

Magnetismo y Óptica



Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

E-mail: roberto.duarte@didactica.fisica.uson.mx

Webpage: <http://rpduarte.fisica.uson.mx>

© 2016 Departamento de Física Universidad de Sonora

Temario

A. Magnetismo

1. Campo magnético. [Enell-Ene29] (7.5 horas)
2. Leyes del Magnetismo [Feb01-Feb19] (7.5 horas)
3. Propiedades magnéticas de la materia. [Feb22-Feb26] (3horas)

B. Óptica

1. Naturaleza y propagación de la luz. [Feb29-Mar04] (3horas)
 2. Leyes de la reflexión y refracción. [Mar07-Mar15] (4.5horas)
 3. Óptica geométrica. [Mar26-Abr15] (9horas)
 4. **Difracción.** [Abr18-Abr22] (3horas)
 5. Polarización óptica. [Abr25-Abr29] (3horas)
 6. Propiedades ópticas de la materia. [May02-May06] (3horas)
-

Magnetismo y óptica

Parte II: Óptica (Tiempo aproximado: 27 horas)

4. Difracción. [Abr18-Abr22] (3 horas).
 - a. Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.
 - b. Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.
 - c. La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.
 - d. Difracción de rayos X mediante cristales.
-

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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:

- interferencia;
- difracción; y
- polarización.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Óptica ondulatoria.

Uno de los principios fundamentales que rigen el movimiento ondulatorio es el llamado **principio de superposición**, que expresa que dos o mas 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.

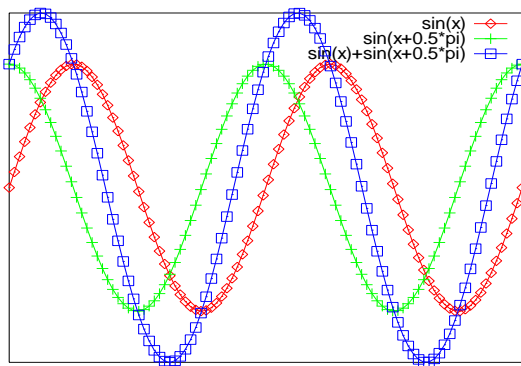
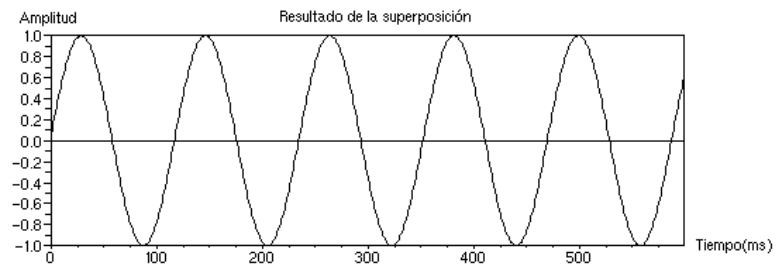
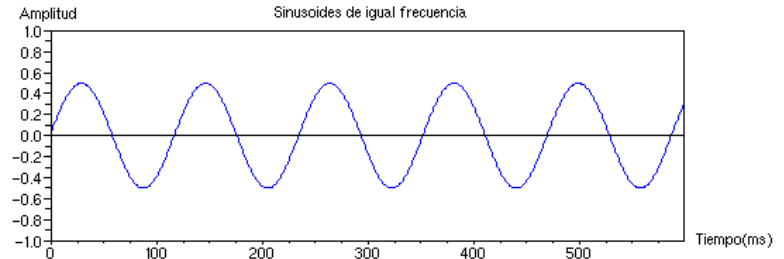
La superposición de ondas puede resultar en una onda duplicada (interferencia constructiva) o anulada (interferencia destructiva), lo cual está condicionado por el valor de la fase ϕ entre las ondas.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

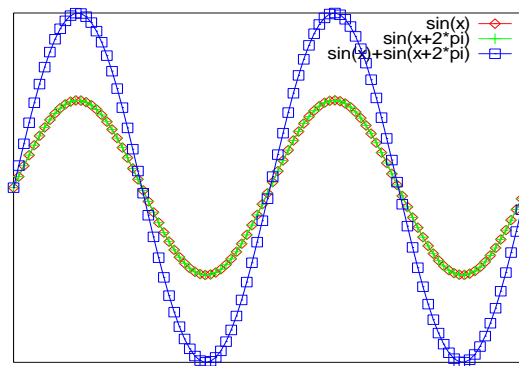
Óptica ondulatoria. Superposición de ondas.

En las figuras se muestran ejemplos de interferencias **constructiva** y **destruktiva** para ondas armónicas.

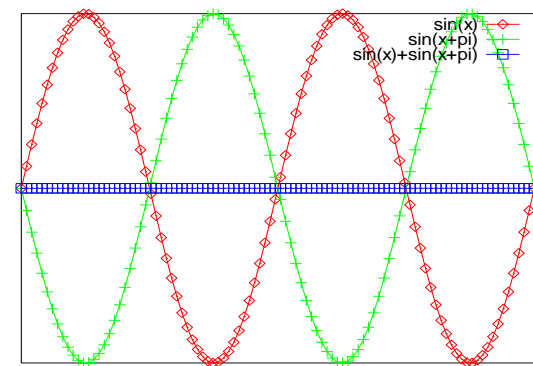
En los ejemplos, la interferencia es resultado del principio de superposición de dos ondas de igual frecuencia pero con fase relativa variable.



Un ejemplo arbitrario



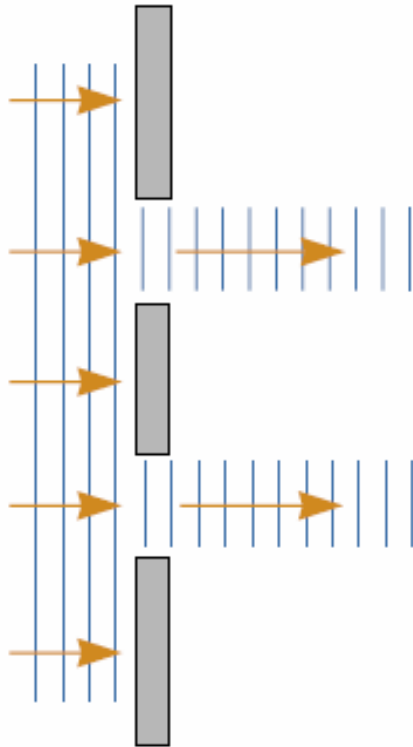
Interferencia constructiva



Interferencia destructiva

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

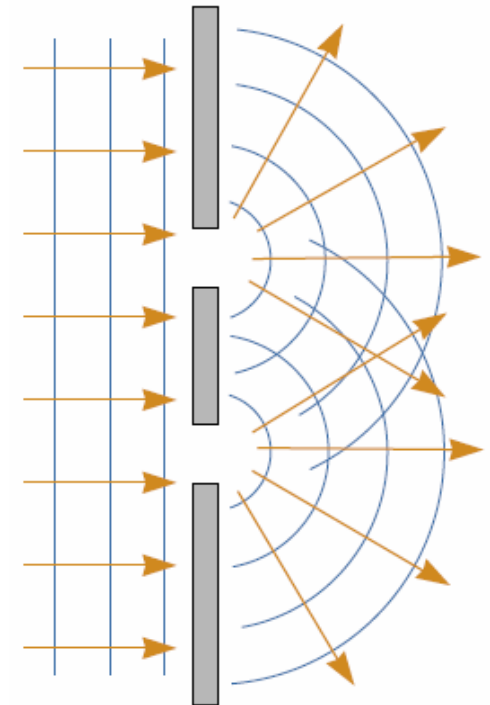
Introducción a la difracción.



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 más allá de la trayectoria definida por la abertura.

