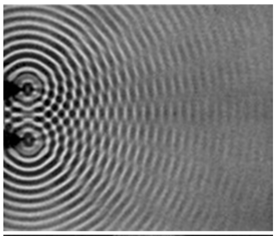
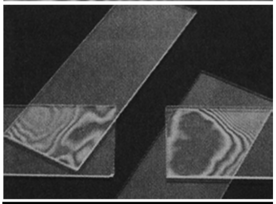
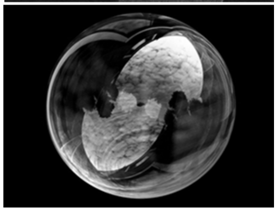
ÓPTICA FÍSICA

INTERFERENCIA







$$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda$$

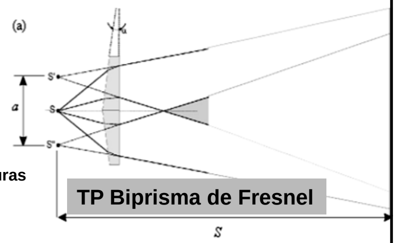
Interferencia constructiva, dos ranuras

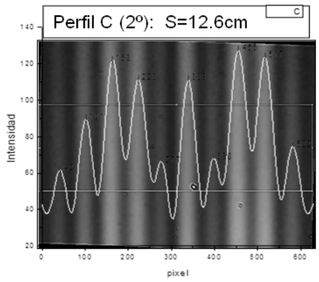
$$d \operatorname{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

Interferencia destructiva, dos ranuras

$$y_m = R\frac{m\lambda}{d}$$

$$I = 4I_0 \cos^2\tfrac{1}{2}\delta$$

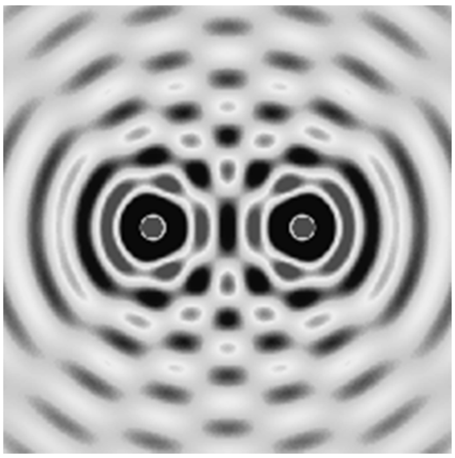




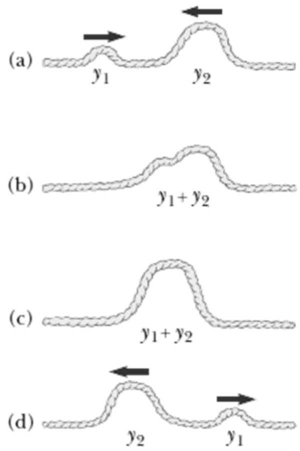
ÓPTICA FÍSICA: interferencia y difracción

La **interferencia** es la combinación por superposición de dos o más ondas que se encuentran en un punto del espacio.

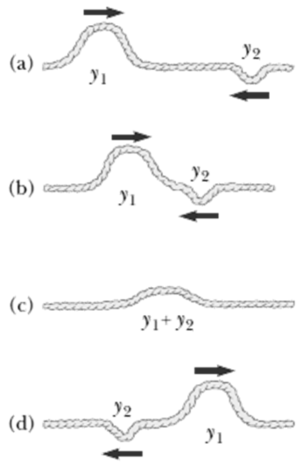
La **difracción** es la desviación que sufren las ondas alrededor de los bordes y esquinas cuando una porción de un frente de ondas se ve cortado o interrumpido por una barrera u obstáculo.



Superposición e interferencia



Dos pulsos que viajan en direcciones opuestas en una cuerda estirada pasan una a través de la otra. Cuando los pulsos se superponen, el desplazamiento neto de la cuerda es igual a la suma de los desplazamientos producidos por cada pulso. **Interferencia constructiva.**



Dos pulsos que viajan en direcciones opuestas en una cuerda estirada y tienen desplazamientos invertidos uno con respecto al otro. Cuando se superponen, sus desplazamientos se cancelan parcialmente uno a otro. **Interferencia destructiva.**

Superposición e interferencia

El principio de superposición establece lo siguiente:

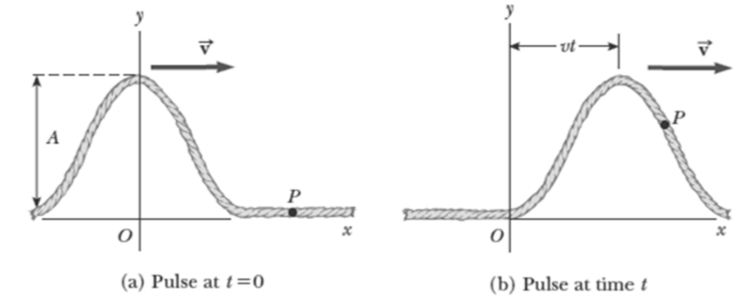
Cuando dos o más ondas se superponen, el desplazamiento resultante en cualquier punto y en cualquier instante se encuentra sumando los desplazamientos instantáneos que producirían en el punto las ondas individuales si cada una se presentara sola.

$$\boxed{y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)}$$

La combinación de ondas separadas en la misma región de espacio para producir una onda resultante se llama **interferencia**.

