde y azul), siempre en fase, con la misma polarización y monocromáticas

Las ondas llegan en fase a a , y la amplitud es el doble de la de las ondas individuales



interferencia

Como se compara la diferencia de longitud de camino entre ondas, Δr , con la longitud de onda λ para interferencia constructiva

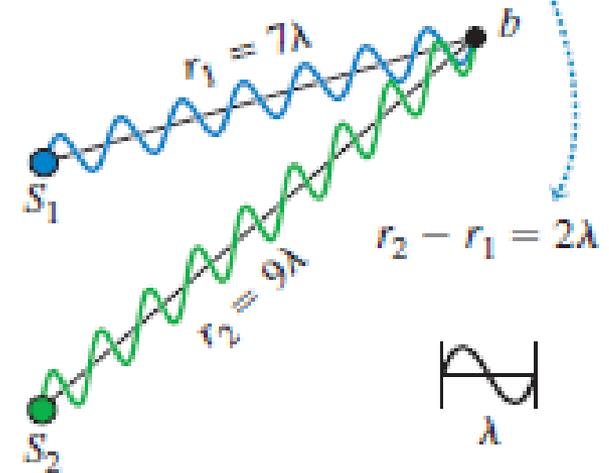
$$\frac{\Delta r}{\lambda} = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

=> interferencia constructiva

Una diferencia de fase, δ , entre dos ondas es a veces consecuencia de una diferencia de longitud de camino entre ondas, Δr

$$\delta = \frac{\Delta r}{\lambda} 2\pi = \frac{\Delta r}{\lambda} 360^\circ \Rightarrow \delta = m 360^\circ \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Conditions for constructive interference:
Waves interfere constructively if their path lengths differ by an integral number of wavelengths: $r_2 - r_1 = m\lambda$.



interferencia

Una diferencia de longitud de camino entre ondas, Δr , para interferencia destructiva

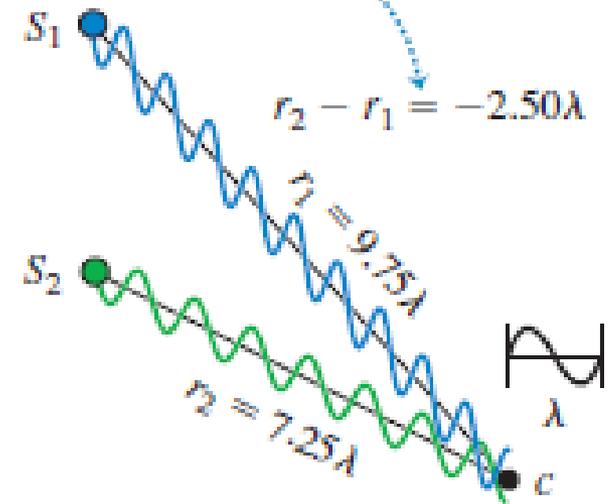
$$\frac{\Delta r}{\lambda} = \pm\frac{1}{2}, \pm\frac{3}{2}, \pm\frac{5}{2} \dots \Rightarrow \text{interferencia destructiva}$$

la diferencia de fase, δ

$$\delta = \frac{\Delta r}{\lambda} 2\pi = \frac{\Delta r}{\lambda} 360^\circ$$

$$\Rightarrow \delta = \left(m + \frac{1}{2}\right) 360^\circ \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Conditions for destructive interference:
Waves interfere destructively if their path lengths differ by a half-integral number of wavelengths: $r_2 - r_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$.