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

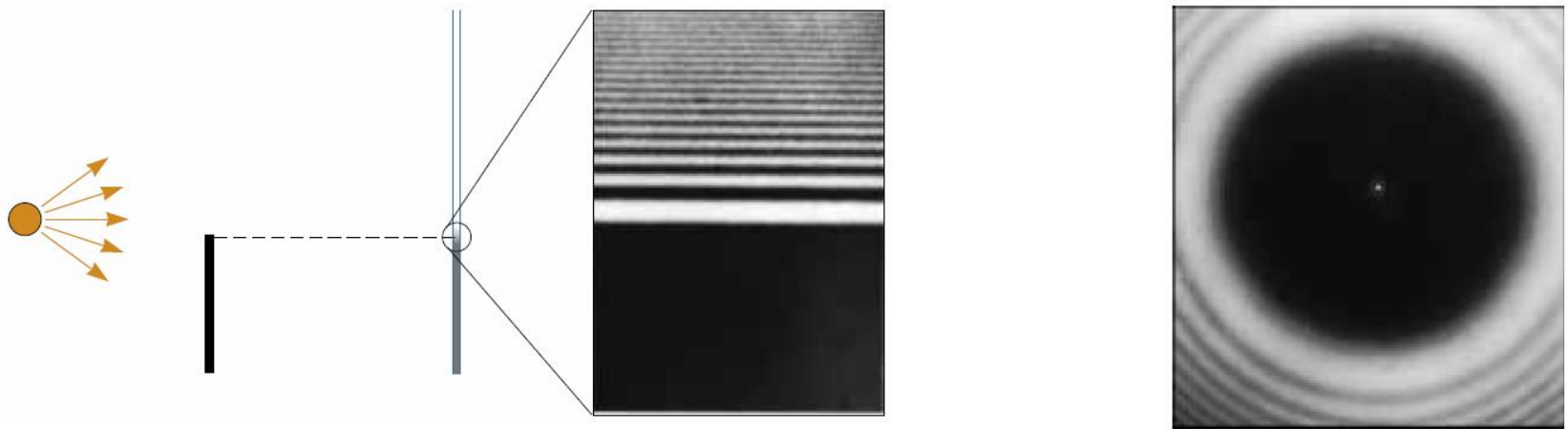
Este fenómeno se conoce como difracción y sólo puede explicarse con un modelo ondulatorio de la luz.



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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.

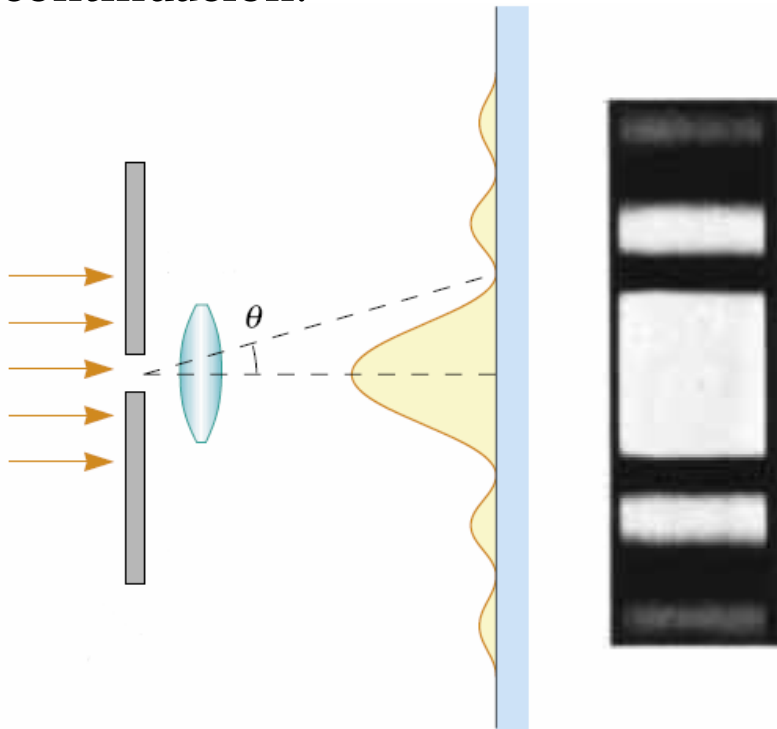


En la segunda imagen se presenta el **patrón de difracción** de una moneda pequeña colocada a la mitad entre la fuente de luz y la pantalla, es interesante notar que el punto brillante al centro del patrón sólo se puede explicar mediante la óptica ondulatoria que predice interferencia constructiva en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

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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, esto 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.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Introducción a la difracción. 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 ϕ una respecto a la otra.
2. Las fuentes deben ser monocromática, es decir, de una misma longitud de onda, λ .

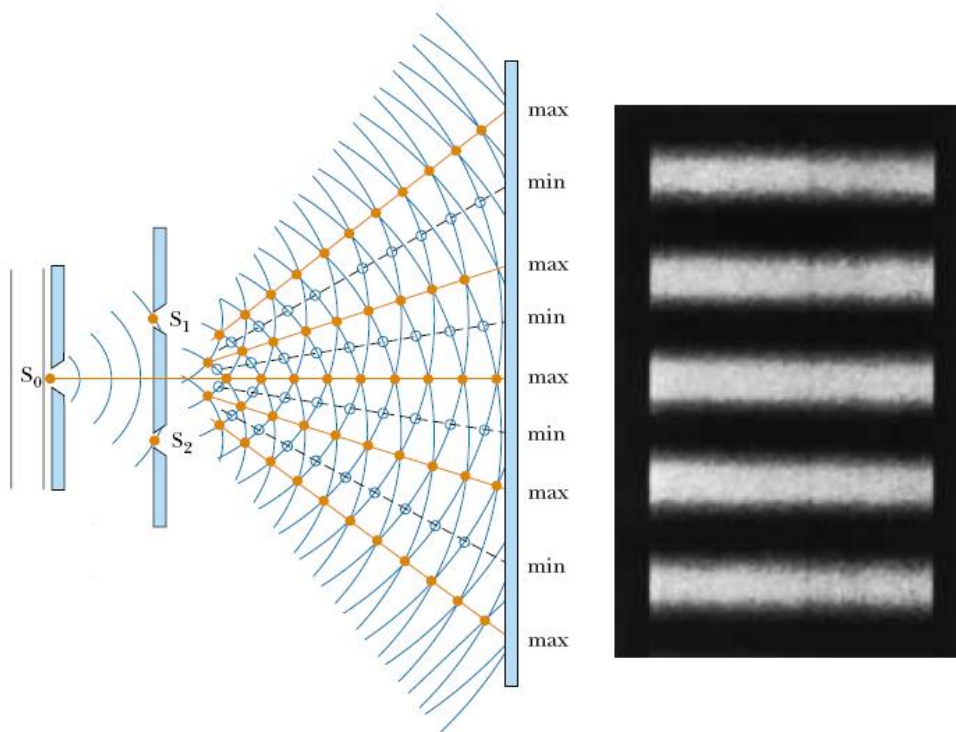
La pregunta que uno se hace es ¿cómo lograr estas dos condiciones de manera sencilla?

Una respuesta a esta interrogante la dio el físico inglés Thomas Young (1773–1829) en 1801.

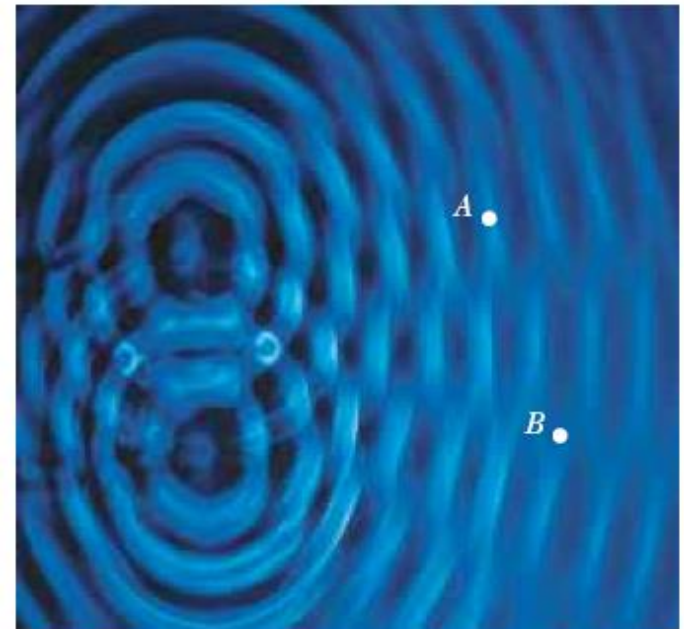
Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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 formado por dos rejillas, tal como se esquematiza en la siguiente figura.



