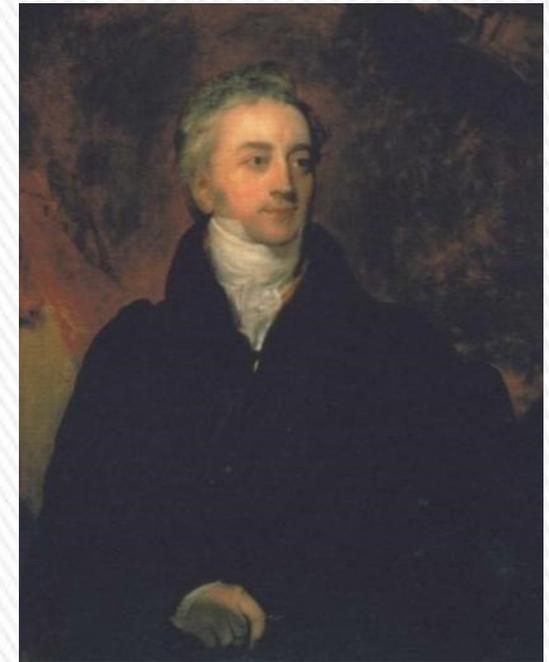


06.1-PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ



THOMAS YOUNG
(1773 – 1829)

Los colores en muchas de las plumas de un colibrí no se deben al pigmento. La *iridiscencia que provoca los colores refulgentes que con frecuencia aparecen en la garganta y pecho del ave se debe a un efecto de interferencia causado por las estructuras de las plumas. Los colores varían dependiendo del ángulo de vista.*

Un prodigio!!!

A los 2 años leía, a los 4 había leído la Biblia dos veces, a los 14 sabía 8 idiomas!!

INTRODUCCIÓN

Se observan reflejos multicolores en las superficies de las pompas de jabón, en un derrame de aceite sobre un charco de agua, en las plumas de un colibrí y en los discos compactos...

¿Cómo es posible que objetos sin color produzcan estos llamativos colores?

Hemos visto que la luz es, en esencia, una *onda*, y en ciertas situaciones tenemos que considerar de manera explícita sus propiedades ondulatorias.

Si dos o más ondas de luz de la misma frecuencia se superponen en un punto, el efecto total depende de las *fases* de las ondas así como de su amplitud.

Los patrones resultantes de luz son **consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz y no es posible entenderlos sobre la base de los rayos.**

Los efectos ópticos que dependen de la naturaleza ondulatoria de la luz se estudian en el ámbito de la **óptica física**.

Veremos los fenómenos de **interferencia** que ocurren cuando se combinan dos ondas. Los colores observados en las películas de aceite y las pompas de jabón son el resultado de la interferencia entre la luz reflejada en las superficies frontal y posterior de una capa delgada de aceite o una solución jabonosa.

El término **interferencia** se refiere a cualquier situación en la que dos o más ondas se superponen en el espacio y se aplica el principio de superposición.

Principio de superposición: 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 como si cada una se presentara sola. 

Interferencia y fuentes coherentes

El término “desplazamiento” se usa en un sentido general.

Cuando se trata de ondas en la superficie de un líquido, se refiere al desplazamiento real de la superficie, hacia arriba o hacia abajo de su nivel normal.

En el caso de las ondas sonoras, el término se refiere a un exceso o una deficiencia de presión.

En el caso de las ondas electromagnéticas, por lo general se refiere a una componente específica del campo eléctrico o magnético.

Las ondas de luz también se interfieren entre ellas.

Los efectos de interferencia se ven más fácilmente cuando se combinan ondas *sinusoidales* de una sola frecuencia f y longitud de onda λ .

En óptica, las ondas sinusoidales son características de la **luz monocromática**.

Si bien es muy fácil generar ondas de agua o sonoras de una sola frecuencia, las fuentes comunes de luz *no* emiten luz monocromática (de una sola frecuencia).

Por ejemplo, las bombillas incandescentes y las llamas emiten una distribución continua de longitudes de onda.

Por el momento, la fuente que más se acerca a ser monocromática de entre todas las que se dispone actualmente es el *láser*.

Para analizar la interferencia de ondas luminosas, supondremos dos fuentes que producen ondas de la misma amplitud y la misma longitud de onda λ , pero que además las **dos fuentes están permanentemente en fase**; vibran al unísono. 

Esto se puede lograr con dos pequeñas ranuras en una pantalla opaca, iluminada por la misma fuente de luz monocromática.

Interferencia y fuentes coherentes

Si no hubiera una relación de fase constante entre ambas fuentes, los fenómenos que vamos a estudiar no ocurrirían.

Se dice que dos fuentes monocromáticas de la misma frecuencia y con una relación de fase constante definida (no necesariamente en fase) son **coherentes**.

Si las ondas emitidas por las dos fuentes coherentes son *transversales*, como las ondas electromagnéticas, entonces también supondremos que las perturbaciones ondulatorias producidas por ambas fuentes tienen la misma *polarización* (*oscilan en el mismo plano y dirección*).

Con este agregado, se puede describir cada onda solamente se necesita una función escalar; lo que hace el análisis más fácil.

Consideremos que efectivamente *colocamos las dos fuentes S_1 y S_2 de igual amplitud, igual longitud de onda y (si las sondas son transversales) la misma polarización a lo largo del eje y , equidistantes del origen.*

Vamos a considerar la superposición de las ondas provenientes de estas dos fuentes, en distintos puntos teniendo en cuenta que el recorrido de la onda que sale de S_1 para llegar a los distintos puntos vale r_1 , mientras que las distancias de S_2 a los distintos puntos es r_2 .