interferencia por doble rendija

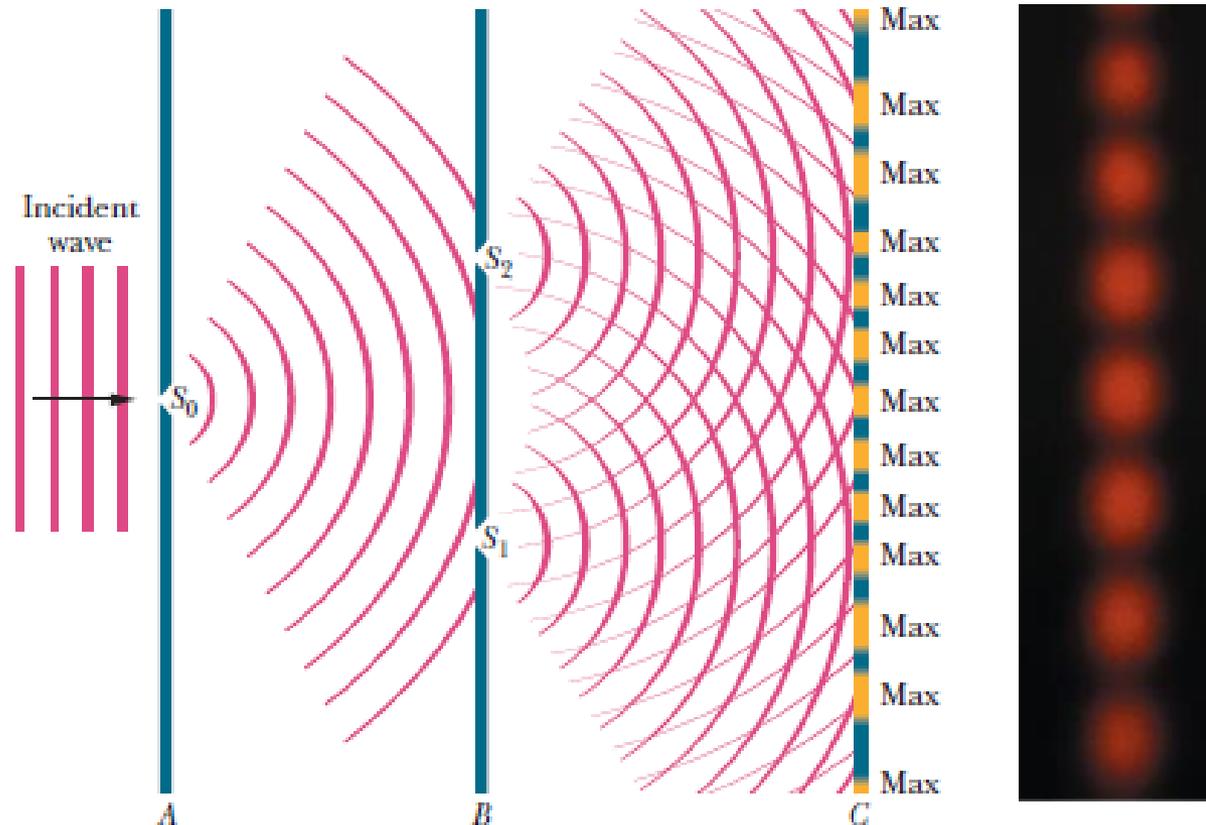
Experimento de interferencia de Young: en 1801 prueba que la luz es un fenómeno ondulatorio. Esto es contrario al pensamiento histórico.

Luz monocromática distante incide sobre la pantalla *A*.

S_0 es la fuente para iluminar las rendijas S_1 y S_2 en *B*.

Las ondas que llegan a S_1 y S_2 están en fase

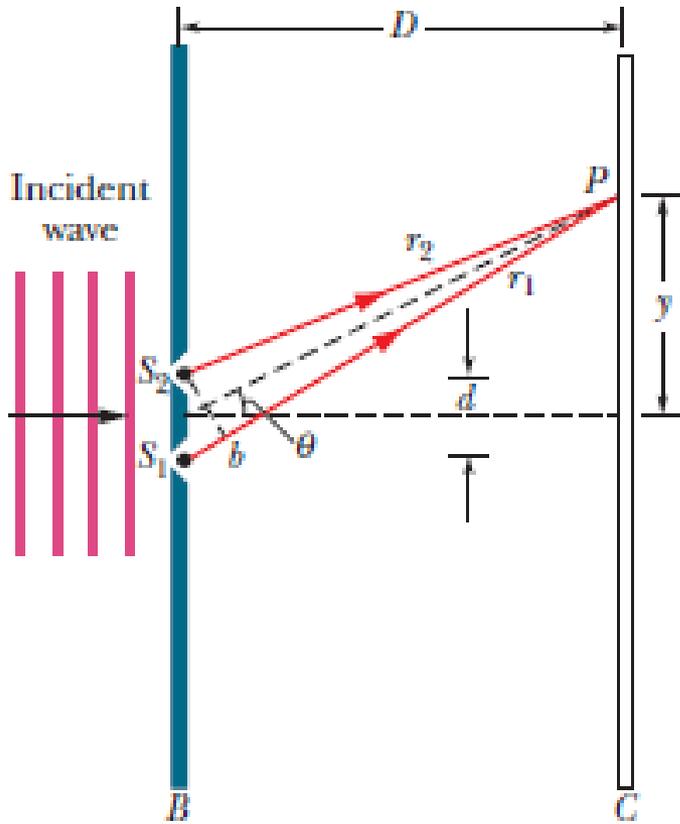
S_1 y S_2 en *B* son las fuentes para iluminar la pantalla *C* donde se genera el patrón de interferencia