Pulsos de onda

repasamos conceptos



$$y(x, t) = f(x - vt)$$

$$y(x, t) = y(x - vt, 0)$$

Onda moviéndose en el sentido positivo de x

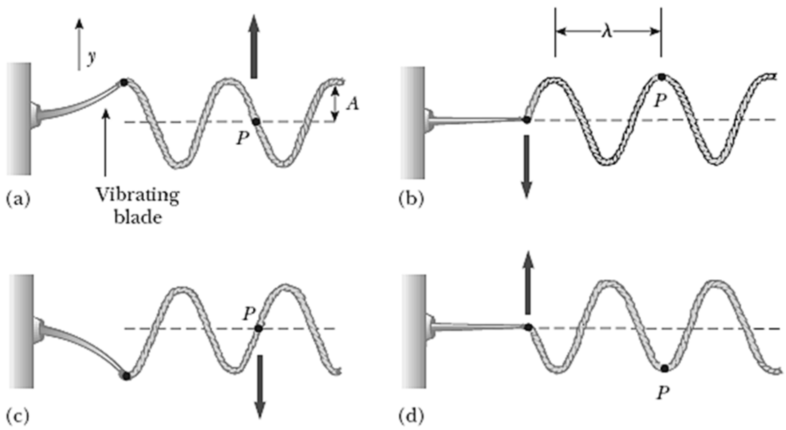
$$y(x, t) = f(x + vt)$$

Onda moviéndose en el sentido negativo de x

Ondas periódicas

repasamos conceptos

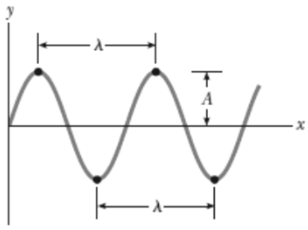
Si el extremo de una cuerda estirada se mueve de forma periódica hacia arriba y hacia abajo, se genera una onda periódica.



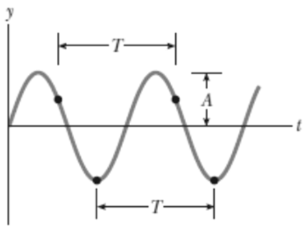
Ondas periódicas

repasamos conceptos

Si una onda periódica se mueve a lo largo de una cuerda estirada o en cualquier otro medio, cada punto del medio oscila con el mismo período.



(a)



(b)

λ, la longitud de onda es la distancia mínima entre dos puntos cualesquiera en ondas adyacentes.

T, el período es el intervalo de tiempo requerido para que dos puntos idénticos de ondas adyacentes pasen por un punto

f =1/T, Hz

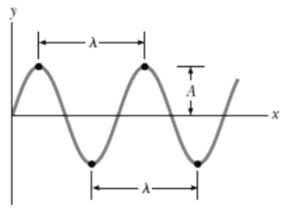
A, la amplitud de la onda es la máxima posición de un elemento del medio relativo a su posición de equilibrio

$v = \lambda f$ (onda periódica)

$$\boxed{y(x, t) = A \text{ sen} \left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]}$$

repasamos conceptos

Considerando la onda sinusoidal de la figura, que muestra la posición de la onda en *t=0*, se espera que la función de onda sea:



y(*x*, 0) = *A* sen *ax*

x = 0, *y*(0, 0)= *A* sen *a*(0) = 0

x = λ/2, *y*(λ/2, 0)= *A* sen (a λ/2)= 0

Para que esta ecuación sea cierta, debemos tener: *a*λ/2= π, o *a*= 2π/λ.

y (*x*, 0)=*A* sen [(2π/λ)*x*]

Si la onda se mueve hacia la derecha con una velocidad *v*, la función de onda en algún tiempo posterior *t* es:

$$y(x, t) = f(x - vt)$$

$$\boxed{y(x, t) = A \text{ sen} \left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]}$$

repasamos conceptos

$$\boxed{y(x,t) = A\,\text{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]}$$

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

$$y = A \sin\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

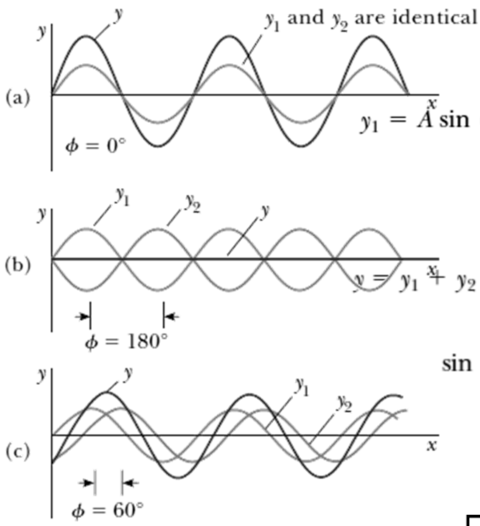
$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$ — *k*, número de onda — rad/m