Tendremos casos en que la diferencia de recorridos Δr sea tal que que las ondas lleguen en fase (porque recorren la misma distancia o la diferencia de caminos es un número entero de longitudes de onda) y entonces lleguen los máximos juntos, o también en puntos en los que puedan llegar con una diferencia de fase de medio ciclo, por lo que cuando llega un máximo de una onda, llega un mínimo de la otra.

Interferencia y fuentes coherentes

Los átomos en una fuente radian por lo general en una relación de fase no sincronizada y aleatoria, y la luz que se emite desde *dos fuentes* como esta no tiene relación de fase definida.

Sin embargo, la luz procedente de una sola fuente se puede dividir de manera que partes de ella emerjan de dos o más regiones del espacio formando dos o más *fuentes secundarias*.

Entonces, cualquier cambio de fase aleatorio en la fuente afecta estas fuentes secundarias por igual y no cambia sus fases relativas.

La característica distintiva de la luz de un *láser* es que la emisión de luz de muchos átomos está sincronizada en cuanto a frecuencia y fase.

Como resultado, los cambios de fase aleatorios que mencionamos antes ocurren con mucho menor frecuencia.



Interferencia y fuentes coherentes

CONDICIONES PARA OBSERVACIÓN DE LA INTERFERENCIA:

Las fuentes deben ser:

Coherentes- deben mantener la fase constante respecto de otra.

Monocromáticas, es decir, de una sola longitud de onda.

Si las **ondas** emitidas por las dos fuentes coherentes son **transversales**, como las ondas electromagnéticas, entonces también se debe suponer que las ondas que producen ambas fuentes **tienen la misma polarización lineal** (se encuentran sobre la misma línea).

Las ondas de luz de una fuente ordinaria experimenta cambios de fase aleatorios en intervalos menores a un nanosegundo (10^{-9} s).

Las condiciones para interferencia (constructiva, destructiva, o algún estado intermedio) se mantienen sólo durante estos intervalos de tiempo.

Como el ojo humano no puede seguir cambios tan rápidos, no se observan efectos de interferencia. Se dice que estas fuentes de luz son **incoherentes**.

Las ondas de sonido de una sola frecuencia emitidas por dos altavoces colocados uno al lado del otro y activados por un solo amplificador pueden interferir entre sí porque los dos altavoces son coherentes, es decir, responden al amplificador de la misma forma en el mismo tiempo.

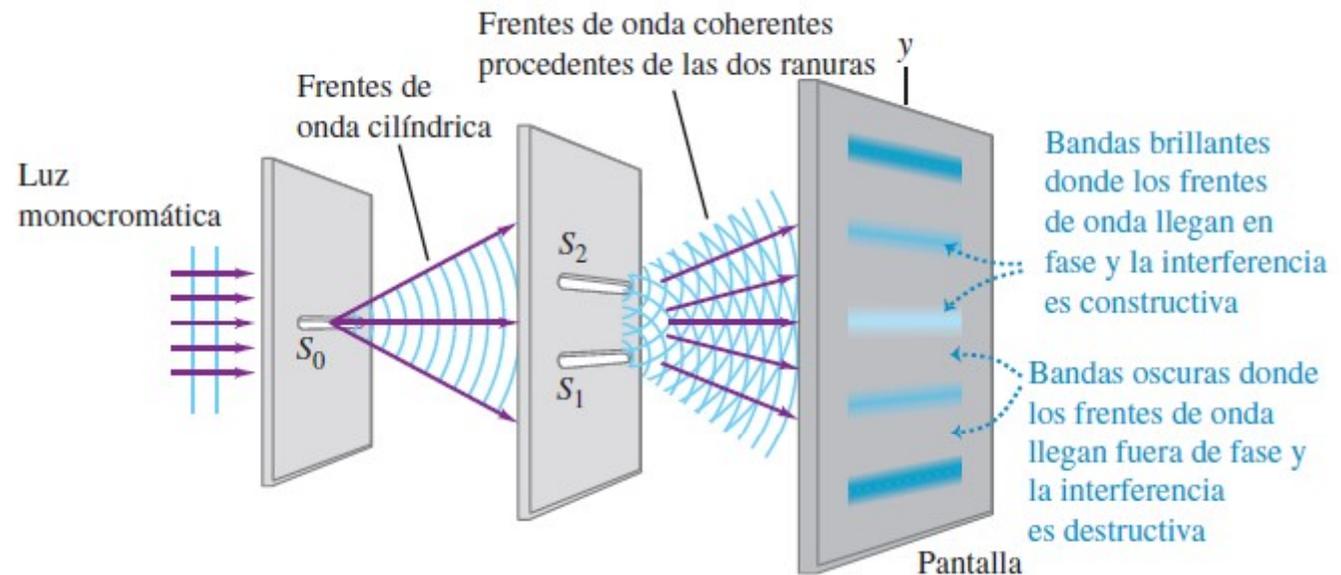
Interferencia de luz procedente de dos fuentes

Uno de los primeros experimentos cuantitativos para poner de manifiesto la interferencia de la luz de dos fuentes fue realizado por el científico inglés Thomas Young en 1800.

Se muestra en perspectiva el aparato de Young.