S_1 y S_2 son fuentes coherentes ya que mantienen la diferencia de fase ($\varphi=0$)

Franjas iluminadas y oscuras aparecen sobre la pantalla *C*

interferencia por doble rendija

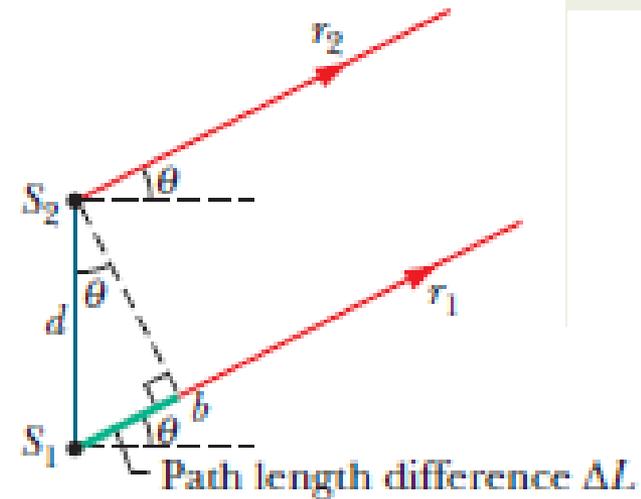


Una onda plana de luz monocromática incide sobre S_1 y S_2 en B . La difracción en estas rendijas produce un patrón de interferencia en C

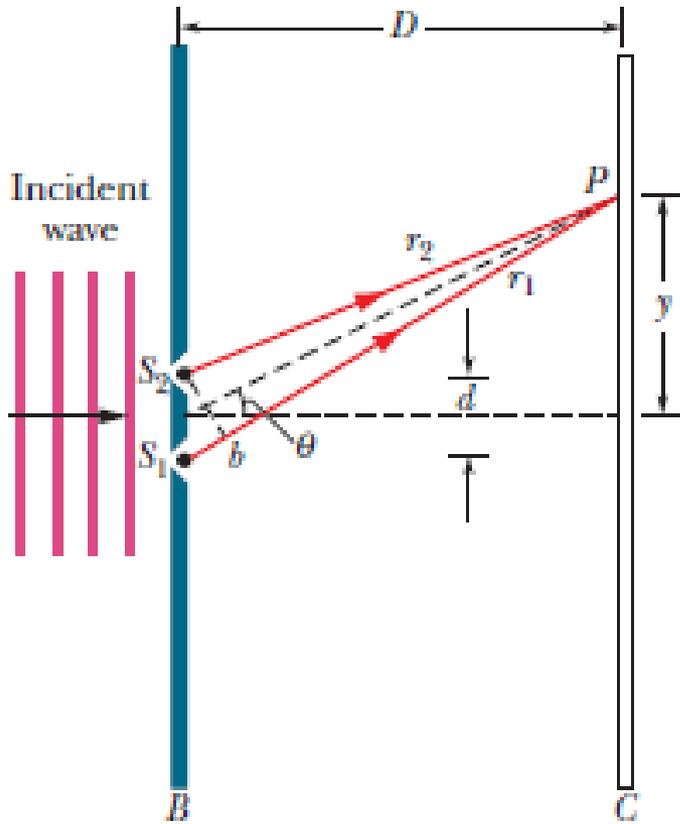
Si la separación entre pantallas, D , es mucho mayor que la separación entre rendijas, d

Los rayos r_1 y r_2 son casi paralelos y subtenden un ángulo θ con el eje central

Qué tipo de interferencia ocurre en P a un ángulo θ respecto al eje central, debido a las ondas provenientes de S_1 y S_2 ?



interferencia por doble rendija

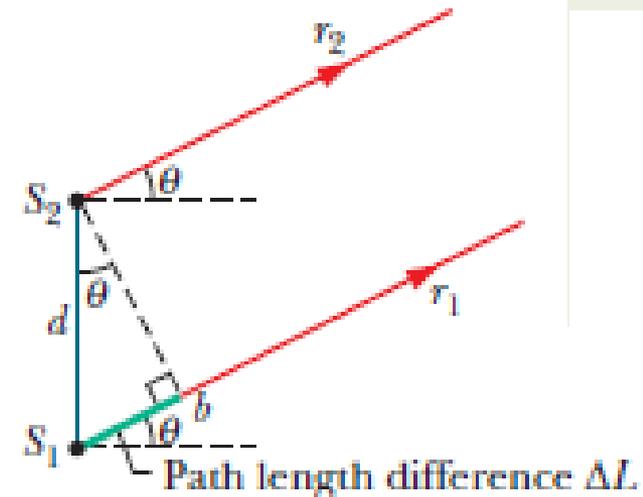


Las ondas están en fase en B pero hay una diferencia de camino, ΔL , hasta P

Si la diferencia de camino, ΔL , es un número entero de longitudes de onda, en P hay interferencia constructiva.