$\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ — *ω*, frecuencia angular — rad/s

$$\boxed{y = A\,\textbf{sen}\,(kx - \omega t)}$$

Función de onda para una onda sinusoidal

Superposición e interferencia



onda resultante

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \qquad y_2 = A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

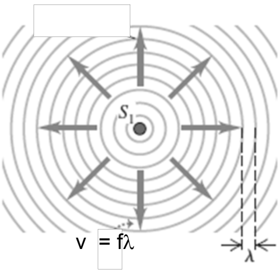
$$k = 2\pi/\lambda,\ \omega = 2\pi f,\ \ \phi$$

$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \phi)]$$

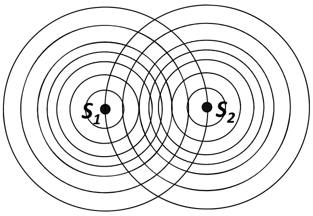
$$\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$\boxed{y = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)}$$

Interferencia en dos o tres dimensiones

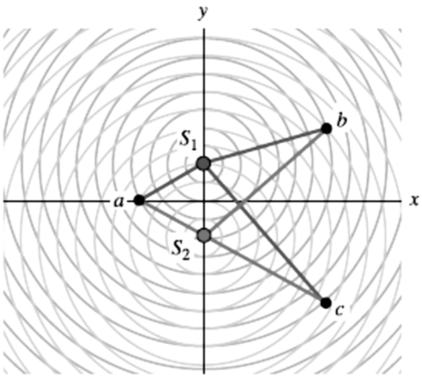


Una foto "instantánea" de ondas sinusoidales con frecuencia f y longitud de onda λ que se propagan en todas direcciones desde una fuente S_1.



Una foto "instantánea" de ondas sinusoidales que se propagan a partir de dos fuentes coherentes S_1 y S_2. Se dice que dos fuentes monocromáticas de la misma frecuencia y con una relación de fase constante definida son **coherentes**.

Dos fuentes de ondas coherentes separadas por una distancia 4 λ



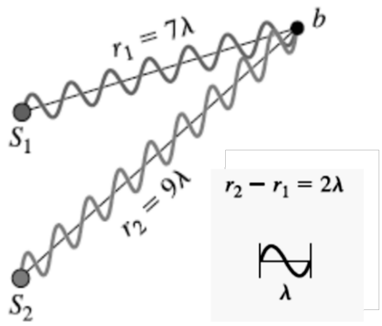
Considere un punto **a** en el eje x.

- las dos distancias de S_1 a **a** y de S_2 a **a** son iguales
- las ondas requieren tiempos iguales para viajar a **a**.
- las ondas que salen en fase de S_1 y S_2 llegan en fase a **a**

En general, cuando las ondas de dos o más fuentes llegan en fase a un punto, la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las ondas individuales; éstas se refuerzan una a la otra: **interferencia constructiva.**

a, m = 0
b, m = ± 2

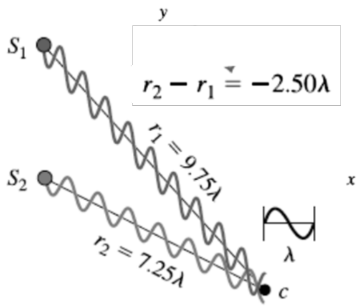
Sea r_1 la distancia que hay entre S_1 y cualquier punto P, y r_2 la distancia que hay entre S_2 y P. Para que en b ocurra la interferencia constructiva, la diferencia de las trayectorias (r_2 - r_1) para las dos fuentes debe ser un múltiplo entero de la longitud de onda λ:



(interferencia constructiva, fuentes en fase)

$\boxed{r_2 - r_1 = m\lambda \text{ (m = 0, ±1, ± 2, ± 3 …..)}}$

Algo diferente ocurre en el punto c, donde la diferencia de trayectorias, es la mitad de un número entero de longitudes de onda.



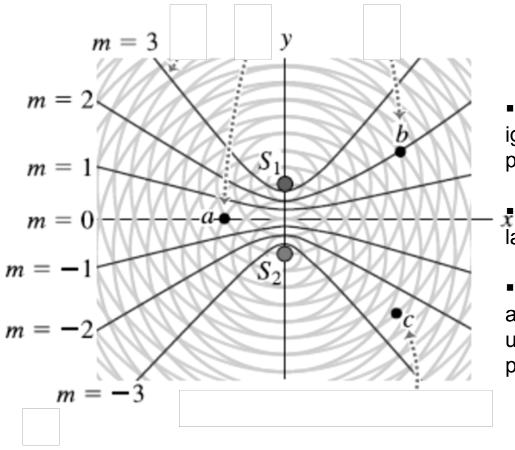
- las ondas provenientes de las dos fuentes llegan al punto **c** exactamente medio ciclo fuera de fase
- la cresta de una onda arriba al mismo tiempo que la cresta de una onda en sentido opuesto de la otra onda
- la amplitud resultante es la diferencia entre las dos amplitudes individuales.

