

# **Física II**

## **Tercera parte: Óptica**

Dr. Mario Enrique Álvarez Ramos(Responsable)

Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

Dr. Ezequiel Rodríguez Jáuregui

Dr. Santos Jesús Castillo

Webpage: <http://paginas.fisica.uson.mx/qb>

©2017 Departamento de Física

Universidad de Sonora

# Tema 11: Difracción.

- i. Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.
- ii. Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.
- iii. La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.
- iv. Difracción de rayos X mediante cristales.

# Óptica ondulatoria

Una vez que hemos estudiado los fenómenos ópticos desde el punto de vista de la óptica geométrica (que considera a la luz como rayos que se propagan en línea recta mientras no existe un cambio en las condiciones del medio de propagación), en esta segunda parte nos vamos a dedicar a estudiar la luz considerándola como una onda, con las implicaciones que conlleva.

La *óptica ondulatoria* estudia los fenómenos en los cuales la naturaleza ondulatoria de la luz es fundamental, ejemplo de ello son: la interferencia, la difracción y la polarización de la luz.

En lo que sigue daremos un recorrido por cada uno de ellos, en el orden en que han sido mencionados:

1. interferencia;
2. difracción; y
3. polarización..

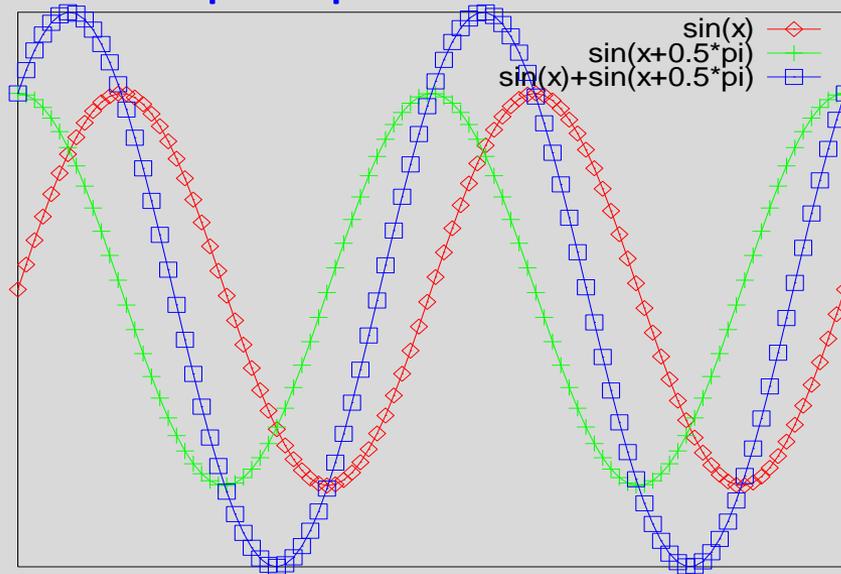
# Interferencia de ondas

Uno de los principios fundamentales que rigen el movimiento ondulatorio es el llamado **principio de superposición**, que expresa que dos o más ondas pueden viajar por la misma región del espacio en forma completamente independiente, de tal forma que el desplazamiento total se obtiene por la adición directa de los desplazamientos que produciría cada una de las distintas ondas en ausencia de las demás.

En el caso de las ondas electromagnéticas, como la luz, lo que se tiene son campos eléctricos y magnéticos propagándose en una región dada, de tal forma que al aplicar el principio anterior, el campo resultante es la suma (vectorial) de los campos de cada una de las ondas presentes.

La superposición de ondas puede resultar en una onda duplicada (interferencia constructiva) o anulada (interferencia destructiva), lo cual está condicionado por el valor de la fase  $\phi$ .

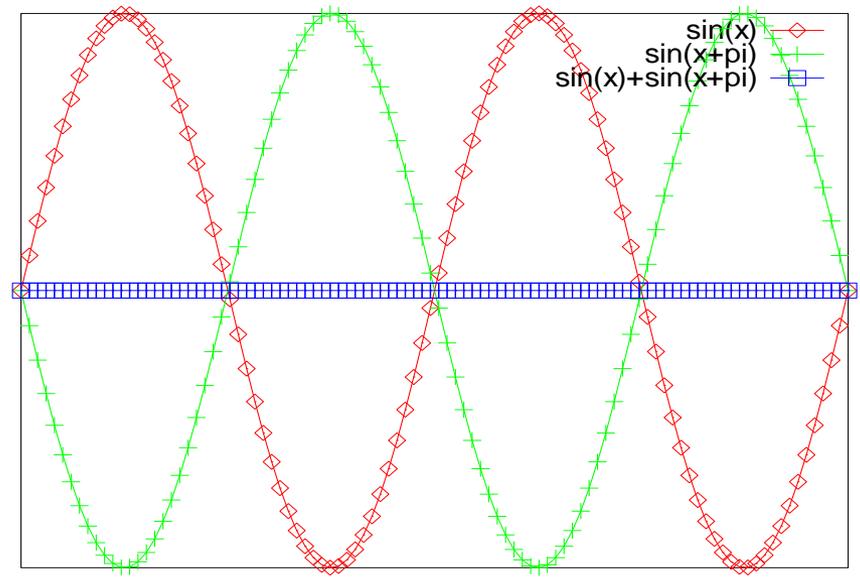
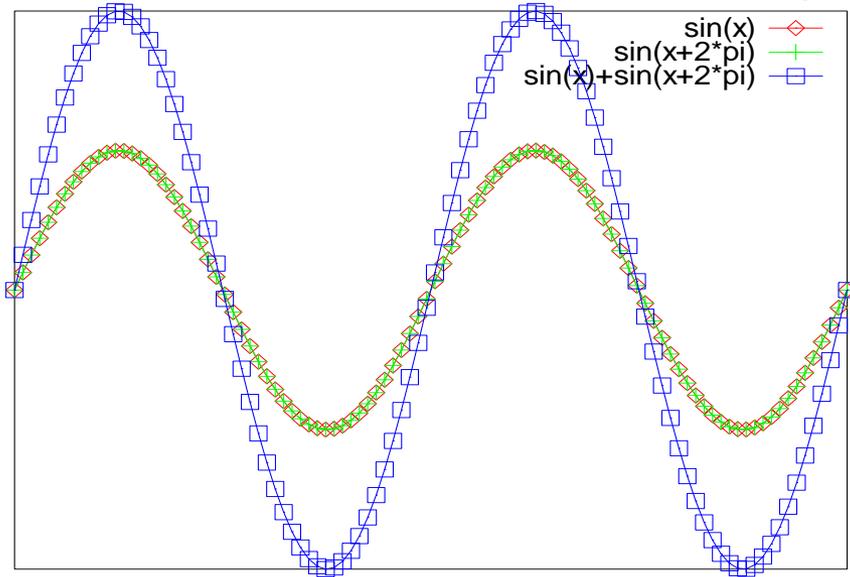
# Ejemplos de superposición de ondas



Interferencia constructiva

Un ejemplo arbitrario

Interferencia destructiva



# Condiciones para la interferencia

Dada la rapidez de oscilación de la luz (del orden de  $10^{-8}s$ ), no es posible observar el fenómeno de interferencia de manera generalizada; de tal forma que se deben satisfacer ciertas condiciones para tener interferencia (constructiva y/o destructiva).