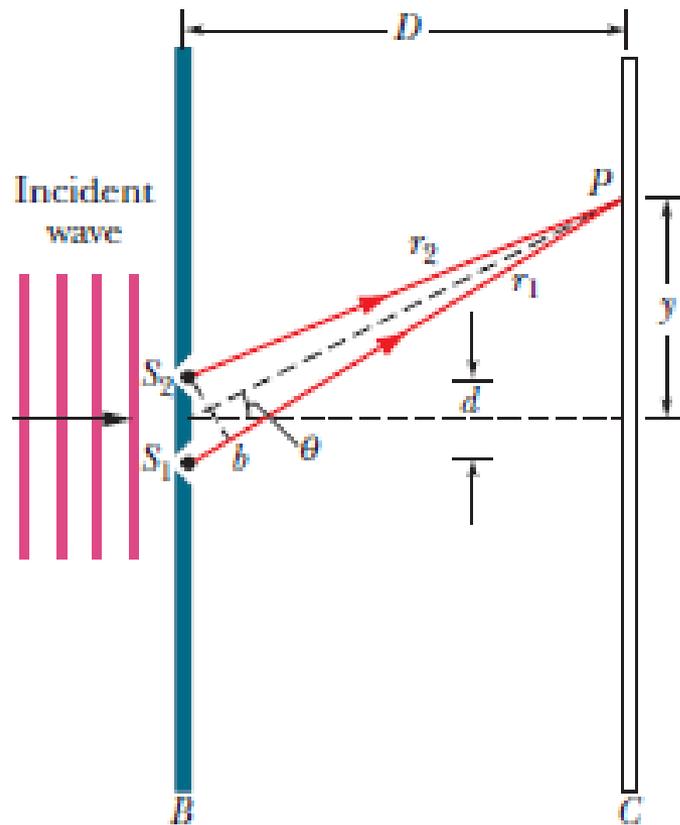
Si la diferencia de camino, ΔL , es un número semientero de longitudes de onda, en P hay interferencia destructiva.

Entre máximos y mínimos hay un rango de diferencias de camino, ΔL , que genera franjas de interferencia



interferencia por doble rendija

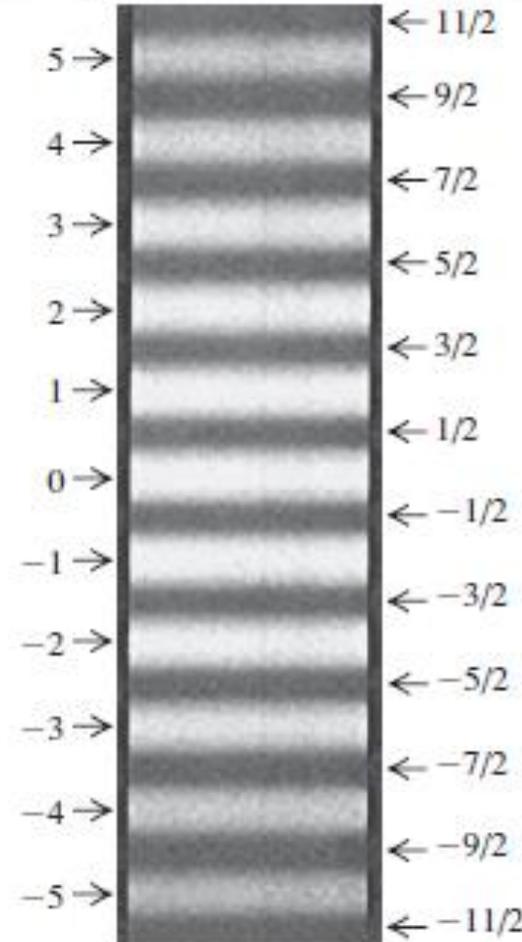
franjas iluminadas en C
alrededor de los máximos,
interferencia constructiva



$$d \sin \theta = m \lambda$$

m
(constructive
interference,
bright regions)