Esta cancelación o anulación parcial de las ondas individuales recibe el nombre de **interferencia destructiva.**

$\boxed{r_2 - r_1 = (m + \tfrac{1}{2})\lambda \quad \text{(m = 0, ±1, ± 2, ± 3 …..)}}$

(interferencia destructiva, fuentes en fase) **m = -3**

$r_2 - r_1 = m\lambda$ (m = 0, ±1, ± 2, ± 3 …..)



- la diferencia de trayectorias r_2 -r_1 es igual a la longitud de onda multiplicada por un entero m, **curvas antinodales**
- la amplitud de la onda es máxima a lo largo de las curvas antinodales
- entre dos curvas antinodales adyacentes se presenta una curva nodal; una de tales curvas, pasa a través del punto **c**.

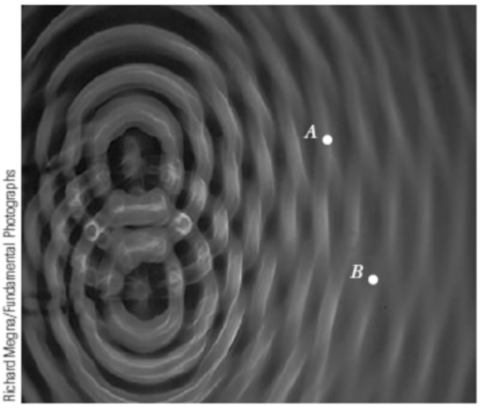
superficie

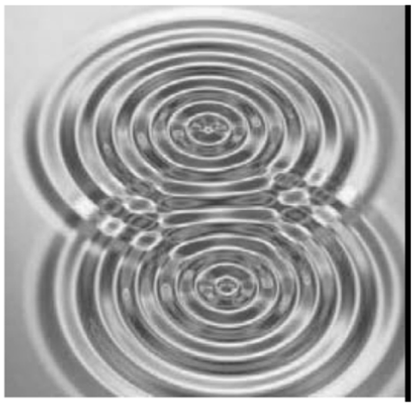
Condiciones para interferencia

- Las fuentes deben ser **coherentes**; es decir, deben mantener una fase constante
- las fuentes deben ser **monocromáticas**, es decir, ellas deberían ser de una longitud de onda

Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

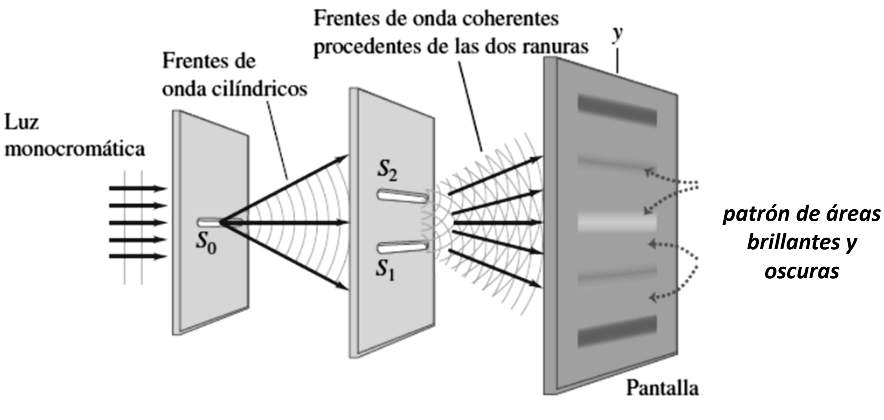
Los conceptos de interferencia constructiva y destructiva se aplican tanto a estas ondas en el agua como a las ondas luminosas y sonoras.





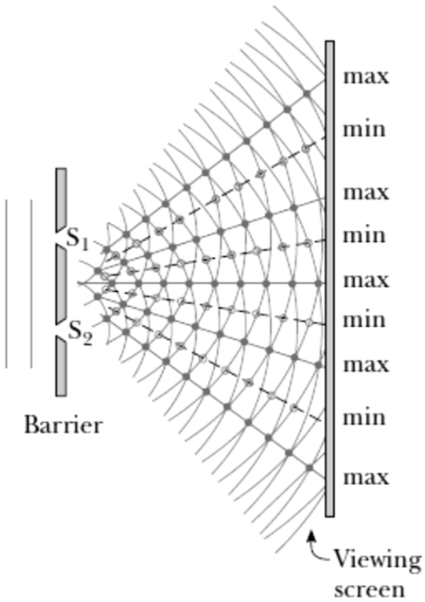
Experimento de Young

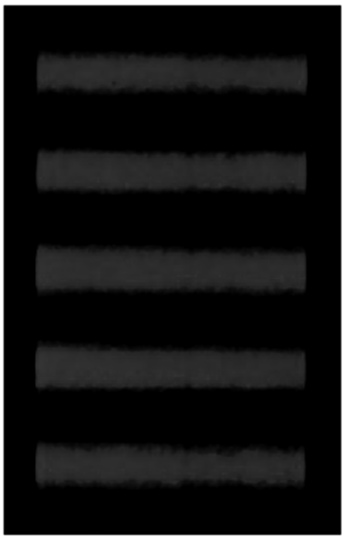
Uno de los primeros experimentos cuantitativos encaminados a poner de manifiesto la interferencia de la luz de dos fuentes estuvo a cargo del científico inglés Thomas Young en 1800.