Interferencia de luz visible y patrón de interferencia



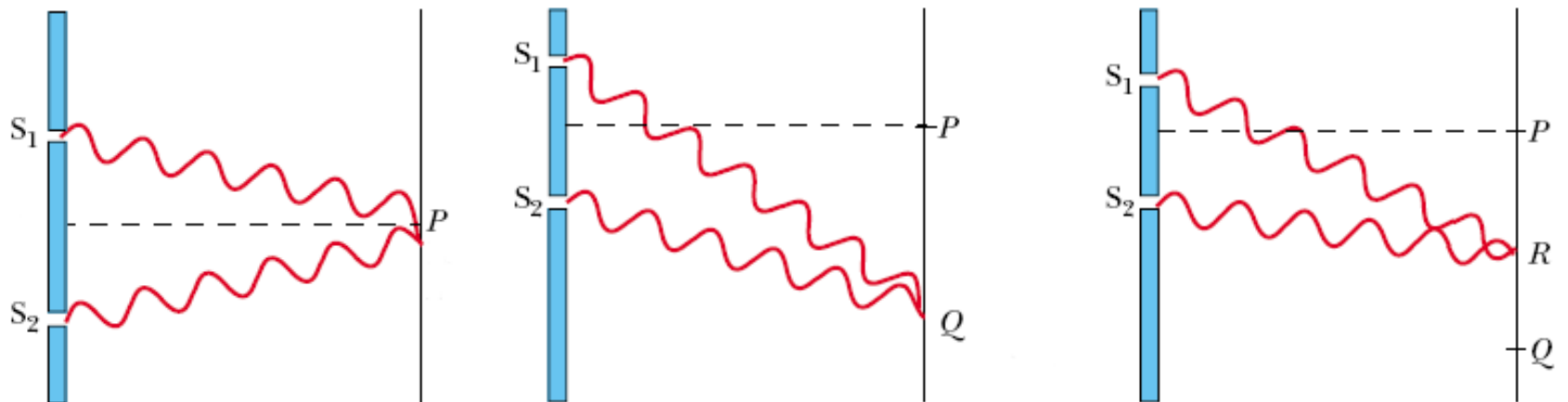
Ondas en un estanque

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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 (franjas brillantes) e interferencia destructiva (franjas oscuras)



Interferencia constructiva en P y Q

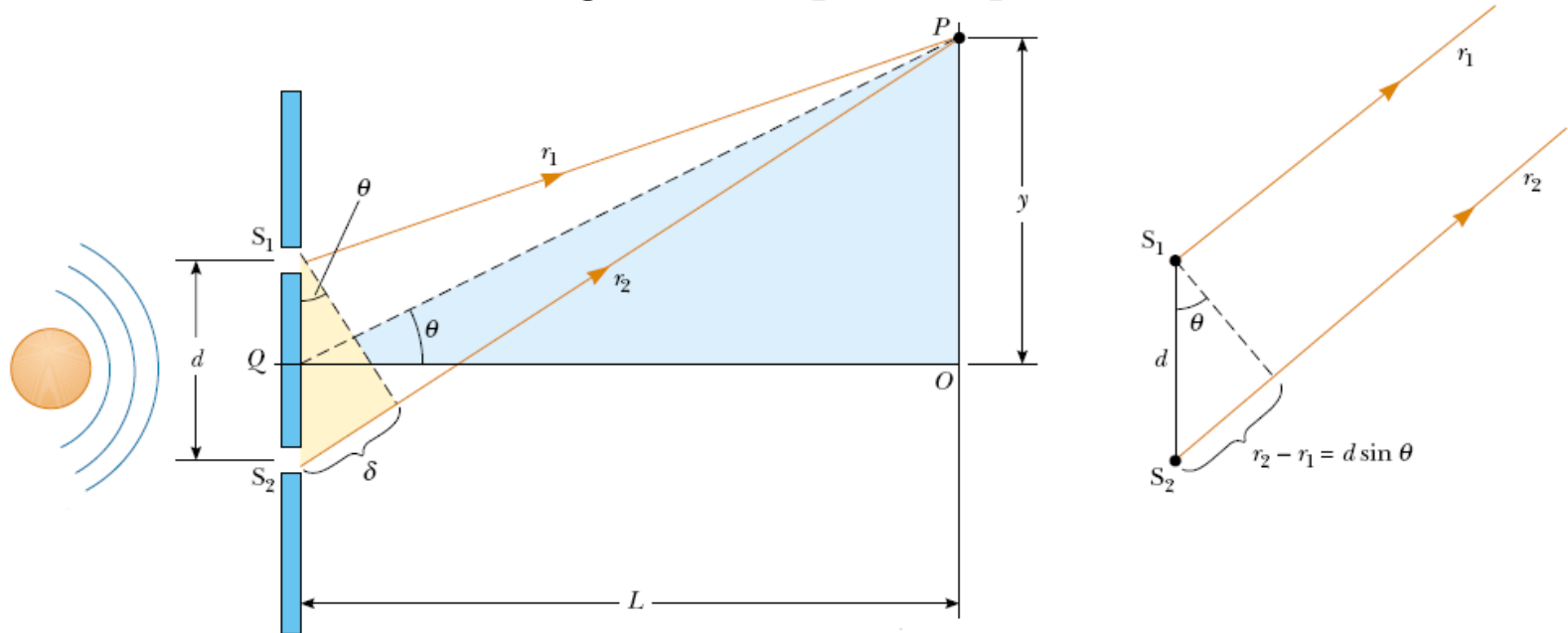
Interferencia destructiva en R

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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 ($\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$) permite explicar el fenómeno de la interferencia, dependiendo si δ es o no, múltiplo de la longitud de onda de la luz considerada en el experimento.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

El valor de δ determina si las dos ondas están, o no, en fase cuando arriban al punto P .

Si δ 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

$$\delta = d \sin \theta = m\lambda, \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

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.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

El valor de δ determina si las dos ondas están, o no, en fase cuando arriban al punto P .

Si δ es un **múltiplo impar de una media longitud de onda**, las ondas presentarán un desfase de 180° y entonces tendremos una interferencia destructiva (franja oscura), lo anterior permite escribir a la **condición de interferencia destructiva** como

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

donde m recibe el nombre de **número de orden**.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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 rendijas).