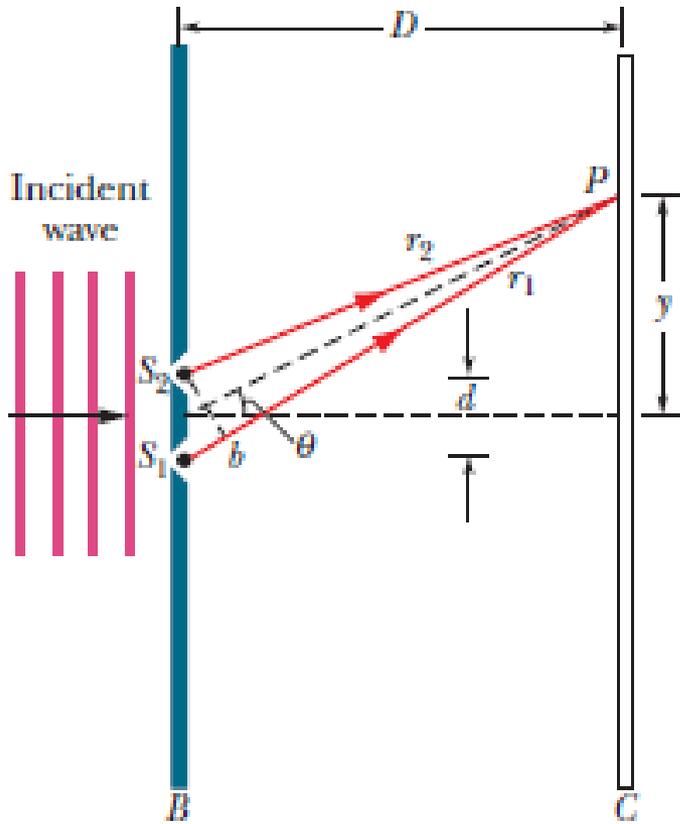
$m + 1/2$
(destructive
interference,
dark regions)



$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

franjas oscura en C
alrededor de los
mínimos, interferencia
destruktiva

interferencia por doble rendija



Para que exista el patrón de interferencia, la luz debe ser coherente, la diferencia de fase de las ondas que pasan por S_1 y S_2 debe ser constante

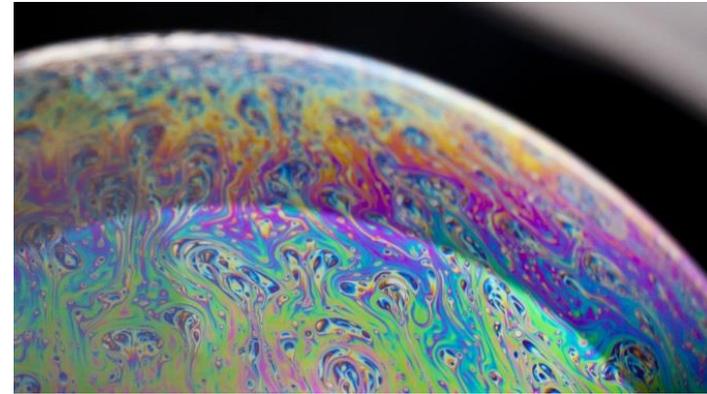
Para calcular expresiones para la posición de los máximos, $y = y_{\max}$, el ángulo θ es pequeño y aproximamos $\text{tg } \theta \approx \text{sen } \theta \approx \theta$ (rad)

$$\text{tg } \theta \approx \theta \approx \frac{y}{D} \quad \text{además} \quad \text{sen } \theta \approx \theta \approx \frac{m \lambda}{d}$$

$$y_{\max} = \frac{m D \lambda}{d} \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ máximos, interferencia constructiva}$$

interferencia en películas delgadas

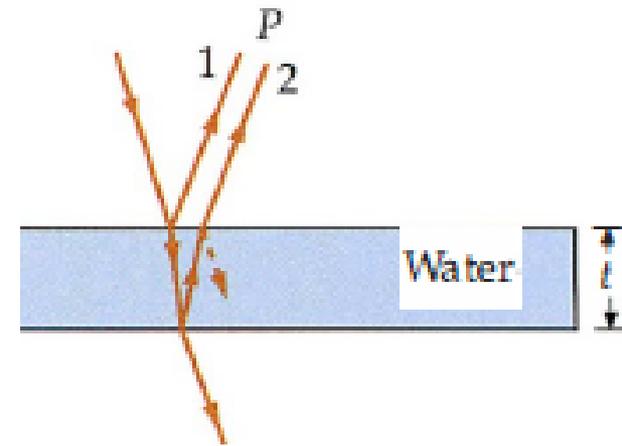
Los colores en las burbujas de jabón y en las películas de aceite sobre agua son debidas a la interferencia de luz blanca en las dos superficies que limitan la película delgada. Los colores surgen de la variación del espesor de la película delgada.