Experimento de Young para demostrar la interferencia de la luz que pasa por dos ranuras. En la pantalla aparece un ***patrón de áreas brillantes y oscuras***

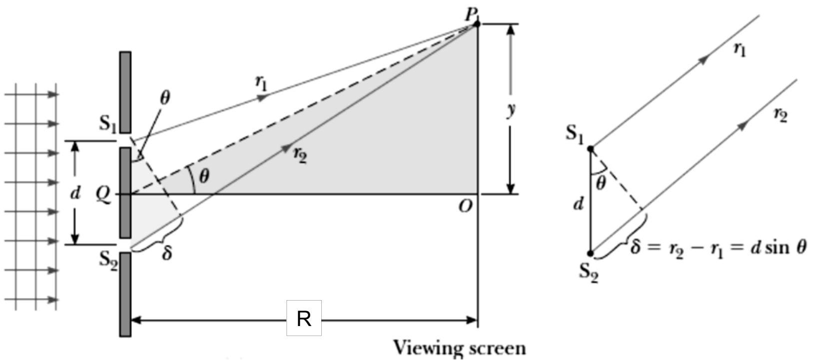
Experimento de Young para demostrar la interferencia de la luz que pasa por dos ranuras.





M. Cagnet, M. Franςon, J. C. Thrierr, *Atlas of Optical Phenomena*, Berlin, Springer-Verlag, 1962

Análisis geométrico del experimento de Young. Para el caso que se ilustra, $r_2 > r_1$ y tanto y como θ son positivos.



Geometría aproximada cuando la distancia R a la pantalla es mucho mayor que la distancia d entre las ranuras.

$$\boxed{r_2 - r_1 = d\,\mathrm{sen}\theta}$$

Interferencia constructiva y destructiva con dos ranuras

Vimos que la **interferencia constructiva** ocurre en aquellos puntos donde la diferencia de las trayectorias es un número entero de longitudes de onda, **m**λ, donde m = 0, ±1, ± 2, ± 3, . . . Por lo tanto, las regiones brillantes en la pantalla en el experimento de Young se presentan en ángulos θ en los que:

$$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda \qquad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

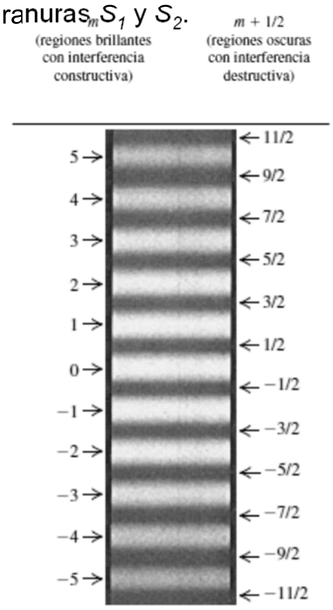
Interferencia constructiva, dos ranuras

De manera similar, ocurre la (**interferencia destructiva** que forma las regiones oscuras en la pantalla en los puntos para los que la diferencia de las trayectorias es la mitad de un número entero de longitudes de onda, **(m + ½)**λ:

$$d \operatorname{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Interferencia destructiva, dos ranuras

Así, el patrón en la pantalla del experimento de Young es una sucesión de bandas brillantes y oscuras, o **franjas de interferencia**, paralelas a las ranuras S_1 y S_2.



- el centro del patrón es una banda brillante que corresponde a m = 0
- las posiciones de los centros de las bandas brillantes

Sea y_m la distancia entre el centro del patrón (θ = 0) y el centro de la m-ésima banda brillante. Sea θ_m el valor correspondiente de θ; por lo tanto,

$$y_m = R \tan \theta_m$$

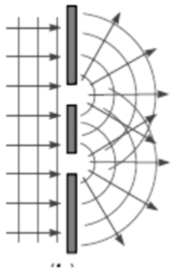
θ_m es muy pequeño

$$y_m = R \operatorname{sen} \theta_m$$

$$\boxed{y_m = R\frac{m\lambda}{d}}$$

interferencia constructiva en el experimento de Young

solamente para ángulos pequeños λ



▪ la distancia entre bandas brillantes adyacentes en el patrón es inversamente proporcional a la distancia d entre las ranuras.

▪ cuanto más cerca estén las ranuras, más disperso será el patrón.

▪ cuando las ranuras están muy separadas, las bandas del patrón están más próximas unas de otras.