Si consideramos que

$$L \gg d$$

y

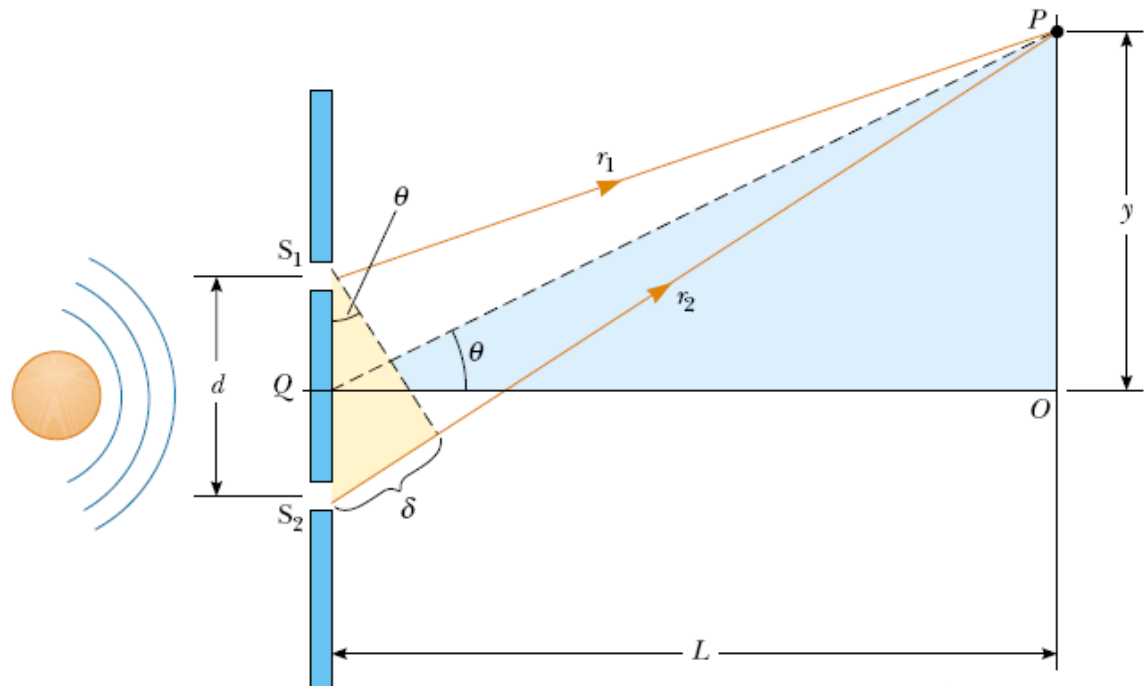
$$d \gg \lambda$$

encontramos que

$$y_{\text{brillante}} = \frac{\lambda L}{d} m$$

y

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



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer. Ejemplo.

Experimento de la doble rendija.

Ejemplo. Se produce un patrón de interferencia mediante luz de una fuente distante, cuya longitud de onda es de $580nm$, que incide sobre dos ranuras paralelas idénticas separadas por una distancia (entre centros) de $0.530mm$. Si las ranuras son muy angostas, ¿cuál sería la posición angular de los máximos de interferencia de primero y de segundo órdenes de dos ranuras?

Solución.

Considerando que estamos interesados en los máximos de interferencia, partimos de

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

y despejando θ tenemos

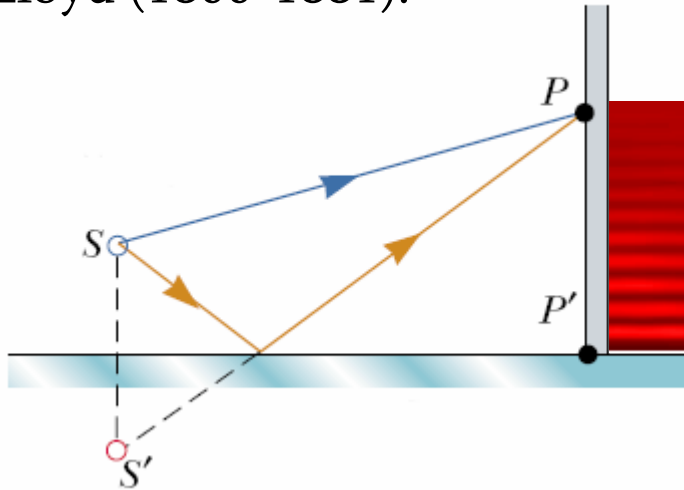
$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right)$$

de donde $\theta_1 = \pm 0.0627^\circ$ y $\theta_2 = \pm 0.1254^\circ$.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

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** empleado por primera vez en 1837 por el físico irlandés Humphrey Lloyd (1800-1881).

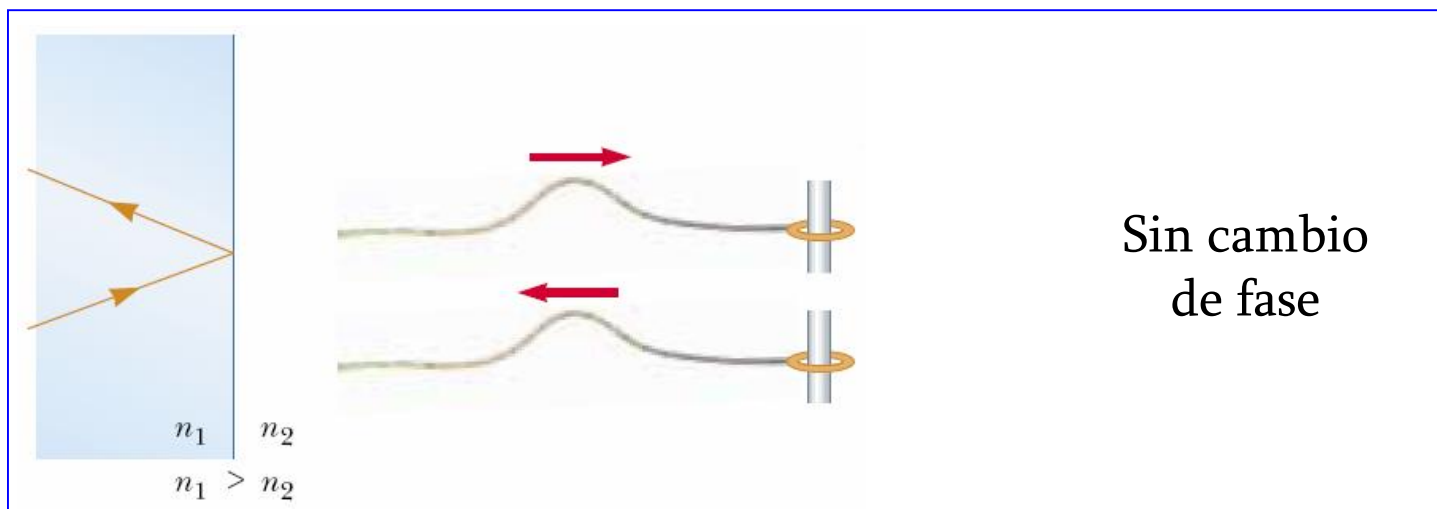
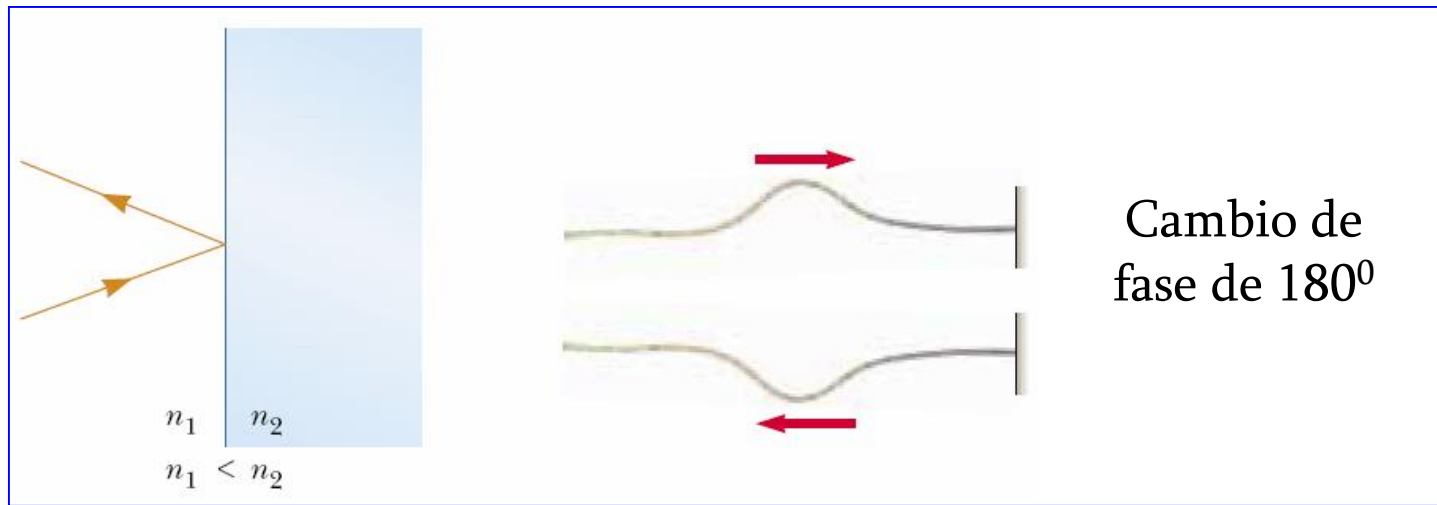


En este experimento se encuentra también un espectro de interferencia como en el experimento de doble rendija, pero con el patrón invertido, es decir, donde había zona brillante ahora aparece zona de oscuridad.