Incidencia casi normal de luz monocromática.

Reflexión a pequeños ángulos de los rayos 1 y 2 que llegan al punto P .

Interferencia constructiva en P si las ondas representadas por los rayos 1 y 2 llegan en fase. Interferencia destructiva si llegan desfasadas en media longitud de onda



El espesor de la película es t y la diferencia de camino entre las ondas representadas por los rayos 1 y 2 es $2t$.

Una onda viaja en un medio de menor índice de refracción que el del medio en el que incide, entonces la onda reflejada está desfasada de la incidente en media longitud de onda

interferencia en películas delgadas

La diferencia de camino genera una diferencia de fase $\delta = \frac{2t}{\lambda_n} 360^\circ$, donde $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ es la longitud de onda de la luz en la película delgada cuyo índice de refracción es n .

ej 1- película de agua en aire.

$n_{\text{aire}} < n_{\text{agua}} \Rightarrow$ la luz reflejada en el agua está desfasada en $\frac{\lambda}{2}$

interferencia constructiva en P si $2t = (m + \frac{1}{2}) \lambda_{\text{agua}}$, $m = 1, 2, \dots$

interferencia destructiva en P si $2t = m \lambda_{\text{agua}}$, $m = 1, 2, \dots$

P

aire

t { agua

aire

ej 2- película de agua entre aire y vidrio.

$n_{\text{aire}} < n_{\text{agua}}$ y $n_{\text{agua}} < n_{\text{vidrio}} \Rightarrow$ la luz reflejada en el agua y la luz reflejada en el vidrio están desfasadas en $\frac{\lambda}{2}$

interferencia constructiva en P si $2t = m \lambda_{\text{agua}}$, $m = 1, 2, \dots$

interferencia destructiva en P si $2t = (m + \frac{1}{2}) \lambda_{\text{agua}}$, $m = 1, 2, \dots$

P

aire

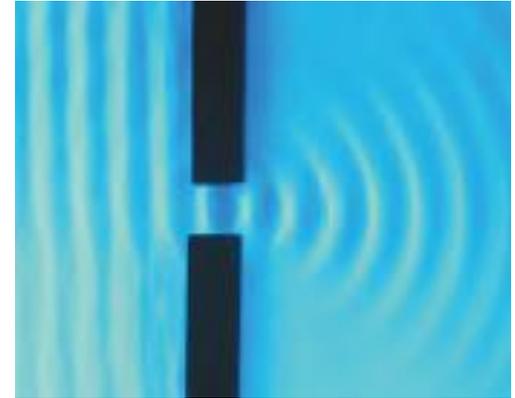
t { agua

vidrio

difracción

La difracción de una onda se produce si el frente de onda incide con un borde, obstáculo o abertura cuyo tamaño es comparable a la longitud de onda

Luz monocromática incide sobre una abertura de distintas formas y produce un patrón de difracción.

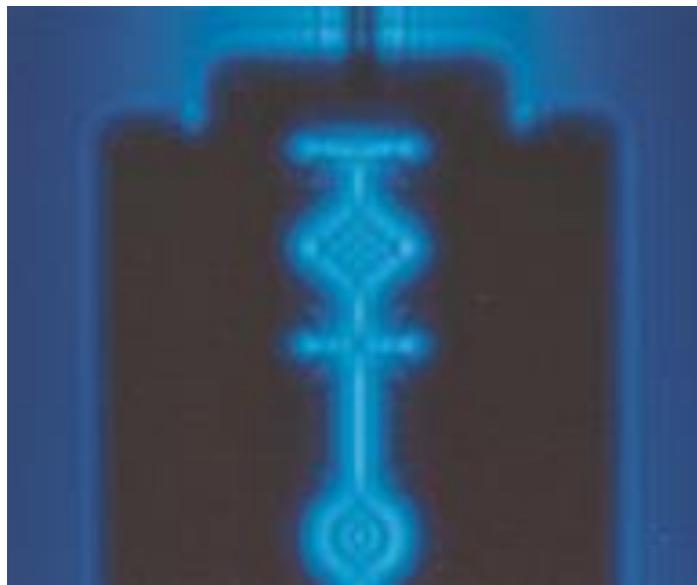


El patrón consiste en una zona central muy iluminada limitada por una zona oscura de interferencia destructiva, seguido de máximos secundarios, etc.

El patrón de difracción es consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz.