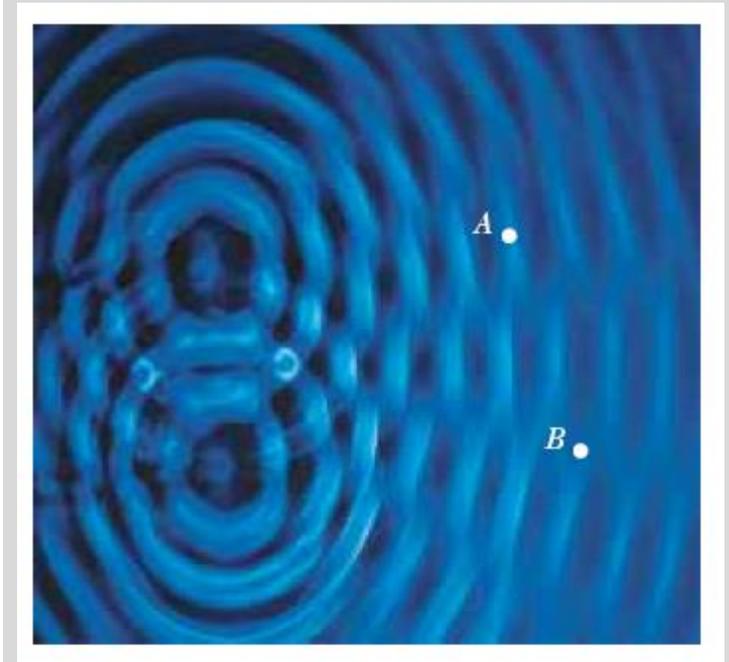
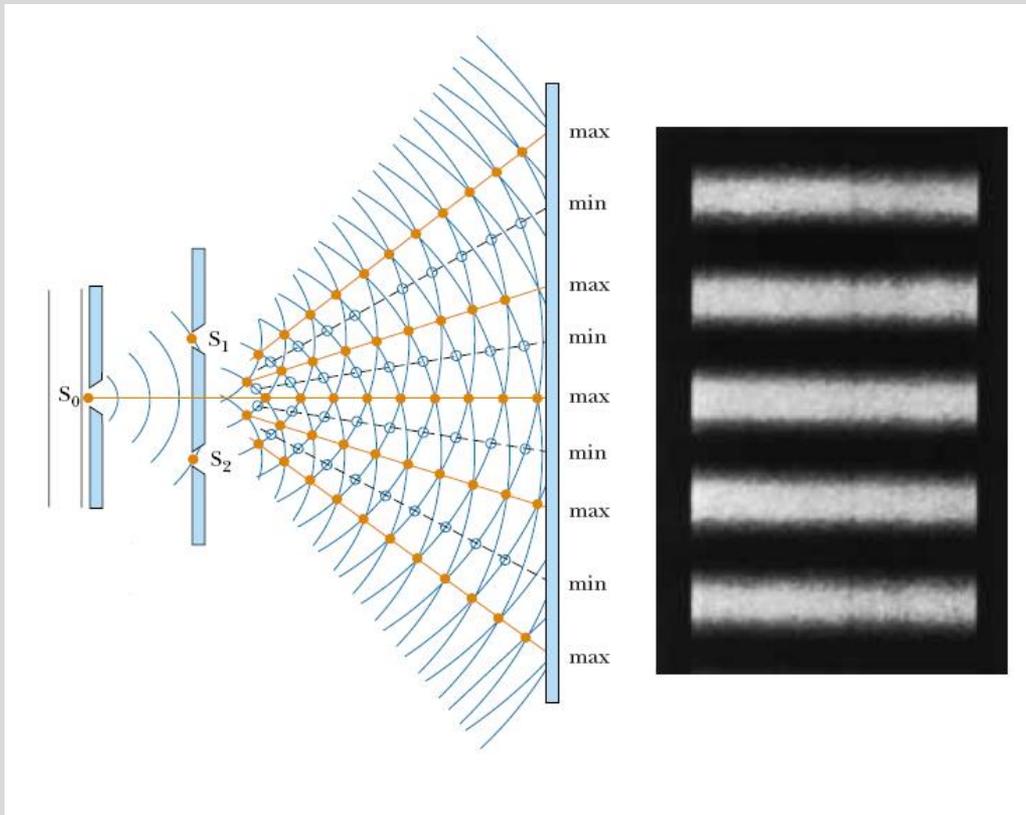
Las condiciones para tener interferencia son dos:

1. Las fuentes deben ser coherentes, es decir, deben mantener una fase constante  $\phi$  una respecto a la otra.
2. Las fuentes deben ser monocromática, es decir, de una misma longitud de onda,  $\lambda$ .

La pregunta que uno se hace es ¿cómo lograr estas dos condiciones de manera sencilla? Una respuesta a esta interrogante la dio Thomas Young en 1801.

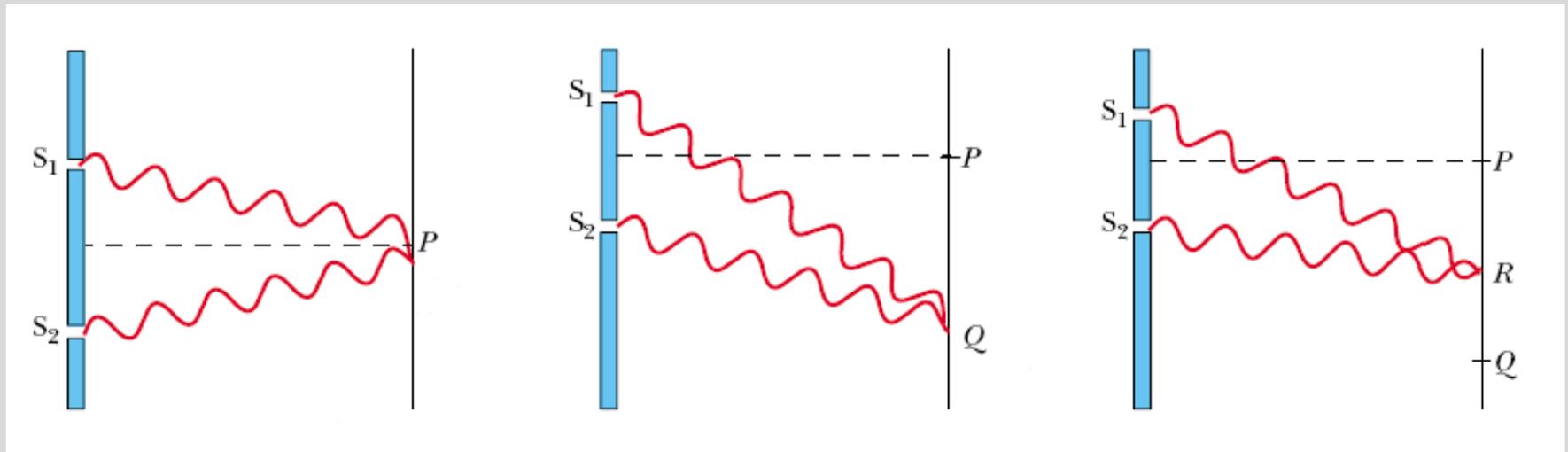
# Experimento de la doble rendija

Hacia 1801 Young demostró la existencia de interferencia para el caso de la luz, para ello empleó un arreglo experimental que se esquematiza en la siguiente figura.