Una fuente (no mostrada) emite luz monocromática; que se dirige a una pantalla que tiene una ranura angosta, S_0 , de 1 mm más o menos de ancho.

a) Interferencia de las ondas de luz que pasan a través de dos ranuras

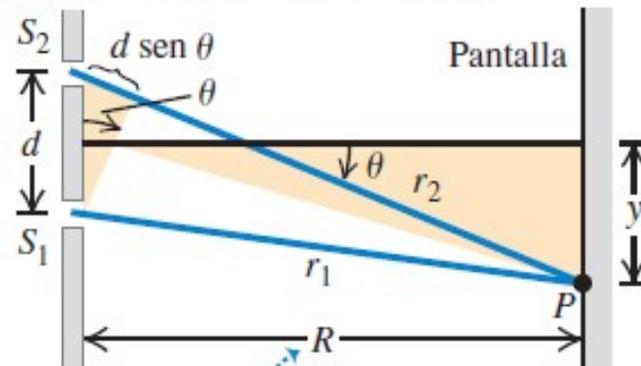


En versiones modernas del experimento se utiliza un láser como fuente de luz coherente, por lo que no se necesita la ranura S_0 . La luz que sale de S_0 ilumina una pantalla que tiene otras dos ranuras S_1 y S_2 , cada una con un ancho aproximado de $1 \mu\text{m}$ y separadas por una distancia de algunas decenas o centenas de micrómetros. A partir de S_0 se propagan ondas que llegan a S_1 y S_2 en fase porque recorren distancias iguales desde S_0 . Por lo tanto, las ondas que emergen de las ranuras S_1 y S_2 también están en fase siempre, por lo que S_1 y S_2 son fuentes coherentes. La interferencia de las ondas de S_1 y S_2 genera un patrón en el espacio como el que aparece a la derecha de las fuentes en las figura.

Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

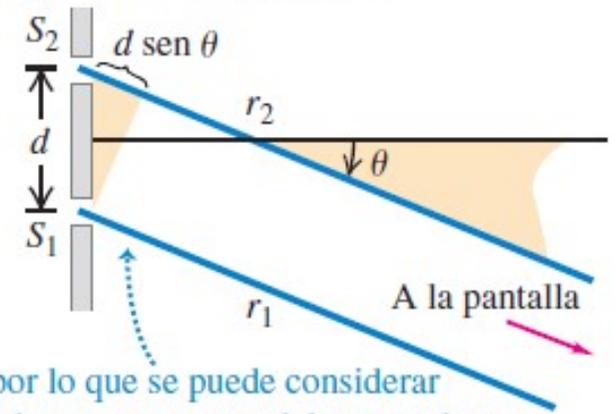
Para visualizar el patrón de interferencia, se coloca una pantalla de manera que la luz procedente de S_1 y S_2 incida sobre ella.

b) Geometría real (vista lateral)



En situaciones reales, la distancia R a la pantalla por lo general es mucho mayor que la distancia d entre las ranuras...

c) Geometría aproximada



... por lo que se puede considerar que los rayos son paralelos; en tal caso, la diferencia de la longitud de sus trayectorias es simplemente $r_2 - r_1 = d \sin \theta$.

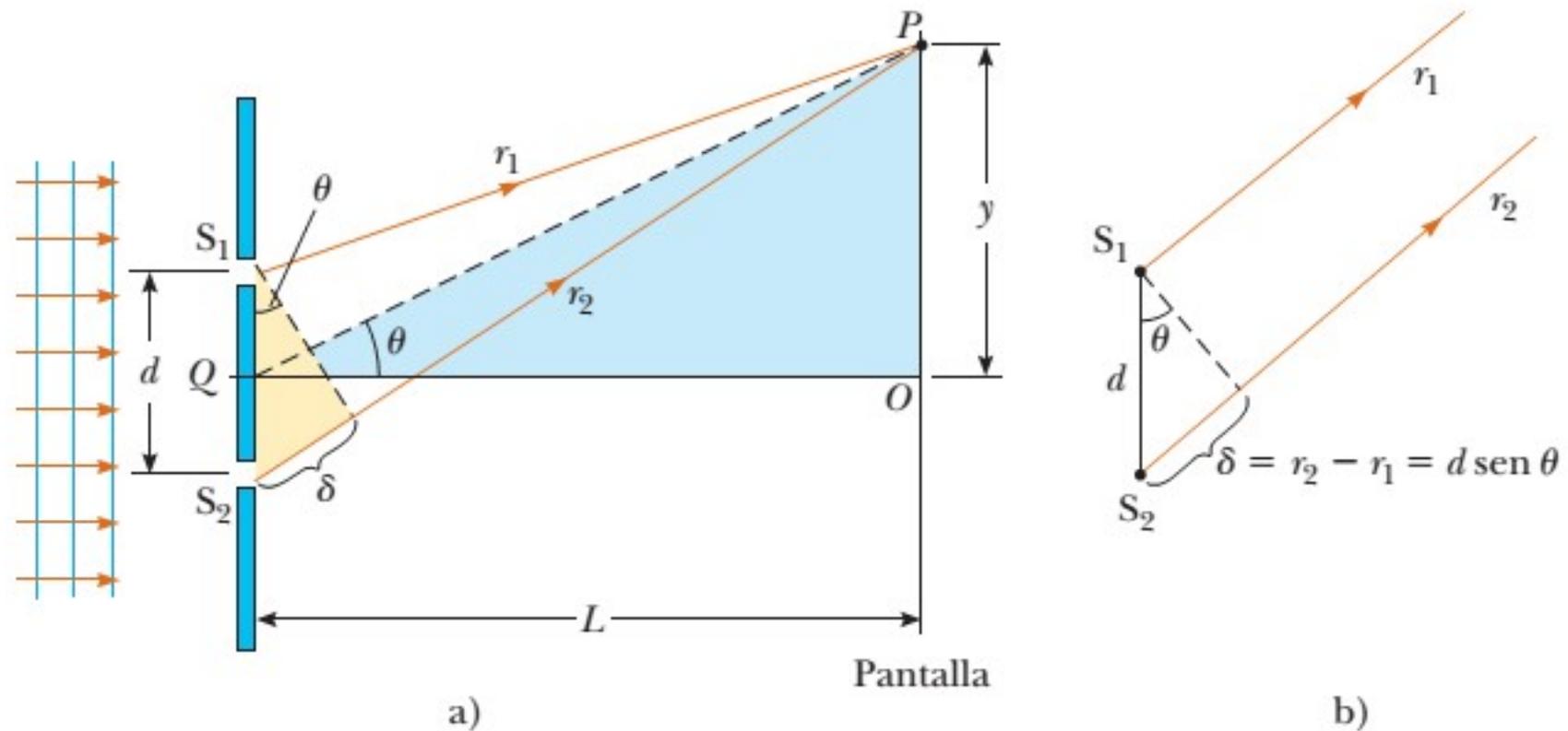
La pantalla se iluminará con intensidad máxima en los puntos P en los que las ondas luminosas procedentes de las ranuras interfieren constructivamente, y será más oscura en los puntos donde la interferencia es destructiva.