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° en la reflexión de un medio que tiene mayor índice de refracción que el medio en el cual está viajando la onda.**

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

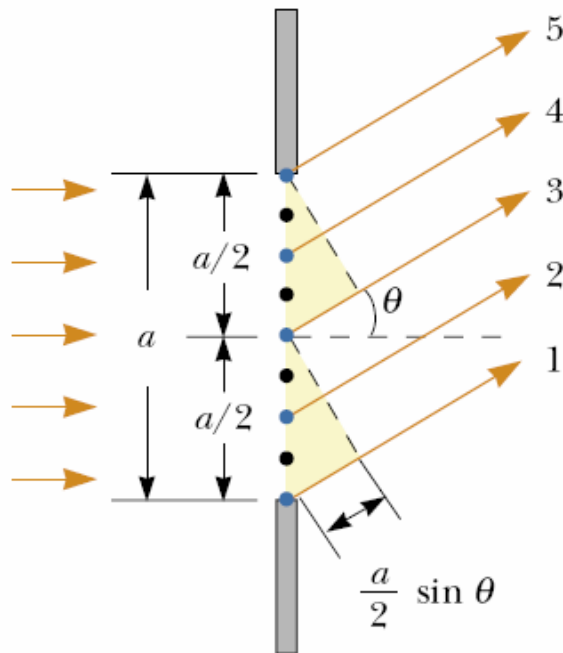
Cambio de fase por reflexión.



Difracción de rendijas estrechas. Resolución de apertura circular.

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

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

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

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

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

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

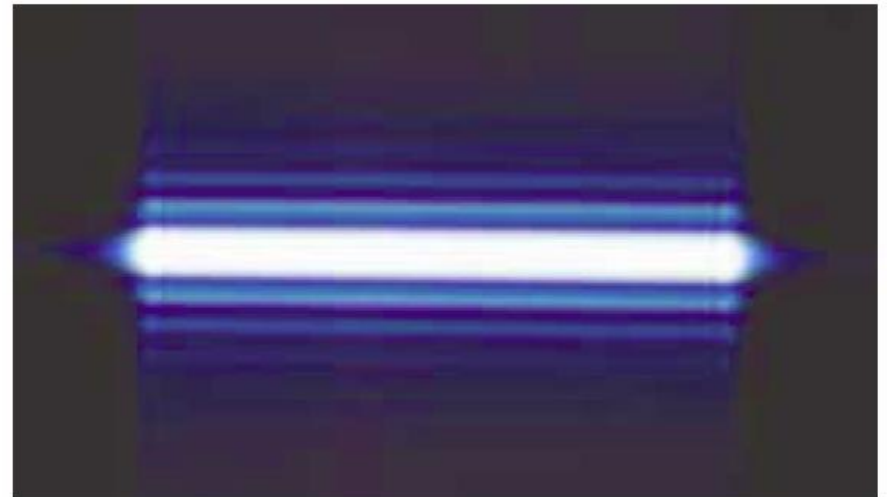
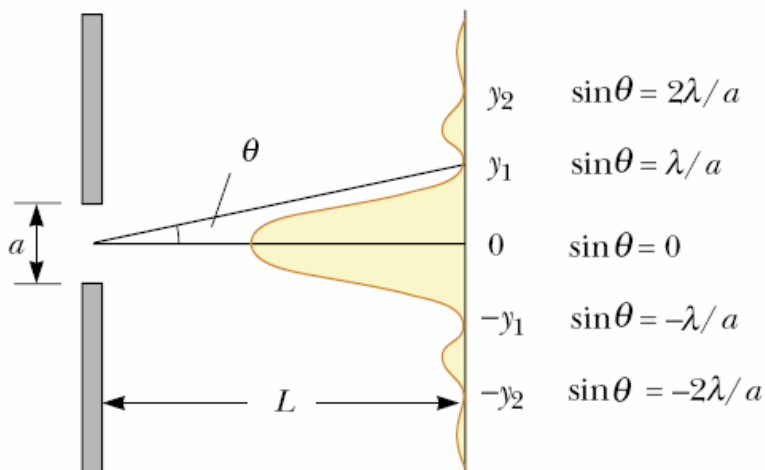
Difracción de rendijas estrechas. Resolución de apertura circular.

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 .

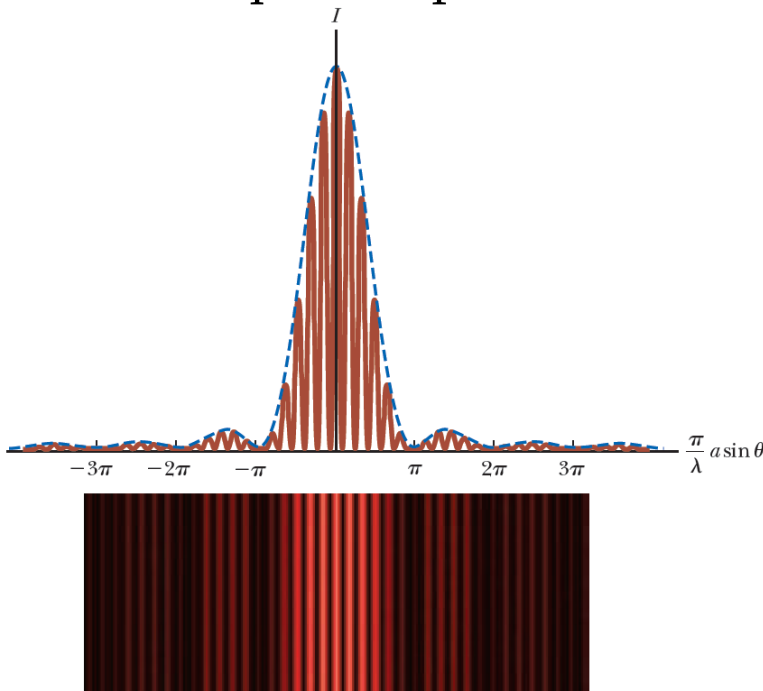


Difracción de rendijas estrechas. Resolución de apertura circular.

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.