RESUMEN

$$\delta = \boxed{r_2 - r_1 = d\,\mathrm{sen}\theta}$$

$$\boxed{d\,\mathrm{sen}\theta = m\lambda \qquad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)}$$

Interferencia constructiva, dos ranuras

$$\boxed{d\,\mathrm{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)}$$

Interferencia destructiva, dos ranuras

$$\boxed{y_m = R\frac{m\lambda}{d}}$$

interferencia constructiva en el experimento de Young

Cálculo de la intensidad

$$\boxed{y = 2A\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)}$$

- sean E_1 y E_2 , los campos eléctricos en un punto P de la pantalla generado por las ondas procedentes de las rendijas 1 y 2, respectivamente.
- los ángulos son muy pequeños, podemos suponer que los campos son paralelos
- ambos campos eléctricos oscilan con la misma frecuencia
- y poseen la misma amplitud
- la diferencia de fase δ $\qquad \delta = \frac{\Delta r}{\lambda}2\pi = \frac{d\sin\theta}{\lambda}2\pi$

Entonces,

$$E_1 = A_0\sin\omega t \qquad E_2 = A_0\sin(\omega t + \delta)$$

$$E = E_1 + E_2 = A_0\sin\omega t + A_0\sin(\omega t + \delta)$$

Utilizando la identidad,

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\cos\tfrac{1}{2}(\alpha - \beta)\sin\tfrac{1}{2}(\alpha + \beta)$$

la función de onda resultante es,

$$E = \left[2A_0\cos\tfrac{1}{2}\delta\right]\sin\left(\omega t + \tfrac{1}{2}\delta\right)$$

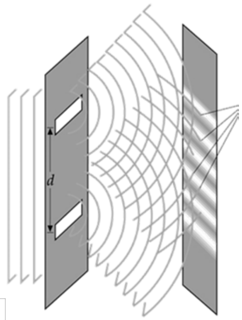
la función de onda resultante es,

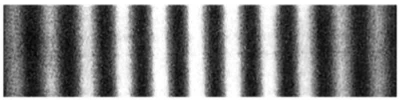
$$E = \left[2A_0\cos\tfrac{1}{2}\delta\right]\sin\left(\omega t + \tfrac{1}{2}\delta\right)$$

Por tanto,

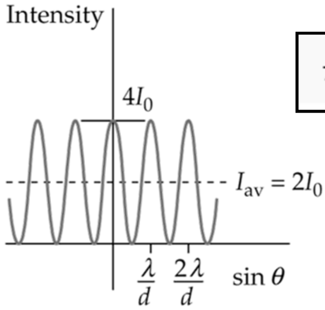
- la amplitud de la onda resultante es $\quad 2A_0\cos\tfrac{1}{2}\delta$
- la intensidad en el punto P es $\quad \boxed{I = 4I_0\cos^2\tfrac{1}{2}\delta}$

Intensidad en función de la diferencia de fase

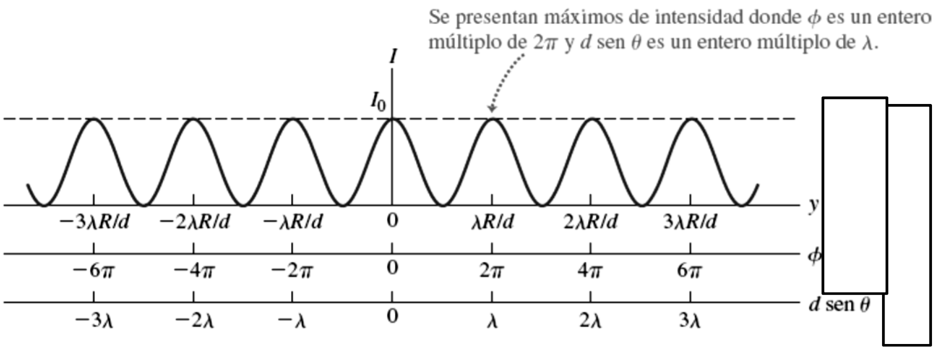




$$\boxed{I = 4I_0 \cos^2 \tfrac{1}{2}\delta}$$



$$\boxed{y_m = R\frac{m\lambda}{d}}$$



y = distancia de un punto en el patrón desde el centro ($y = 0$).

ϕ = diferencia de fase entre las dos ondas en cada punto del patrón.

d sen θ = diferencia de trayectoria desde las dos ranuras en cada punto en el patrón.

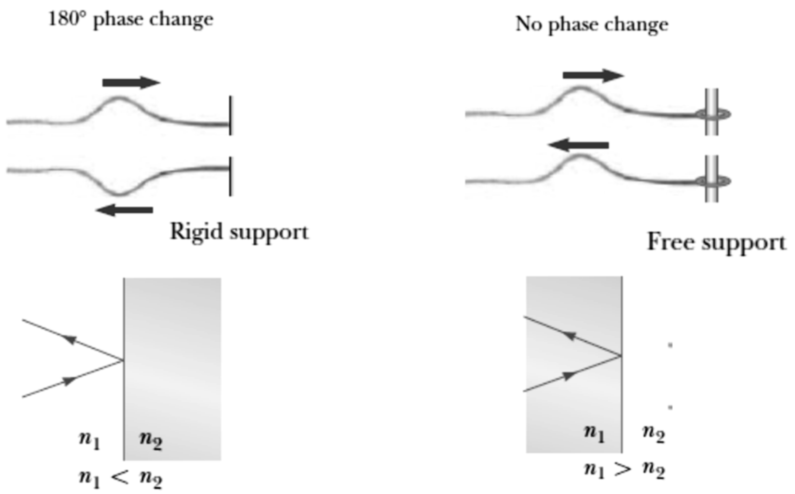
ÓPTICA FÍSICA: interferencia y difracción

La **interferencia** es la combinación por superposición de dos o más ondas que se encuentran en un punto del espacio.