Para simplificar el análisis del experimento de Young, suponemos que la distancia R de las ranuras a la pantalla es tan grande en comparación con la distancia d entre las ranuras, que las líneas de S_1 y S_2 a P son casi paralelas, como se aprecia en la figura. Por lo general, este es el caso para experimentos con luz; es común que la separación entre las ranuras sea de unos cuantos milímetros, mientras que la pantalla está a un metro o más.

La diferencia de la longitud de las trayectorias está dada por:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA DE YOUNG



a) Construcción geométrica del experimento de doble ranura de Young (que no está a escala).

b) Cuando supone que r_1 es paralelo a r_2 , la diferencia de trayectoria entre los dos rayos es $r_2 - r_1 = d \cdot \text{sen}(\theta)$

Para que esta aproximación sea válida, es esencial que $L \gg d$.

Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

$\Delta r = r_2 - r_1 = d \sin \theta$ θ es el ángulo entre una línea desde las ranuras a la pantalla y la normal al plano de las ranuras.

Interferencia constructiva y destructiva con dos ranuras

La interferencia constructiva ocurre en aquellos puntos donde la diferencia de las trayectorias es un número entero de longitudes de onda, $m\lambda$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ las regiones brillantes en la pantalla se presentan en ángulos θ en los que:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$$

interferencia constructiva,
dos ranuras

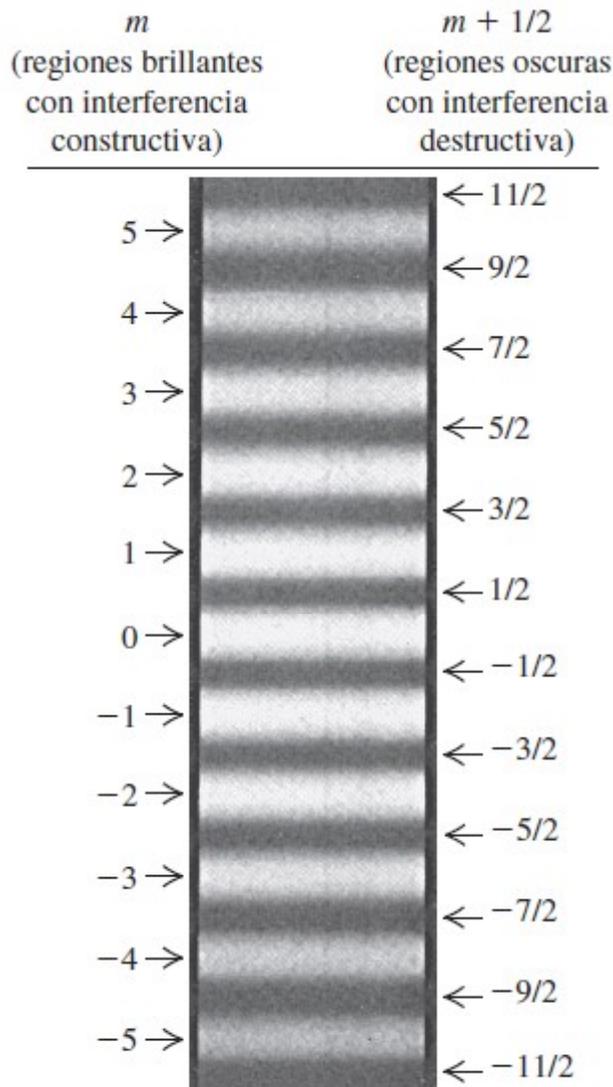
La interferencia destructiva que forma las regiones oscuras en la pantalla en los puntos para los que la diferencia de las trayectorias es un número semi-entero de longitudes de onda

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

interferencia destructiva,
dos ranuras

Aunque se ha descrito el experimento realizado por Young con luz visible, los resultados dados en las ecuaciones son válidos para cualquier tipo de onda, siempre y cuando la onda resultante de las dos fuentes coherentes se ubique en un punto que esté muy alejado en comparación con la separación d .