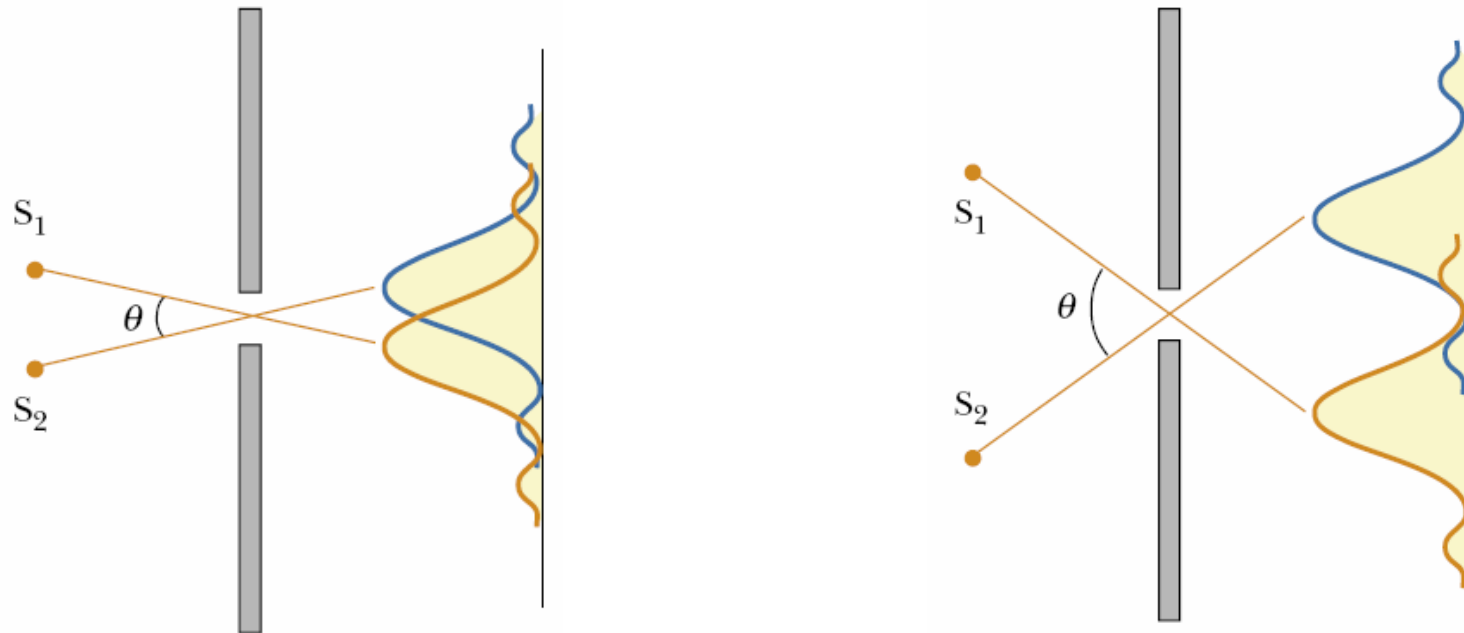
En la figura se muestra el patrón para ondas luminosas de 650nm que pasan por dos rendijas de $3.0\mu\text{m}$ y que están separadas $18\mu\text{m}$.

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

Difracción de rendijas estrechas. Resolución de apertura circular.

Resolución de apertura circular.

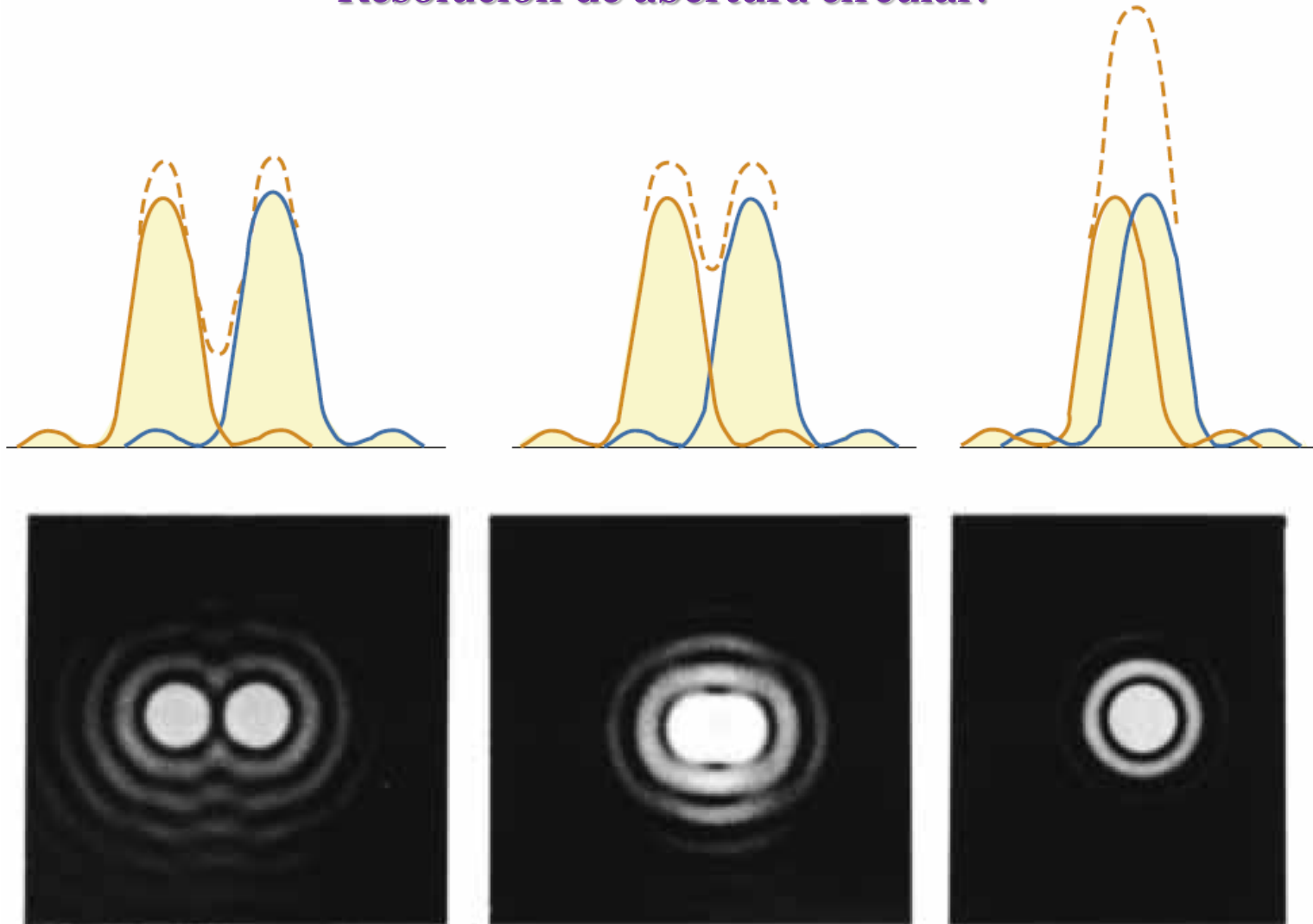
La capacidad de los sistemas ópticos para distinguir entre objetos muy próximos es limitada debido a la naturaleza ondulatoria de la luz.



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.

Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.

Resolución de abertura circular.



Difracción de rendijas estrechas. 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 λ , es

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

donde θ 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.

Difracción de rendijas estrechas. Resolución de apertura circular. Ejemplo.

Resolución de apertura circular.

Ejemplo. Si puede leer el renglón más bajo del diagrama de agudeza visual de su médico, su ojo tiene un poder de resolución de un minuto de arco (equivalente a $1/60$ de grado). Si este poder resolutivo está limitado por la difracción, ¿a qué diámetro efectivo del sistema óptico de su ojo corresponde este valor? Aplique el criterio de Rayleigh y suponga que $\lambda = 550nm$.

Solución.

Considerando que el ojo tiene apertura circular, en vez de rendijas, la resolución está dada por el criterio de Rayleigh, a saber

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

de donde D está dado por

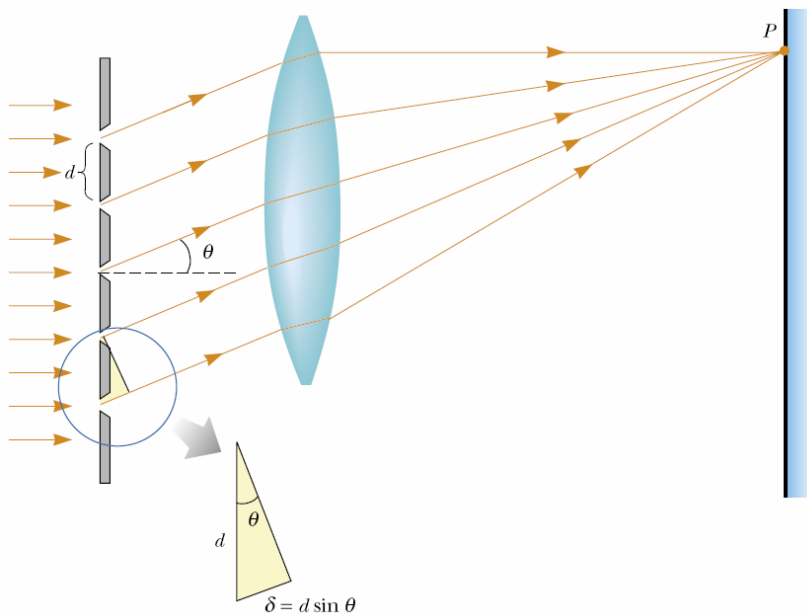
$$D = \frac{1.22\lambda}{\theta_{min}} = \frac{1.22(550 \times 10^{-9}m)}{2.908882 \times 10^{-4}rad} = 2.306728mm$$

La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

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 δ es la responsable de los fenómenos de difracción e interferencia, así que la condición para el máximo de interferencia de una rejilla es

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

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

La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

La rejilla de difracción.