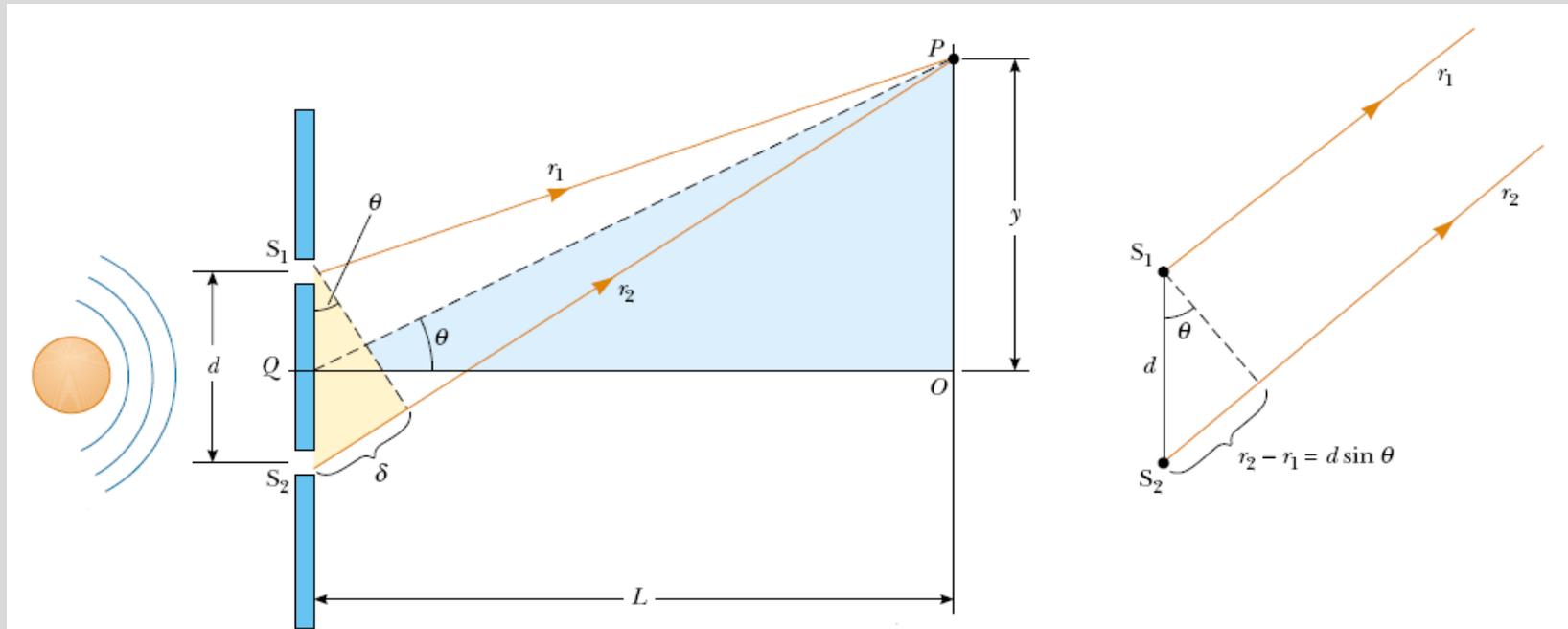
# Experimento de la doble rendija

¿Cómo podemos explicar el patrón de difracción? De manera cualitativa, mediante el siguiente esquema podemos visualizar las superposiciones que dan lugar a interferencia constructiva (franja brillante) e interferencia destructiva (franja oscura)



# Experimento de la doble rendija

El experimento también acepta una explicación cuantitativa. Para ello auxiliémonos del siguiente esquema (que no está a escala):



En este esquema, la diferencia de trayectorias ( $\delta = r_2 - r_1 = d \text{ Sen } \theta$ ) permite explicar el fenómeno de la interferencia, dependiendo si  $\delta$  es o no, múltiplo de la longitud de onda de la luz considerada en el experimento.

# Experimento de la doble rendija

El valor de  $\delta$  determina si las dos ondas están en fase cuando arriban al punto  $P$ . Si  $\delta$  es cero o un múltiplo entero de la longitud de onda, entonces estarán en fase y tendremos una interferencia constructiva (franja brillante), lo anterior permite escribir a la condición de interferencia constructiva como:

$$\delta = d \sin \theta = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

donde  $m$  recibe el nombre de número de orden, la franja central (que corresponde a  $m=0$ ) recibe el nombre de *máximo de orden 0*, mientras que las siguientes dos franjas (a cada lado del máximo de orden 0), y que corresponden a  $m= +1$  y  $m= -1$ , se llaman *máximos de orden 1*, y así sucesivamente.

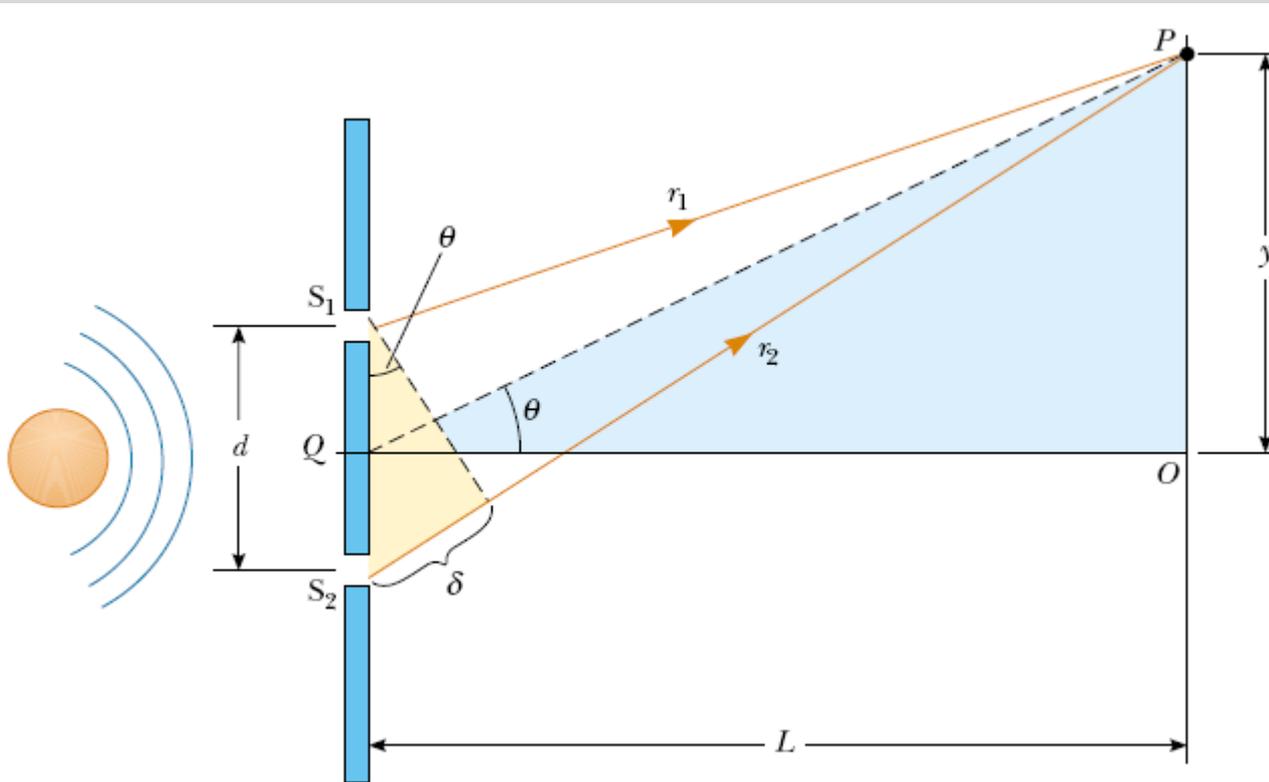
# Experimento de la doble rendija

Como se mencionó anteriormente, el valor de  $\delta$  determina si las dos ondas están, o no, en fase cuando arriban al punto  $P$ . Si  $\delta$  es un múltiplo impar de una media longitud de onda, las ondas presentarán un desfase de  $180^\circ$  y entonces tendremos una interferencia destructiva (franja oscura), lo anterior permite escribir a la condición de interferencia destructiva como:

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

# Experimento de la doble rendija

En este tipo de experimentos es usual obtener expresiones para la posición de las franjas, en este caso la distancia  $y$  del punto  $P$ , respecto al máximo de orden cero (la franja brillante, justo frente al centro de ambas



Si consideramos que

$$L \gg d$$

y

$$d \gg \lambda$$

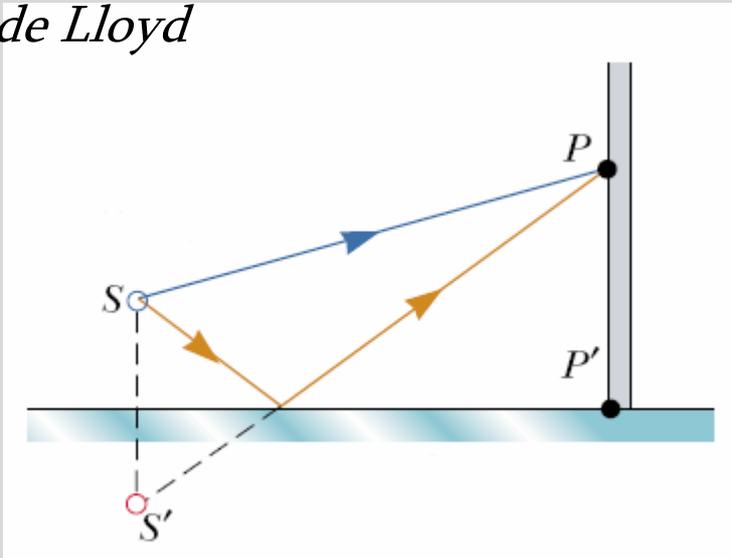
encontramos que

y

$$y_{\text{oscuro}} = \frac{\lambda L}{d} \left( m + \frac{1}{2} \right)$$

# Cambio de fase por reflexión

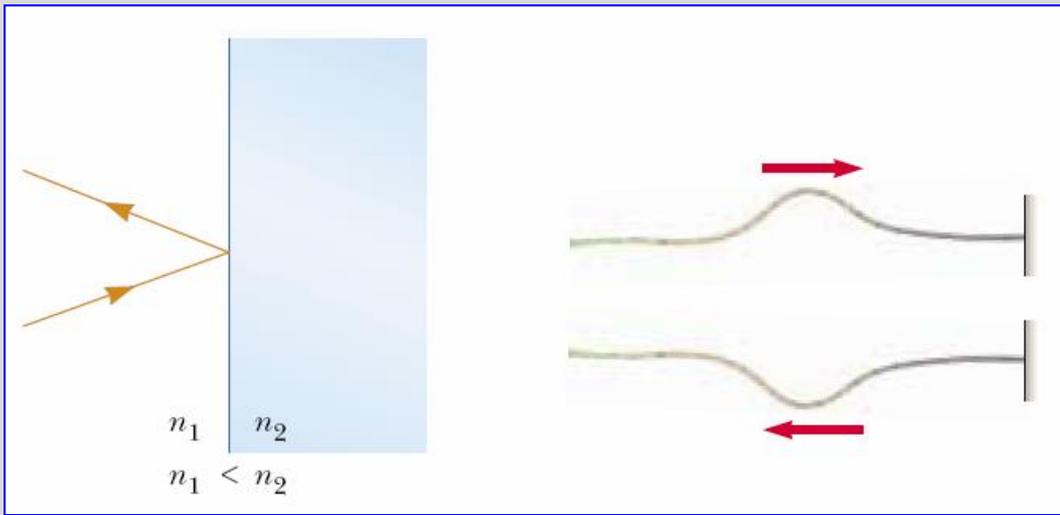
Un arreglo sencillo, pero ingenioso, para producir interferencia con una fuente luminosa (análogo al experimento de Young) es el llamado *espejo de Lloyd*



En este experimento se encuentra también un espectro de interferencia como en el experimento de doble rendija, pero con el patrón invertido, es decir, donde había zona brillante ahora aparece zona de oscuridad.

Por ejemplo en  $P'$  se tiene una zona de oscuridad, lo que permite concluir que *una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de  $180^\circ$  en la reflexión de un medio que tiene mayor índice de refracción que el medio en el cual está viajando la onda.*

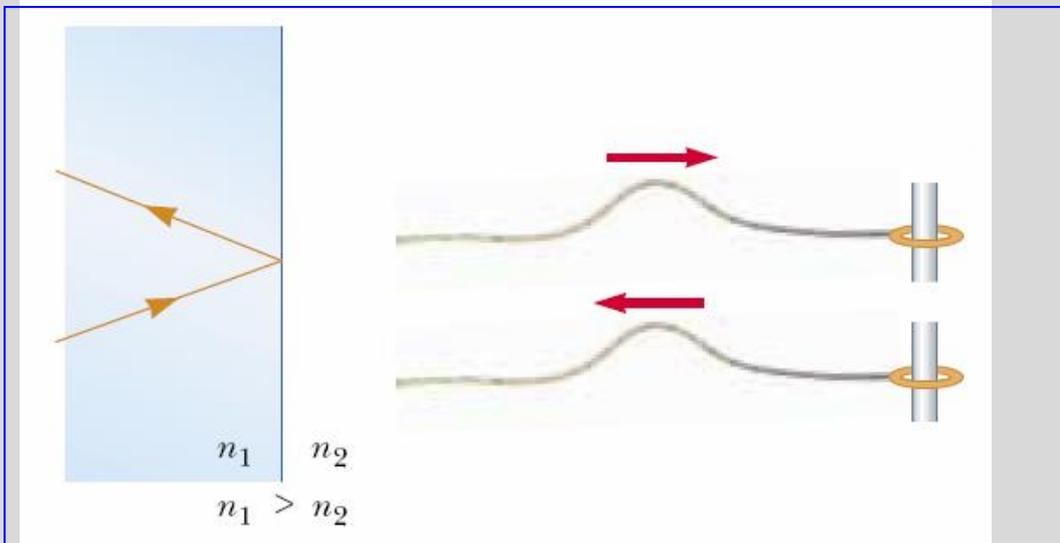
# Cambio de fase por reflexión



The diagram illustrates reflection at a boundary where the refractive index of the second medium is greater than the first ( $n_1 < n_2$ ). On the left, incident rays in medium  $n_1$  strike the boundary. On the right, the reflected wave is shown with a crest reflecting as a trough, indicating a phase shift of  $180^\circ$ . Red arrows indicate the direction of wave propagation.