Interferencia de la luz procedente de dos fuentes



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

La figura muestra una fotografía de ese patrón. El centro del patrón es una banda brillante que corresponde a $m = 0$; *este punto de la pantalla es equidistante a las dos ranuras.*

Sea y_m *la distancia entre el centro del patrón ($\theta = 0$) al centro de la m -ésima banda brillante.* Sea θ_m el valor correspondiente de θ ; así que: $y_m = R \tan \theta_m$

En estos experimentos, las distancias y_m *a menudo son mucho más pequeñas que la distancia R entre las ranuras y la pantalla.* Como θ_m es muy pequeño, $\tan \theta_m$ es casi igual a $\sin \theta_m$,

Entonces para ángulos pequeños:

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

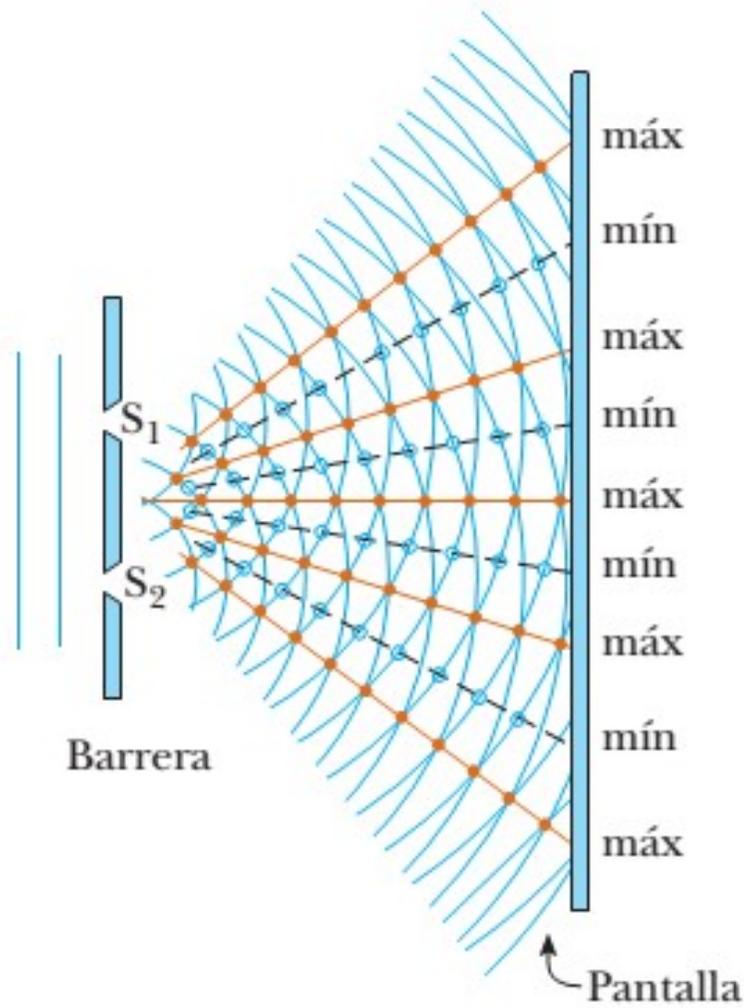
$$d \frac{y_m}{R} = m\lambda$$

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

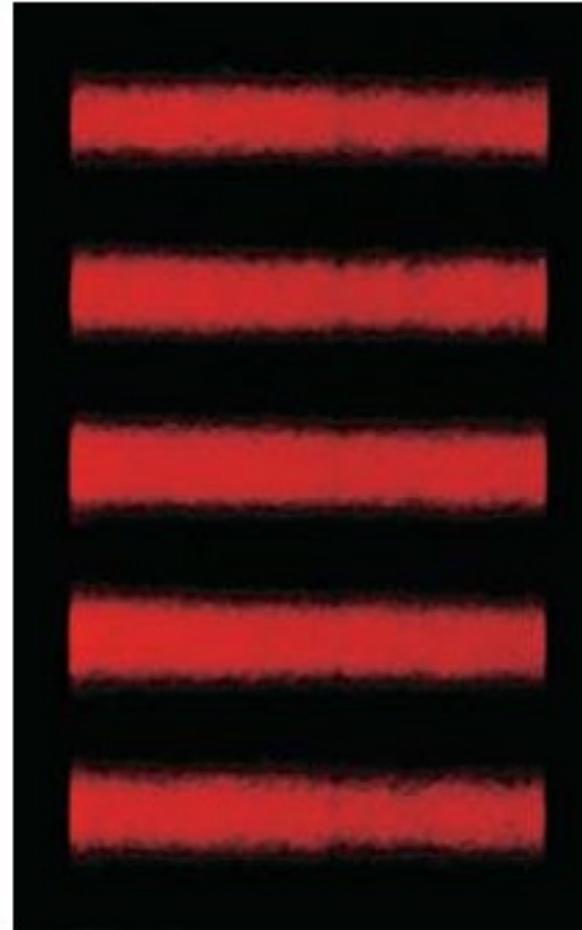
Es posible medir R y d , así como las posiciones y_m de las franjas brillantes, por lo que este experimento permite una medición directa de la longitud de onda λ .

El experimento de Young fue, de hecho, la primera medición directa de las longitudes de onda de la luz.

EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA DE YOUNG



a)



b)

a) Diagrama esquemático del experimento de doble ranura de Young. Las ranuras S_1 y S_2 se comportan como fuentes coherentes de ondas de luz que producen un patrón de interferencia en la pantalla (el dibujo no está a escala).

b) Amplificación del centro de un patrón de franjas formado en la pantalla.