Por ejemplo, los reflejos de colores del arco iris que se ven en la superficie de un CD son efectos de la rejilla de reflexión (en este caso).

Los surcos microscópicos en la superficie de un disco compacto actúan como una rejilla de difracción y dividen la luz blanca en los colores que la componen.

Los “surcos” o pistas son diminutos canales de $100nm$ de profundidad en la superficie del disco, con un espaciado radial uniforme $d = 1.60\mu m = 1600nm$.

La información se codifica en el CD haciendo variar la longitud de los fosos; el aspecto de rejilla de reflexión del disco es tan sólo una ventaja estética colateral.



La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

Espectrómetros de rejilla.

Las rejillas de difracción se utilizan extensamente para medir el espectro de la luz que emite una fuente, mediante un procedimiento que se conoce como **espectroscopia** o **espectrometría**. La luz que incide en una rejilla de espaciado conocido d se dispersa para formar un espectro.

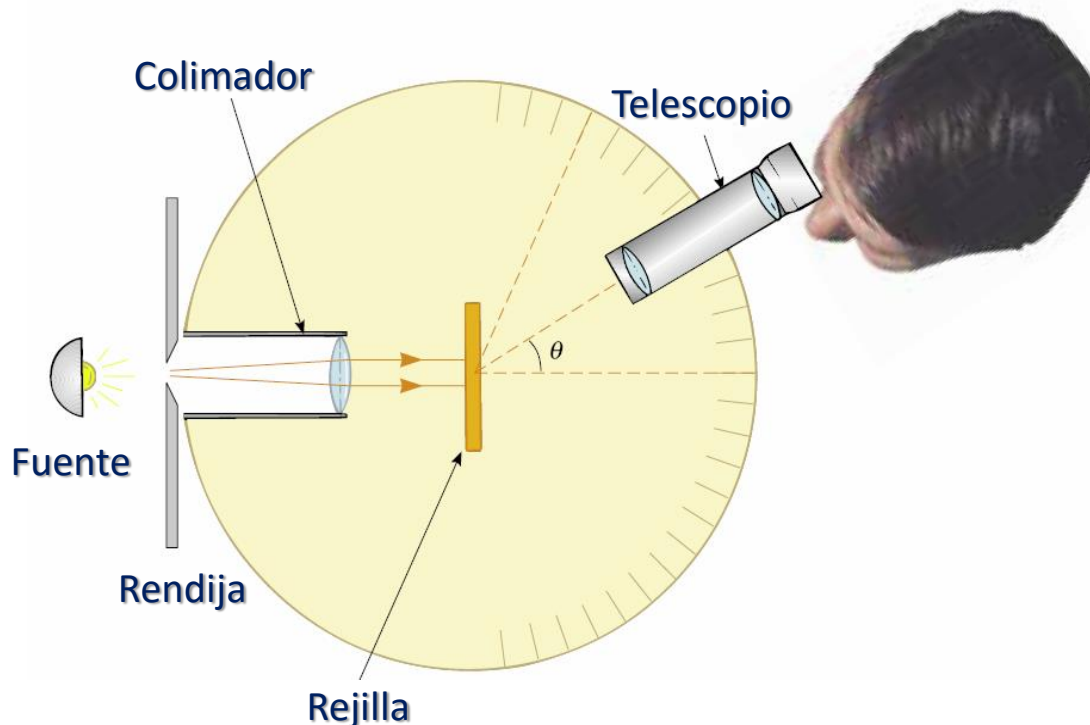


Diagrama de un espectrómetro de rejilla de difracción

Se miden entonces los ángulos de desviación de los máximos y se calcula la longitud de onda usando la ecuación

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

Conforme aumenta el número de ranuras en la rejilla se puede medir con mayor precisión el ángulo de desviación y, por lo tanto, la longitud de onda.

La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

Espectrómetros de rejilla.

Ejemplo. En un espectrómetro incide luz de manera normal sobre su rejilla de difracción que tiene 5000 *ranuras/cm*. (a) ¿Cuál es la longitud de onda que se desvía un ángulo de 13.5° en el primer orden? (b) ¿Cuál es la desviación de segundo orden de esta longitud de onda?

Solución.

Partiendo de que los ángulos de desviación de los máximos están dados por la ecuación

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

$$(a) \quad \lambda_1 = d \sin \theta = \left(\frac{0.01m}{5000} \right) \sin 13.5^\circ = 4.6689 \times 10^{-7} m = 466.89nm$$

$$(b) \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{2(4.6689 \times 10^{-7} m)}{\left(\frac{0.01m}{5000} \right)} \right) = 27.8326^\circ$$

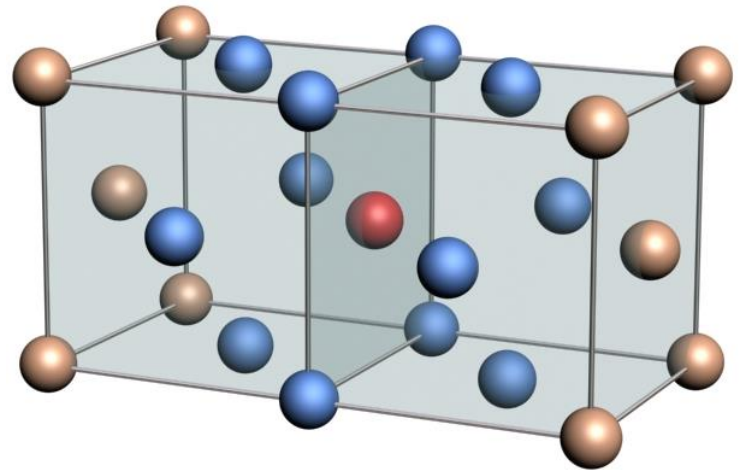
Difracción de rayos X mediante cristales.

Antecedentes

La idea de que los cristales son una repetición periódica de un grupo de moléculas ya existía anteriormente a que Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) descubriera los rayos X en 1895.

Aunque las distancias típicas entre los planos de la red cristalina se desconocían, se sabía que debían ser muy pequeñas comparadas con la longitud de onda de la luz visible.

Esto le dio al físico alemán Max von Laue (1879-1960) la idea de utilizar cristales de sulfato de cobre para determinar si los rayos X se componían de partículas u ondas: dedujo que, si fueran ondas, deberían generar un patrón de difracción al atravesar los cristales.

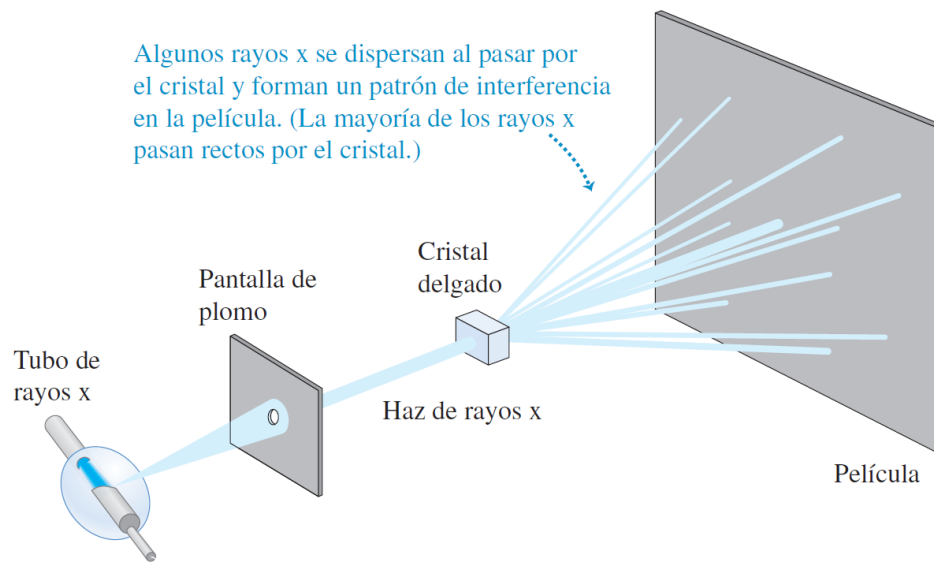


Difracción de rayos X mediante cristales.