Se explica o describe dentro del modelo de la óptica física y está fuera del modelo de la óptica geométrica

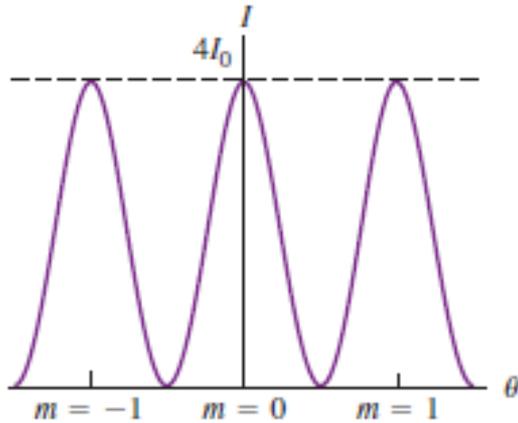
Se puede analizar la difracción dentro del principio de Huygens. Cada punto del frente de onda es emisor de ondas secundarias. El frente de onda más tarde se obtiene con la envolvente de las ondas secundarias



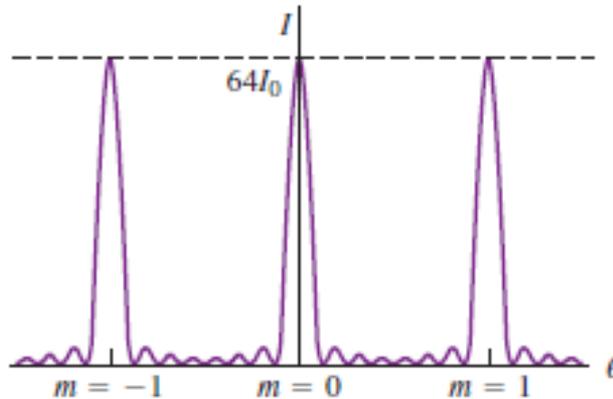
red de difracción

Patrones de interferencia generados por N rendijas muy angostas igualmente espaciadas

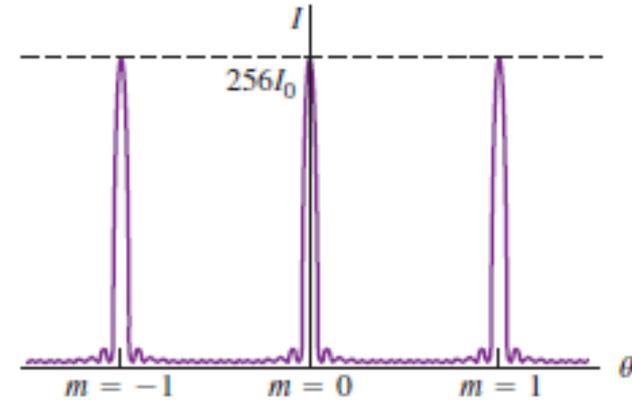
(a) $N = 2$: two slits produce one minimum between adjacent maxima.



(b) $N = 8$: eight slits produce taller, narrower maxima in the same locations, separated by seven minima.



(c) $N = 16$: with 16 slits, the maxima are even taller and narrower, with more intervening minima.



I_0 es la máxima intensidad para una rendija

La máxima intensidad para N rendijas es $N^2 I_0$ y el ancho es proporcional a $1/N$

Para N rendijas hay $N-1$ mínimos entre par de máximos principales

Los máximos secundarios se hacen mas pequeños cuando se incrementa N

red de difracción

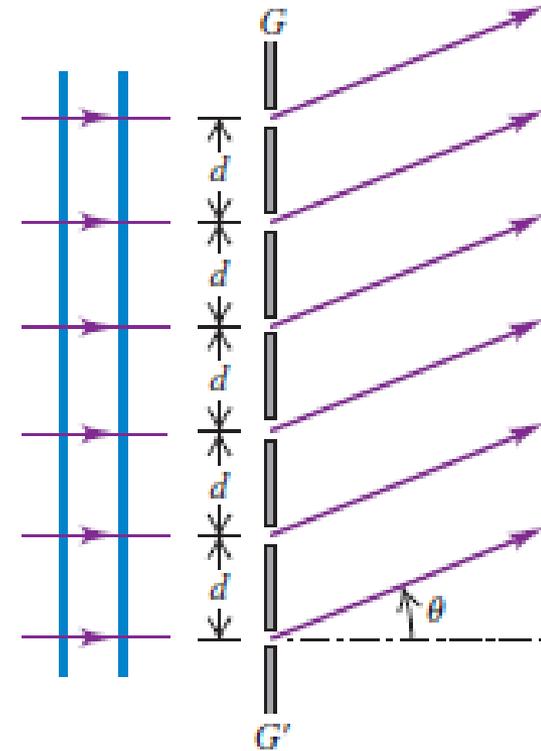
La interferencia por red de difracción forma franjas mucho mas angostas, líneas, que la interferencia de doble rendija