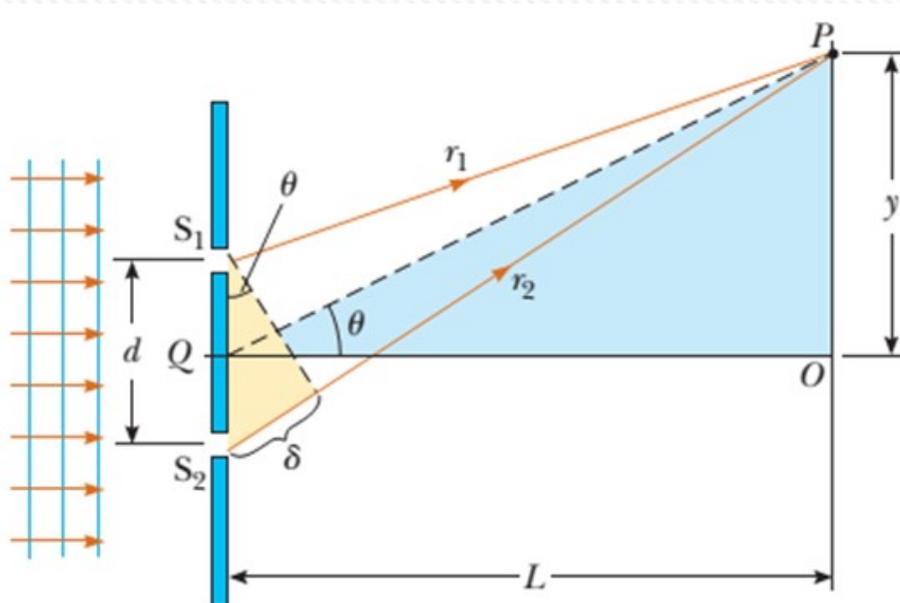
EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA DE YOUNG

Diferencia de recorrido: $\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$

Condición de máximos: $d \sin \theta_{\text{brillante}} = m\lambda$

Condición de mínimos: $d \sin \theta_{\text{oscuro}} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$
($m = 0, \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$)

Teniendo en cuenta que $\tan \theta = \frac{y}{L}$
y que los ángulos son pequeños de modo de poder aproximar:
 $\tan \theta \approx \sin \theta$ resulta



$$y_{\text{brillante}} = L \left(\frac{m\lambda}{d} \right)$$

INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS

Efectos de interferencia se observan en películas delgadas, por ejemplo en capas finas de aceite sobre agua o en la delgada superficie de una burbuja de jabón. Por delgadas entendemos de un espesor del orden de una longitud de onda. Los colores que se ven cuando incide luz blanca sobre estas películas resultan por la interferencia de ondas que se reflejan desde las dos superficies de la película.



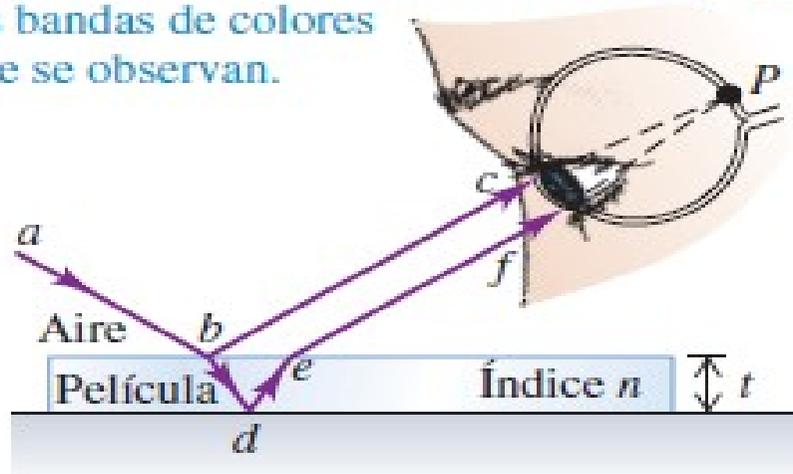
a) Una película delgada de aceite (o algún hidrocarburo) sobre agua muestra interferencia, como se observa en la configuración de colores cuando se hace incidir luz blanca sobre la película. Variaciones en el grosor de la película producen una interesante configuración de colores. La hoja de afeitar da una idea del tamaño de las franjas de colores.

b) Interferencia en burbujas de jabón. Los colores se deben a la interferencia entre rayos de luz reflejados desde las superficies anterior y posterior de la delgada película de jabón que da lugar a la burbuja. El color depende del grosor de la película, que va de negro donde la película es más delgada hasta magenta donde es más gruesa.

Interferencia en películas delgadas

La luz reflejada en las superficies superior e inferior de la película llega junta al punto P en el ojo y experimenta interferencia.

Algunos colores interfieren de forma constructiva y otros de forma destructiva, lo que genera las bandas de colores que se observan.



La luz que ilumina la cara superior de una película delgada con espesor t se refleja parcialmente en esa superficie (trayectoria abc).

La luz transmitida a través de la superficie superior se refleja parcialmente en la superficie inferior (trayectoria $abdef$).

Las dos ondas reflejadas llegan juntas al punto P en la retina del ojo.