$n_1$   $n_2$   
 $n_1 < n_2$

Cambio de fase de  $180^\circ$

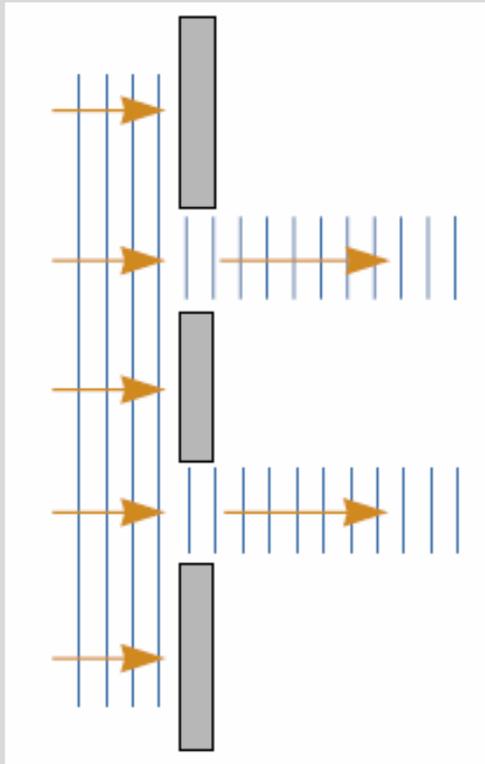


The diagram illustrates reflection at a boundary where the refractive index of the first medium is greater than the second ( $n_1 > n_2$ ). On the left, incident rays in medium  $n_1$  strike the boundary. On the right, the reflected wave is shown with a crest reflecting as a crest, indicating no phase change. Red arrows indicate the direction of wave propagation.

$n_1$   $n_2$   
 $n_1 > n_2$

Sin cambio de fase

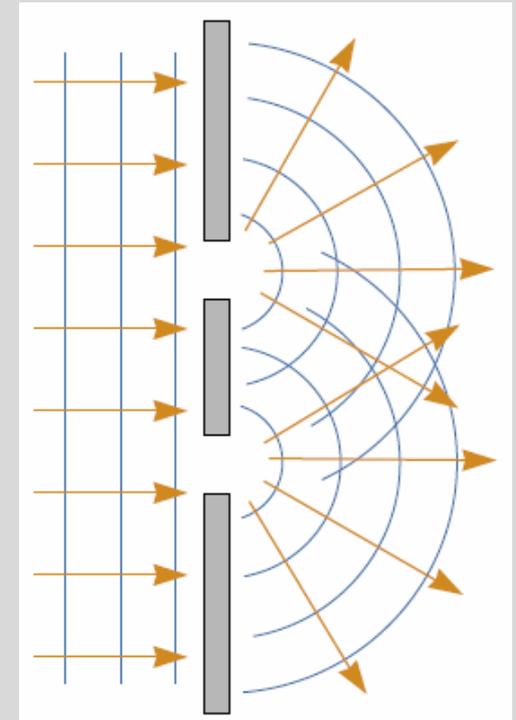
# Difracción y polarización



Cuando las ondas luminosas pasan por una pequeña abertura se observa un patrón de interferencia en vez de un punto definido de luz, lo que indica que la luz se dispersa mas allá de la trayectoria definida por la abertura.

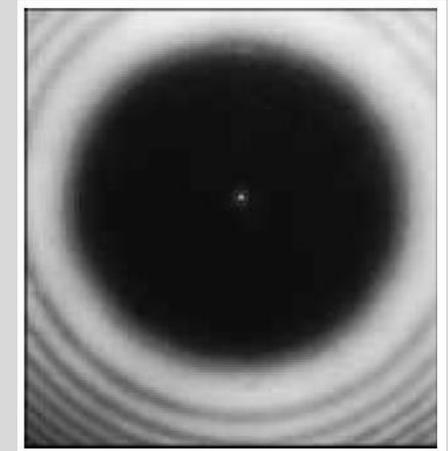
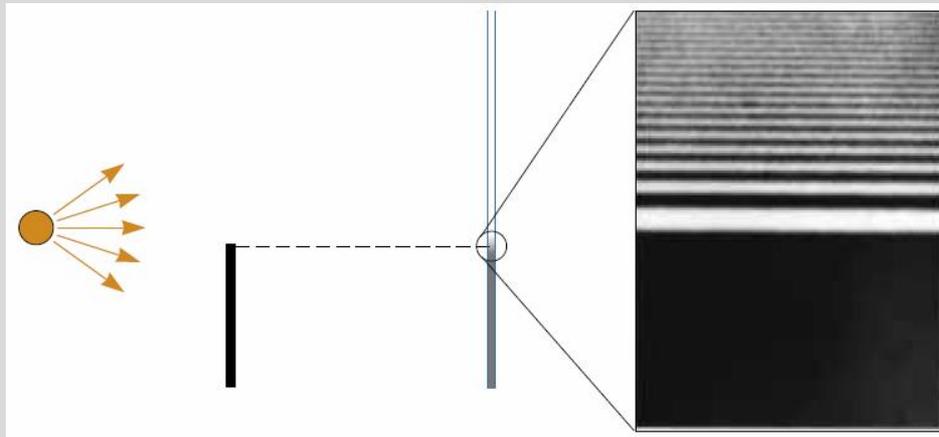
En lugar de tener dos sombras, se tiene un patrón de difracción

Este fenómeno se conoce como difracción y sólo puede explicarse con un modelo ondulatorio de la luz.



# Introducción a la difracción

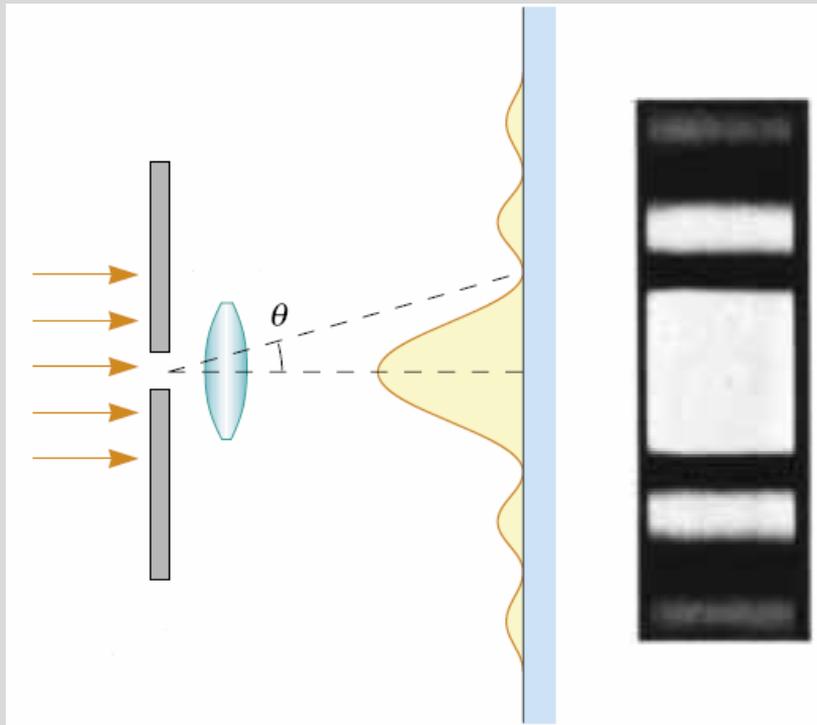
La difracción se presenta cuando las ondas pasan por pequeñas aberturas, alrededor de obstáculos o por bordes afilados, originando que no existan fronteras definidas entre una región sombreada y una región iluminada.



En la segunda imagen se presenta el *patrón de difracción* de una moneda pequeña colocada a la mitad entre la fuente de luz y la pantalla, es interesante notar que el punto brillante al centro del patrón sólo se puede explicar mediante la óptica ondulatoria que predice interferencia constructiva en ese punto.