Una red de difracción puede tener cientos o miles de rendijas por centímetro

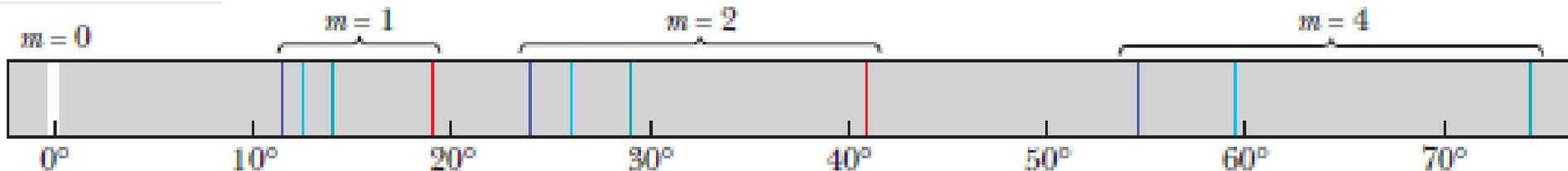
Trabajamos con condiciones de Fraunhofer

Utilizando procedimientos parecidos a los utilizados en interferencia de doble rendija, se encuentra que las líneas satisfacen

$$d \sin \theta = m \lambda \quad \text{con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, m = 1 \text{ línea de orden uno, etc.}$$

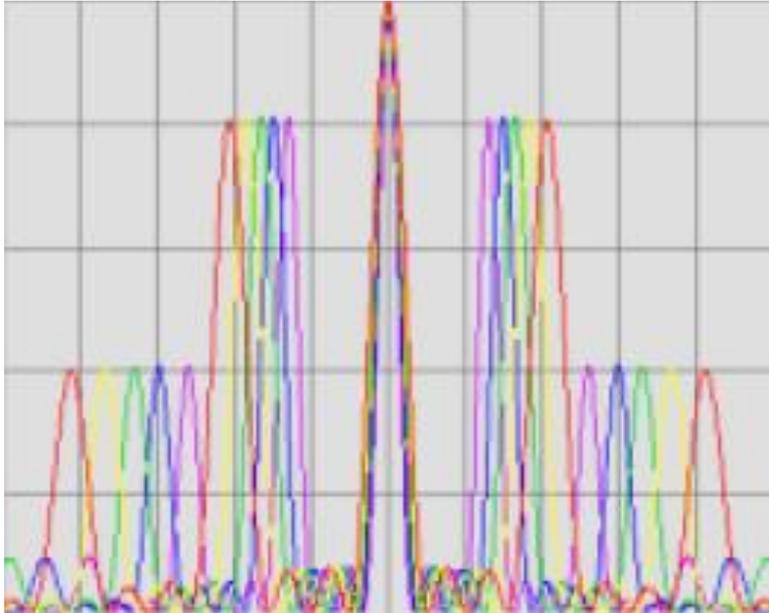


The zeroth, first, second, and fourth orders of the visible emission lines from hydrogen.1

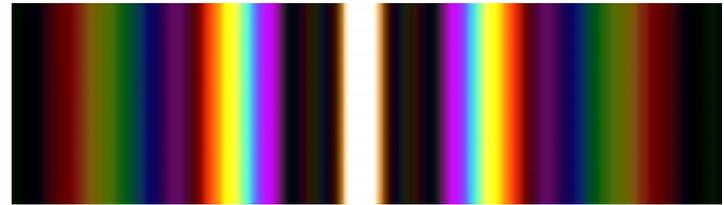


red de difracción

Ejemplo, simulación computacional de un espectro de luz blanca en una red de difracción



$d \sin \theta = m \lambda$ con $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,
 $m = 1$ máximos principales de orden uno,
etc.



Ejemplo, calcular el valor mínimo de los máximos principales m_v y m_r para que luz violeta y roja se desvíen con el mismo ángulo luego de que luz blanca incida sobre una red de difracción. ¿Es importante el valor de d ?

$$d \sin \theta_v = m_v \lambda_v$$

$$d \sin \theta_r = m_r \lambda_r$$

$$\theta_v = \theta_r$$

$$m_v \lambda_v = m_r \lambda_r$$

$$m_v 400 = m_r 700 \Rightarrow m_v = 7 \text{ y } m_r = 4$$