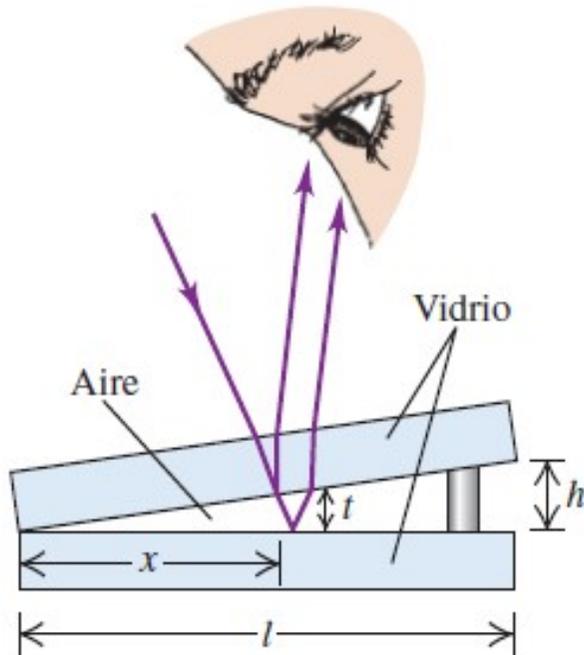
Dependiendo de la relación de fase, interferirán en forma constructiva o destructiva.

Diferentes colores tienen distintas longitudes de onda, por lo que la interferencia puede ser constructiva para unos colores y destructiva para otros.

Por esa razón se observan anillos o franjas de colores en una fina capa de aceite que flota en agua y en las películas delgadas de una solución jabonosa que forma las paredes de la burbuja.

Las formas complejas de los anillos de colores que aparecen en las fotografías son el resultado de las variaciones en el espesor de la película.

Interferencia en película delgada y cambios de fase durante la reflexión



Luz *monocromática* se refleja en dos superficies casi paralelas con incidencia casi normal: dos placas de vidrio separadas por una delgada cuña, o película, de aire.

Queremos considerar la interferencia entre las dos ondas de luz reflejadas en las superficies adyacentes a la cuña de aire, como se muestra.

También ocurren reflexiones en la cara superior de la placa de arriba y en la superficie inferior de la placa de abajo; para no complicar nuestro análisis, no las incluiremos.

La situación es la misma que en la situación anterior, *excepto que* el espesor de la película (cuña) no es uniforme. La diferencia de las trayectorias 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*, se espera que haya interferencia constructiva y una zona brillante; ahí donde hay un valor equivalente a un número semientero de longitudes de onda, es de esperar que la interferencia sea destructiva y que haya un área oscura.

A lo largo de la línea donde las placas están en contacto, prácticamente *no hay diferencia en las trayectorias*, por lo que se espera una región brillante

Cuando se efectúa el experimento, aparecen las franjas brillantes y oscuras, ¡pero están intercambiadas!

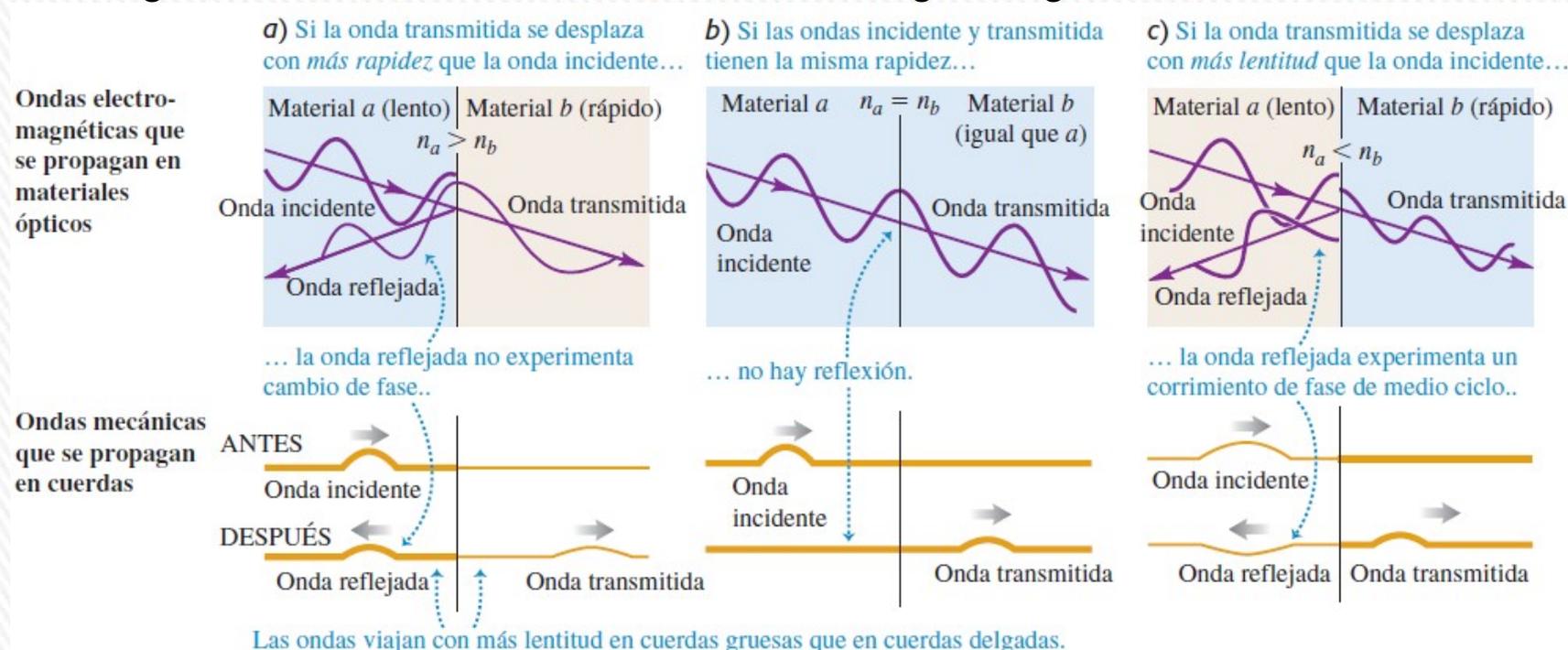
Interferencia en película delgada y cambios de fase durante la reflexión