# Introducción a la difracción

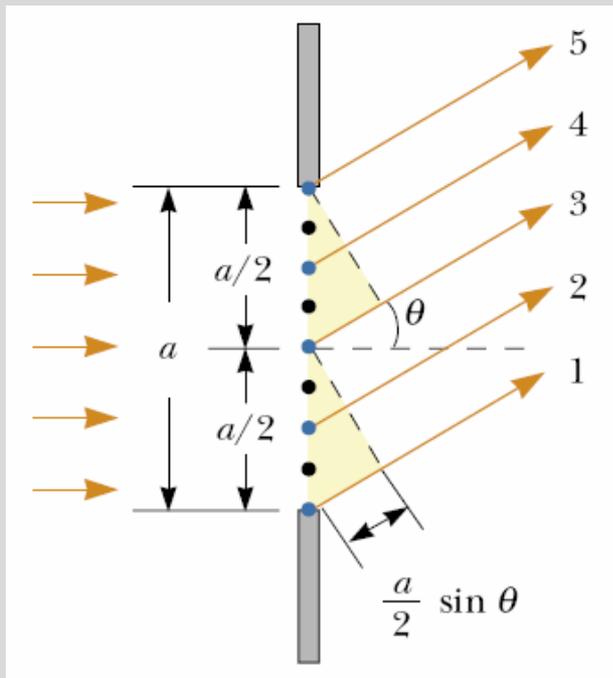
En lo que sigue nos enfocaremos en la llamada difracción de Fraunhofer, la cual ocurre, por ejemplo, cuando los rayos que pasan a través de una rendija angosta son casi paralelos entre sí, tal como se muestra a continuación



Experimentalmente se logra colocando la pantalla lejos de la abertura usada para crear la difracción, o usando una lente convergente para enfocar los rayos una vez que estos han atravesado la abertura.

# Difracción de rendijas angostas

Para estudiar la difracción de una rendija angosta podemos hacer uso del esquema mostrado para analizar cuál es la condición requerida para tener interferencia destructiva.



Si dividimos la rendija en dos mitades se encuentra que esta condición está dada por

$$\frac{a}{2} \operatorname{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

si dividimos la rendija en cuatro partes iguales se encuentra que la condición es

$$\frac{a}{4} \operatorname{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

y si la dividimos en  $2m$  partes, encontramos que la condición es

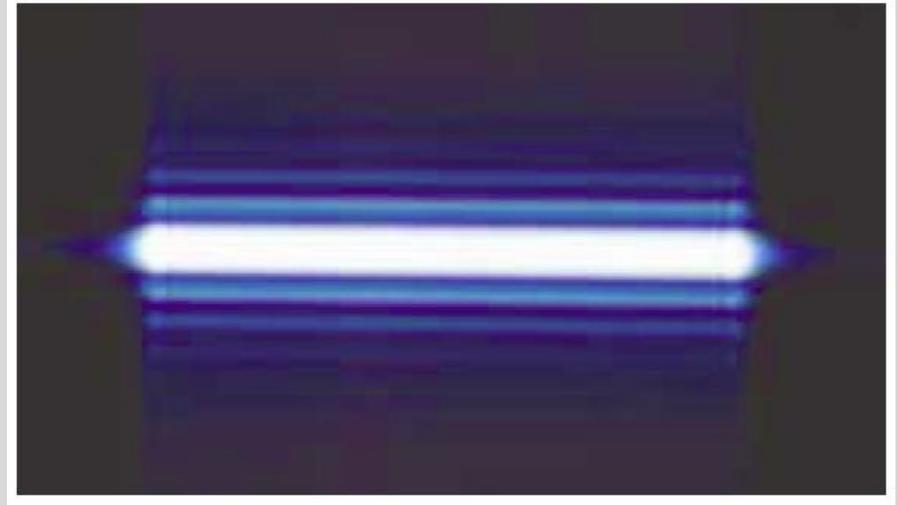
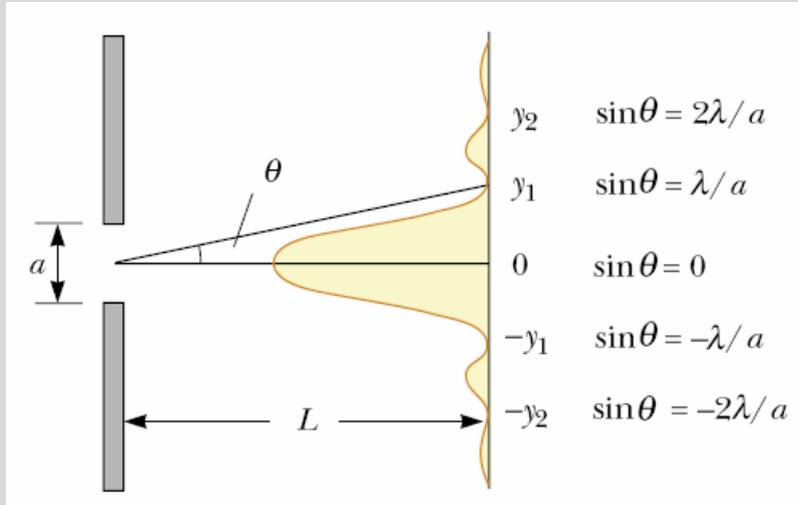
$$\frac{a}{2m} \operatorname{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

# Difracción de rendijas angostas

Generalizando el resultado anterior, podemos escribir la condición para interferencia destructiva como

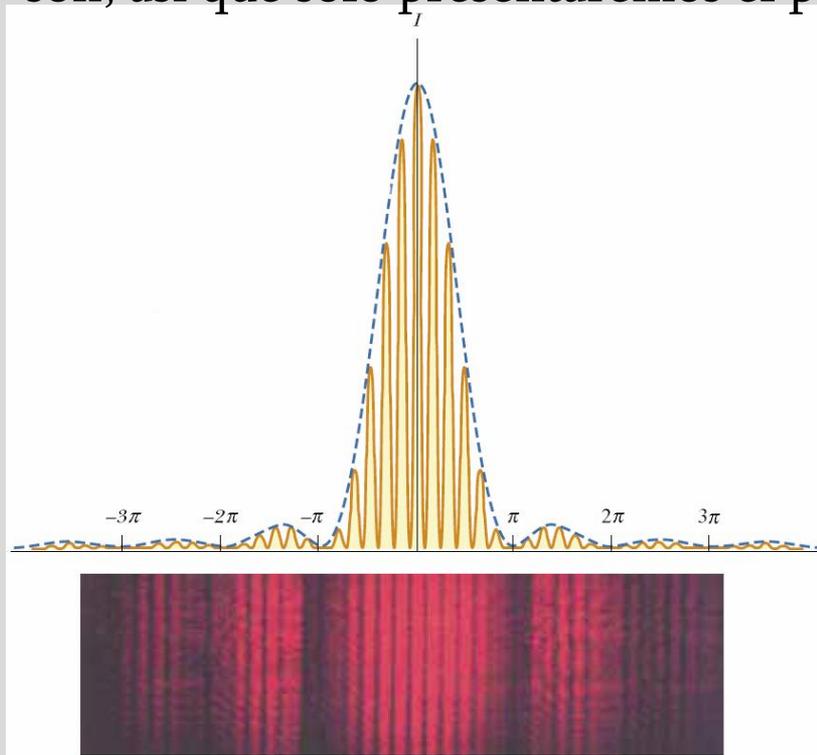
$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{a} \quad \text{con } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Lo anterior se puede esquematizar en la siguiente figura que muestra el patrón de difracción de Fraunhofer de una rendija de ancho  $a$ .