Interferómetros

- por división del frente de ondas
  - interferómetro de Young
  - espejo de Lloyd
- por división de amplitud
  - películas delgadas

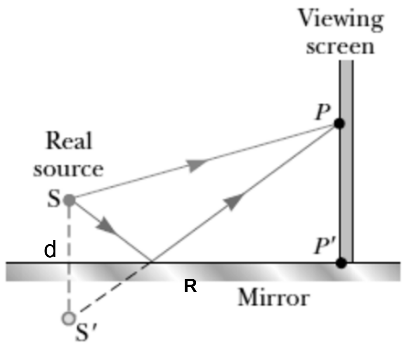
Espejo de Lloyd: cambio de fase debida a reflexión



Si la luz que se propaga en un medio incide en la superficie de otro medio en el que la velocidad de la luz es menor, se produce un cambio de fase de 180° en la luz reflejada.

[1] Developed in 1834 by Humphrey Lloyd (1800–1881), Professor of Natural and Experimental Philosophy, Trinity College, Dublin.

El patrón de interferencia se produce en el punto P en la pantalla como el resultado de la combinación de un rayo directo y un rayo reflejado. El rayo reflejado presenta un cambio de fase de 180°.

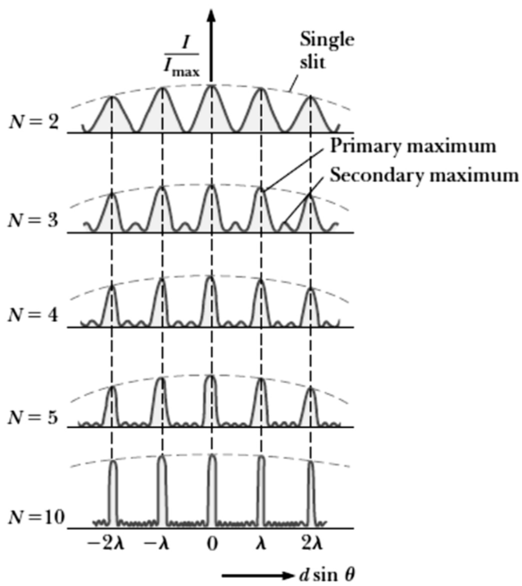


- la fuente S está cerca del espejo
- la pantalla está lejos y perpendicular al espejo
- R >> d
- S´ y S, fuentes coherente que difieren en fase en 180°
- patrón de interferencia con máximos y mínimos intercambiados respecto al experimento de Young

Se produce interferencia constructiva en los puntos para los cuales la diferencia de caminos es de media longitud de onda o cualquier número impar de medias longitudes de onda.

[1] Developed in 1834 by Humphrey Lloyd (1800–1881), Professor of Natural and Experimental Philosophy, Trinity College, Dublin.

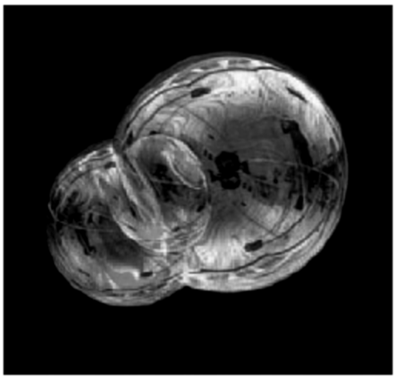
Patrones de interferencia en sistemas de rendijas múltiples



Interferencia en películas delgadas

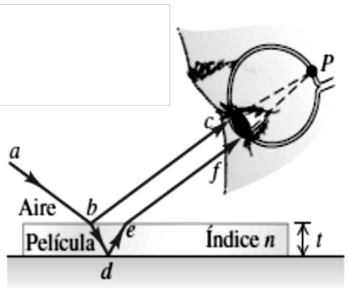
Franjas tipo arco iris en una película de aceite que flota en agua

Las ondas luminosas se reflejan en las superficies anterior y posterior de esas finas películas y se produce interferencia constructiva entre las dos ondas reflejadas (con distintas longitudes de trayectoria) en diferentes lugares para distintas longitudes de onda.