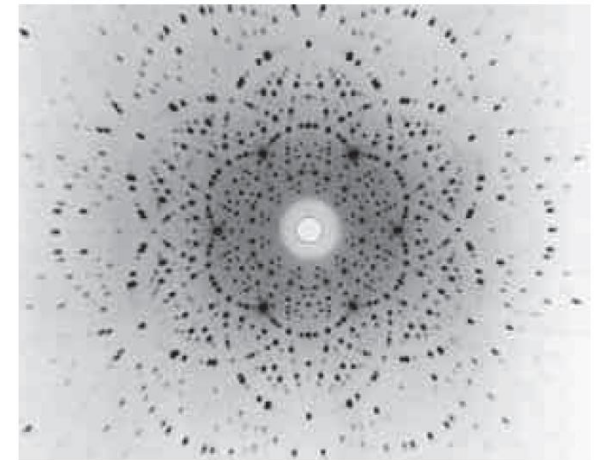
El experimento de Von Laue

Con la idea anterior, los primeros experimentos de difracción de rayos X fueron realizados en 1912 por Von Laue, con la ayuda de Walter Friedrich y Paul Knipping, empleando el sistema experimental bosquejado en la figura.

Los rayos X dispersados formaron un patrón de interferencia, el cual se registró en una película fotográfica.



Esquema del Experimento de Von Laue



Patrón de Von Laue de un cristal de berilio mineral. Cada punto representa un punto de interferencia constructiva

Difracción de rayos X mediante cristales.

La ley de Bragg

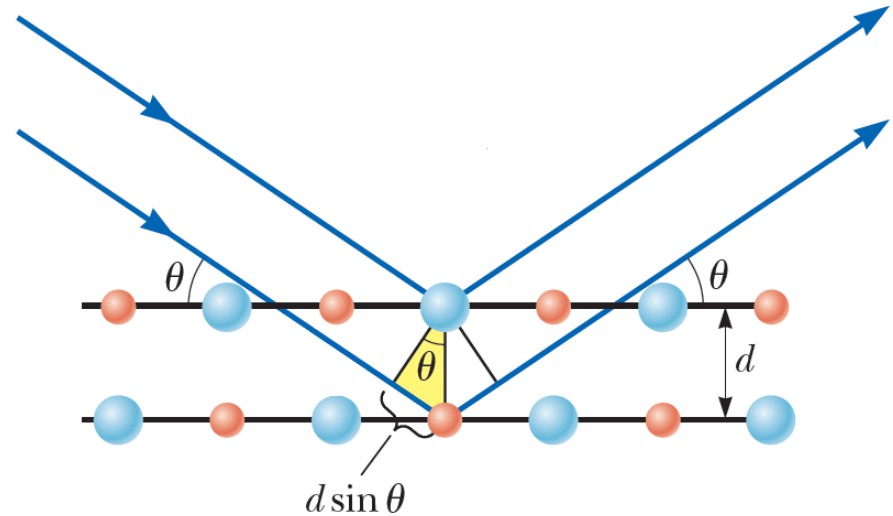
Cuando un haz de rayos X incide sobre un cristal con un cierto ángulo θ (con respecto a un plano del cristal), tal como se muestra en la figura, se observa un fenómeno de difracción.

La difracción en una dirección dada se debe

esencialmente a la relación entre las fases de todas las ondas reflejadas por cada celda unitaria del cristal en esa dirección.

La condición para que las ondas estén en fase es que la diferencia de sus caminos ópticos sea cero o un múltiplo entero n de la longitud de onda λ .

En un cristal, la diferencia en el camino óptico entre átomos situados en posiciones equivalentes en distintas celdas unitarias es $2d \sin \theta$, donde d es la distancia entre los planos de la red cristalina, tal como se muestra.



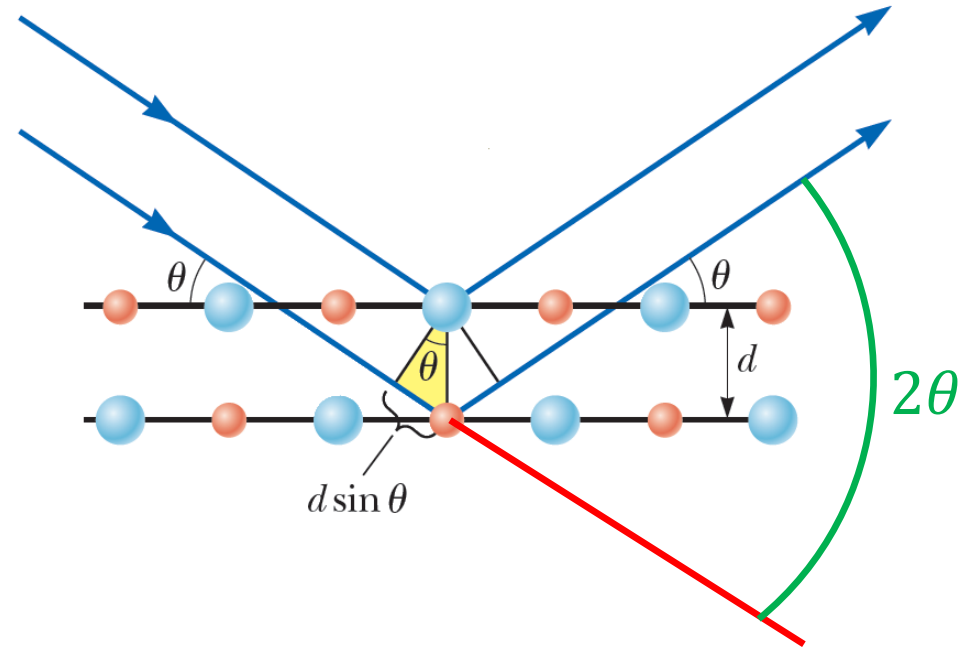
Difracción de rayos X mediante cristales.

La ley de Bragg

Con lo anterior, para que se observe interferencia constructiva de rayos X a un ángulo de observación 2θ respecto a la dirección de incidencia, se debe cumplir que

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Esta relación se conoce como
Ley de Bragg



Con estos experimentos se comprobó que los rayos X son ondas, o al menos tienen propiedades ondulatorias, y también que los átomos están dispuestos conforme a una distribución regular. A partir de entonces, la difracción de rayos X ha probado ser una herramienta de investigación muy valiosa, tanto para medir longitudes de onda de rayos X como para estudiar la estructura de cristales y moléculas complejas, como el ADN por ejemplo.

Difracción de rayos X mediante cristales.

La ley de Bragg. Un ejemplo

Ejemplo. Los átomos de un cristal dispersan rayos X con una longitud de onda de 0.0850nm . El máximo de segundo orden de la reflexión de Bragg se presenta cuando el ángulo θ es de 21.5° . ¿Cuál es la separación entre planos atómicos adyacentes en el cristal?

Solución.

Considerando como punto de arranque la Ley de Bragg tenemos que

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

de donde

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

Es decir

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{2(0.0850 \times 10^{-9}\text{m})}{2(\sin 21.5^\circ)} = 2.31923 \times 10^{-10}\text{m} = \boxed{2.32\text{\AA}}$$

Magnetismo y Óptica



Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

E-mail: roberto.duarte@didactica.fisica.uson.mx

Webpage: <http://rpduarte.fisica.uson.mx>

© 2016 Departamento de Física Universidad de Sonora