# Difracción de rendijas angostas

Es importante mencionar que cuando tenemos más de una rendija se deben considerar dos efectos: la difracción recientemente expuesta y la interferencia de las ondas que vienen de diferentes rejillas. Las expresiones resultante son más complicadas y los espectros también lo son, así que sólo presentaremos el patrón obtenido para dos rejillas.

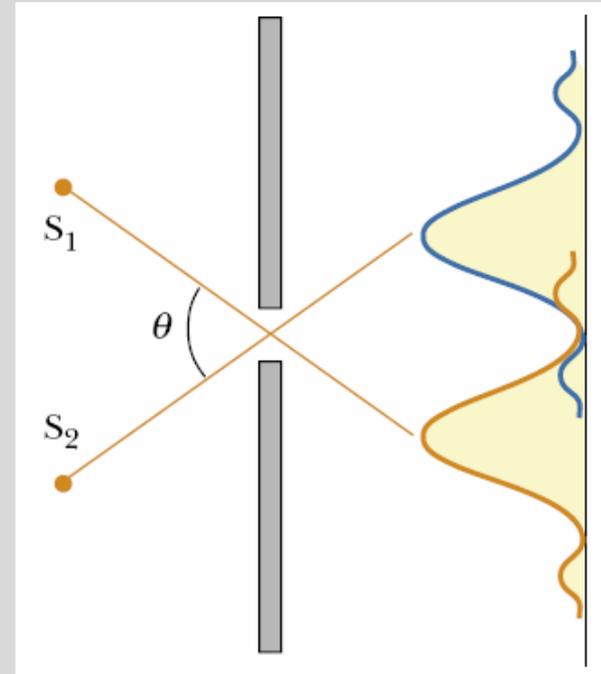
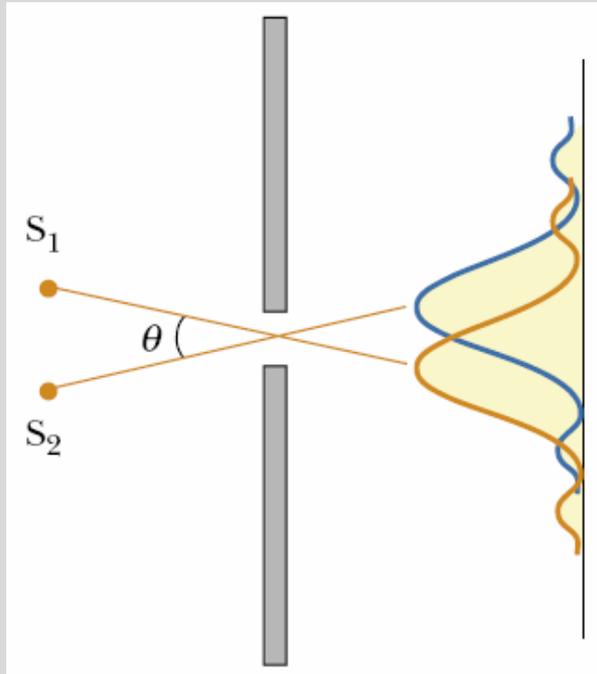


Patrón para ondas luminosas de  $650\text{nm}$  que pasan por dos rendijas de  $3.0\mu\text{m}$  que están separadas  $18\mu\text{m}$ .

La envolvente (en color azul) representa el efecto de la difracción, mientras que las líneas naranjas corresponden a las franjas de interferencia.

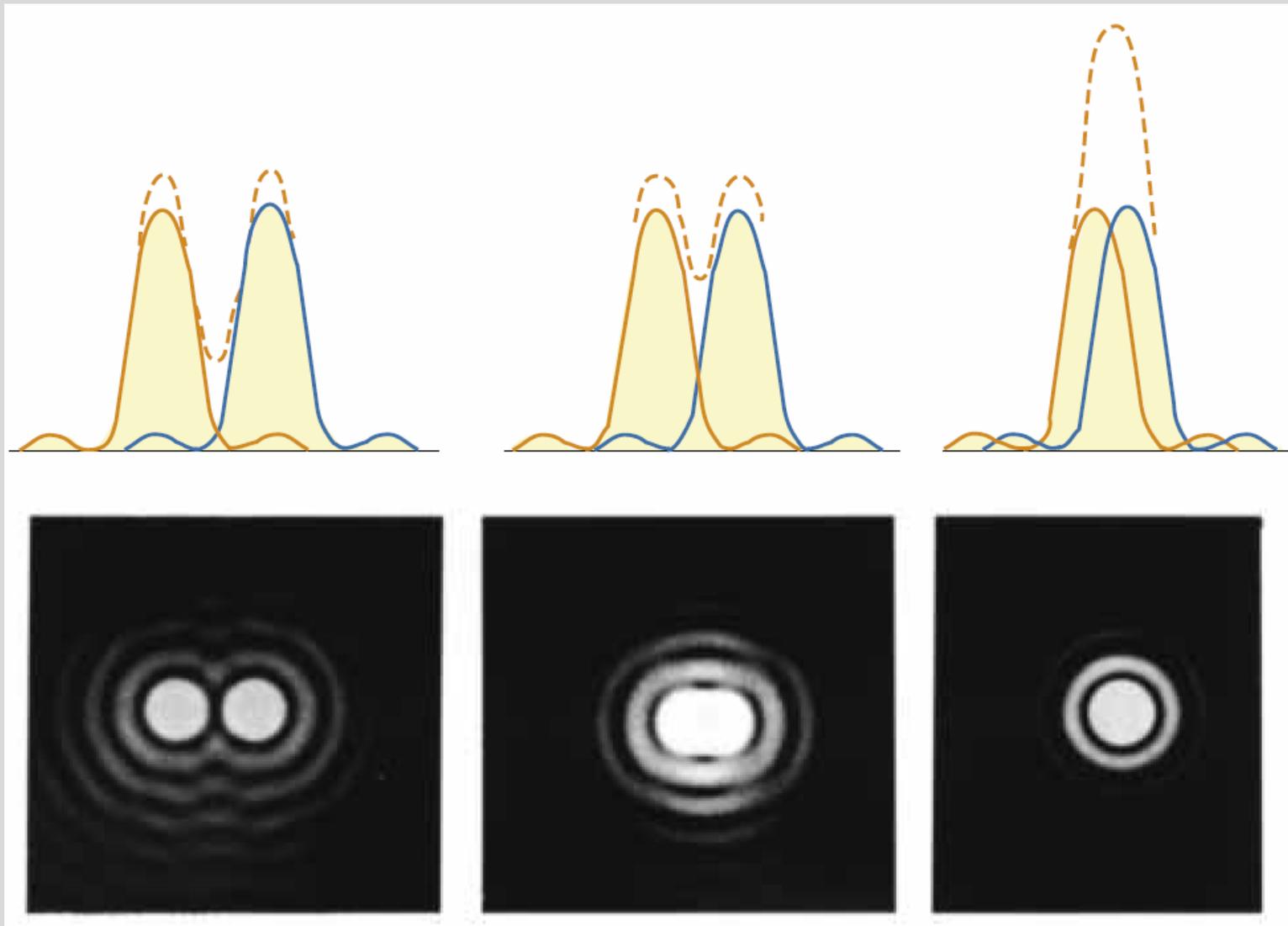
# Resolución de abertura circular

La capacidad de los sistemas ópticos para distinguir entre objetos muy próximos es limitada debido a la naturaleza ondulatoria de la luz.