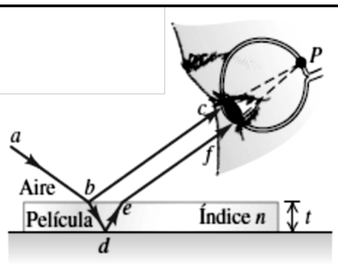
Dr. Jeremy Burgess/Science Photo Library

Interferencia entre los rayos reflejados en las dos superficies de una película delgada



- película delgada de espesor t
- reflexión parcial en superficie superior
- reflexión parcial en superficie inferior
- las ondas reflejadas llegan juntas al punto P

variaciones de espesor



- película delgada de espesor t, índice de refracción n
- $\lambda_n = \dfrac{\lambda}{n}$
- luz incide casi normal a la superficie
- rayos reflejados estarán muy próximos uno del otro,
- se produce interferencia
- diferencia de trayecto = $m\lambda_n$ 2t
- diferencia de fase, $\lambda_n/2$

Este análisis se resume en forma matemática. Si la película tiene espesor t, la luz tiene incidencia normal y longitud de onda λ en la película; si ninguna o si ambas ondas reflejadas en las dos superficies tienen un desplazamiento de fase de medio ciclo por reflexión, las condiciones para que haya interferencia constructiva y destructiva son las siguientes:

$$2t = m\lambda \qquad (m = 0, 1, 2, \dots)$$ (reflexión constructiva en película delgada, sin desplazamiento relativo de fase)

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (m = 0, 1, 2, \dots)$$ (reflexión destructiva en película delgada, sin desplazamiento relativo de fase)

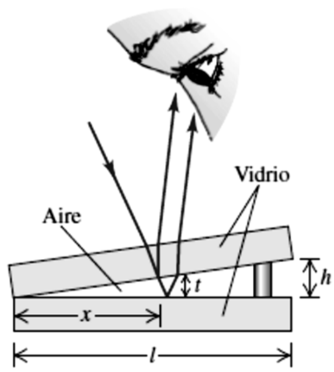
Si una de las dos ondas tiene un desplazamiento de fase de medio ciclo por reflexión, las condiciones para que haya interferencia constructiva y destructiva se invierten:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (m = 0, 1, 2, \dots)$$ (reflexión constructiva en película delgada, con desplazamiento relativo de fase de medio ciclo)

$$2t = m\lambda \qquad (m = 0, 1, 2, \dots)$$ (reflexión destructiva en película delgada, con desplazamiento relativo de fase de medio ciclo)

Interferencia entre ondas luminosas que se reflejan en los dos lados de una cuña de aire que separa dos placas de vidrio.

- el espesor de la película (cuña) no es uniforme
- la diferencia de trayectoria entre las dos ondas es exactamente el doble del espesor t de la cuña de aire en cada punto
- en los puntos en que 2t es un número entero de longitudes de onda, interferencia constructiva (brillantes es lo que se espera)

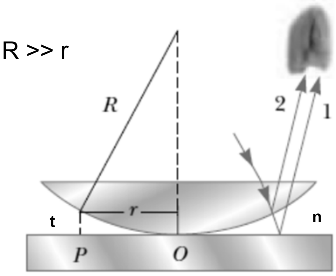


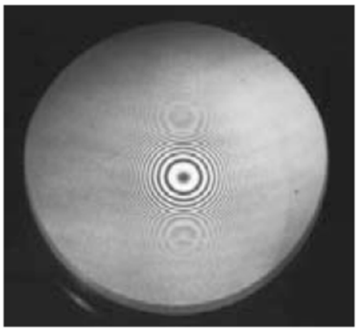
Cuando se efectúa el **experimento**, aparecen las franjas brillantes y oscuras, ¡**pero están intercambiadas**!. Esto sugiere que una u otra de las ondas reflejadas ha sufrido un cambio de fase de medio ciclo durante su reflexión.

Anillos de Newton

Tenemos la superficie convexa de una lente en contacto con una placa de vidrio plano. Entre las dos superficies se forma una fina película de aire. Cuando se observa el conjunto con luz monocromática, se observan franjas de interferencia circulares. Newton se encargó de estudiarlas, por lo que se las conoce como **anillos de Newton**.

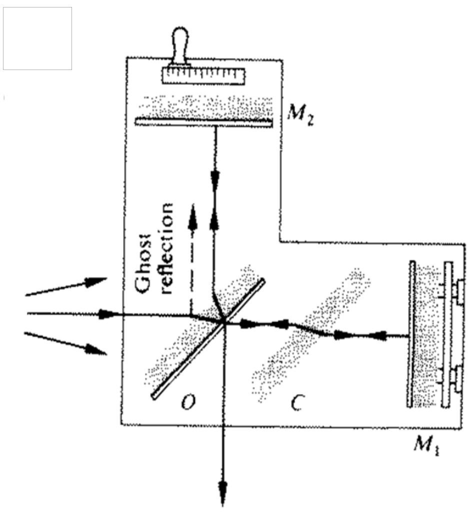
R >> r





$r \approx \sqrt{m\lambda R/n}$ **radio de los anillos oscuros**

El interferómetro de Michelson



- Se envía luz monocromática desde una fuente luminosa A hacia el divisor de haz O.
- Los rayos 1 y 2 emergen del divisor de haz y viajan hacia los espejos M_1 y M_2, respectivamente.
- El rayo 1 se refleja en M_1, pasa a través de la placa compensadora C y se refleja en la superficie plateada P; el rayo 2 se refleja en M_2 y pasa a través del divisor de haz O.
- Por último, los dos rayos se combinan y llegan al ojo del observador

$\boxed{\lambda, d}$

físico A. A. Michelson (1852–1931),