Dos fuentes muy cercanas producen patrones de difracción con sus máximos traslapados, mientras que dos fuentes no tan cercanas permiten la formación de patrones cuyos máximos no se traslapan, permitiendo la formación de dos imágenes *resueltas*.

# Resolución de abertura circular



# Resolución de abertura circular

El *criterio de Rayleigh* establece que una imagen está resuelta si el máximo central de una imagen cae sobre el primer mínimo de otra imagen.

Así que la condición para tener una imagen resuelta en una rendija de ancho  $a$ , empleando luz de longitud de onda  $\lambda$ , es

$$\theta_{\min} = \frac{\lambda}{a}$$

donde  $\theta$  se expresa en radianes.

Muchos de los sistemas ópticos emplean aberturas circulares, en vez de rendijas. Para estos sistemas, se ha encontrado que la condición es

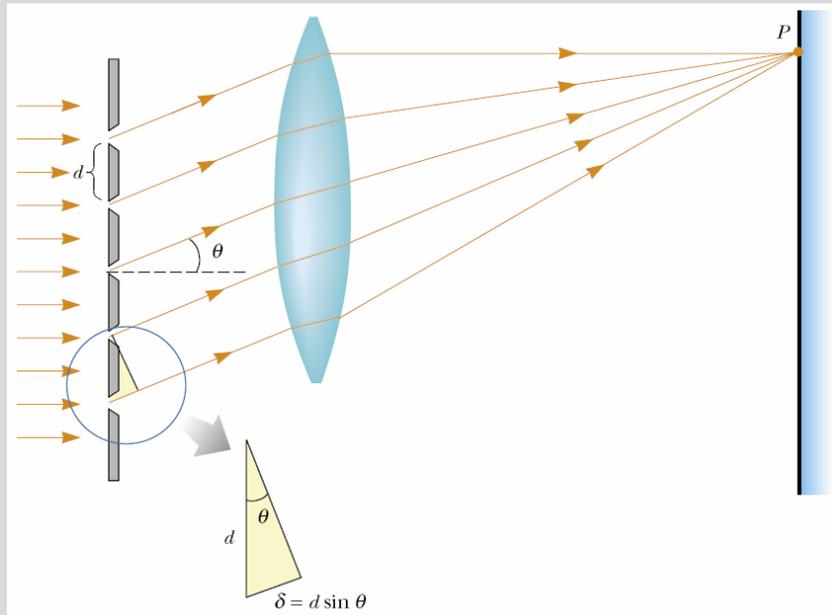
$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

donde  $D$  es el diámetro de la abertura.

# La rejilla de difracción

Un dispositivo muy útil para analizar fuentes luminosas es la *rejilla de difracción* que consiste de un gran número de rendijas paralela igualmente espaciadas, y pueden ser de transmisión o de reflexión.

Las rejilla de difracción se logran cortando líneas paralelas sobre una placa de vidrio (rejilla de transmisión) o sobre un material reflejante (rejilla de reflexión), mediante una máquina de rayado de precisión.



La diferencia de caminos  $\delta$  es la responsable de los fenómenos de difracción e interferencia, así que la condición para el máximo de interferencia de una rejilla es

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

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

# Espectrómetro de rejilla de difracción

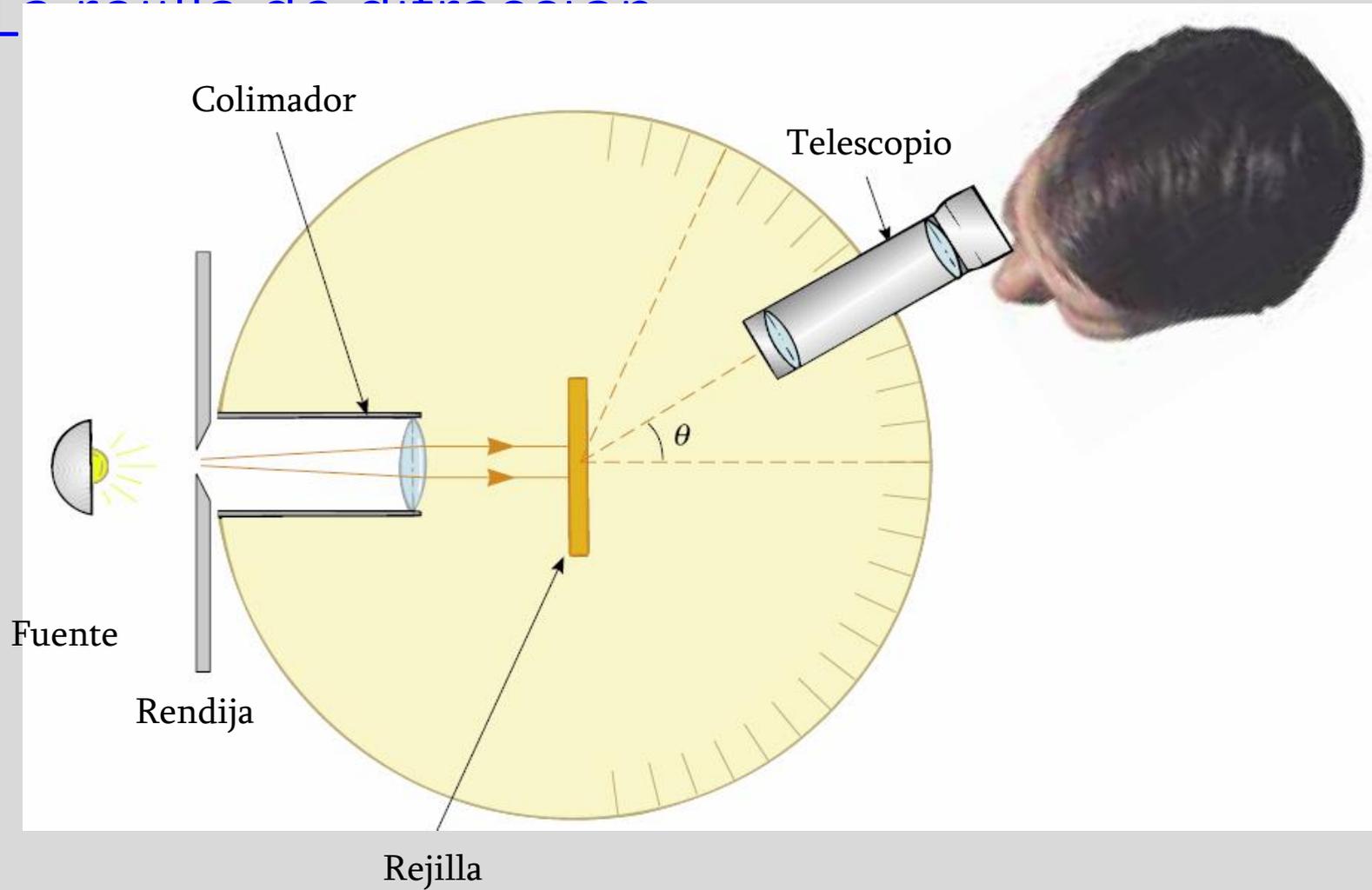


Diagrama de un espectrómetro de rejilla de difracción.