A lo largo de la línea donde las placas están en contacto se halla una franja *oscura*, no una brillante. Esto sugiere que una u otra de las ondas reflejadas ha experimentado un cambio de fase de medio ciclo durante su reflexión.

En ese caso, las dos ondas que se reflejan en la línea de contacto están medio ciclo fuera de fase aun cuando tengan la misma longitud de trayectoria.

De hecho, este cambio de fase puede predecirse a partir de las ecuaciones de Maxwell y de la naturaleza electromagnética de la luz.

Este resultado demuestra que las amplitudes incidente y reflejada tienen el mismo signo cuando n_a es más grande que n_b , y signo contrario cuando n_b es mayor que n_a . Se distinguen tres casos, como se ilustra en la figura siguiente



Interferencia en película delgada y cambios de fase durante la reflexión

Figura a: Cuando $n_a > n_b$, la luz viaja con más lentitud en el primer material que en el segundo.

En este caso, E_r y E_i tienen el mismo signo, y **el corrimiento de fase de la onda reflejada en relación con la onda incidente es de cero.**

Análogo a la reflexión de una onda mecánica transversal en una cuerda pesada en un punto en que está atada con otra cuerda más ligera o con un anillo que se puede mover en forma vertical sin fricción.

Figura b: Cuando $n_a = n_b$, la amplitud E_r de la onda reflejada es cero. La onda luminosa incidente no puede “ver” la interfase y no hay una onda reflejada

Figura c: Cuando $n_a < n_b$, la luz viaja con más lentitud en el segundo material que en el primero.

En este caso, E_r y E_i tienen signos opuestos y **el corrimiento de fase de la onda reflejada en relación con la onda incidente es π rad (180° o medio ciclo).**

Esto es análogo a la reflexión (con inversión) de una onda mecánica transversal en una cuerda ligera en un punto donde está atada a otra más pesada o a un soporte rígido.



INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS

En el caso de la onda reflejada por la superficie superior de la cuña de aire, n_a (vidrio) es mayor que n_b , por lo que esta onda tiene un corrimiento de fase igual a cero.

En el caso de la onda reflejada por la superficie inferior, n_a (aire) es menor que n_b (vidrio), por lo que esta onda tiene un corrimiento de fase de medio ciclo. Las ondas reflejadas en la línea de contacto no tienen diferencia de trayectorias que den corrimientos de fase adicionales, e interfieren destructivamente.

Si la película tiene espesor t , la luz tiene incidencia normal y longitud de onda λ_n 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:

Reflexión constructiva $2t = m\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$

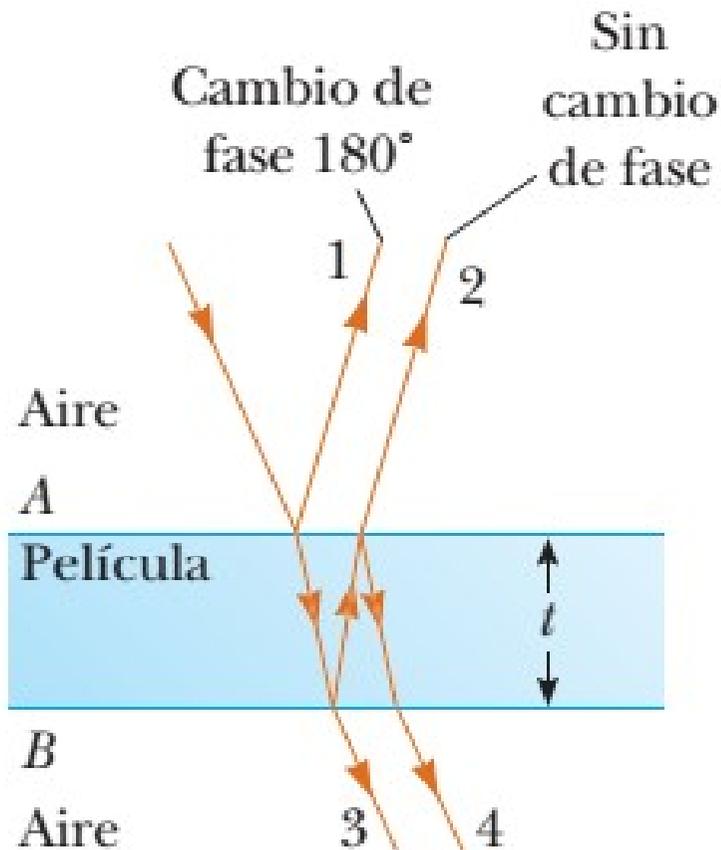
Reflexión destructiva: $2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$

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:

Reflexión constructiva $2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Reflexión destructiva: $2t = m\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$

INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS



Condición para la interferencia **constructiva** en películas delgadas

incidencia casi normal desde al aire a un medio ópticamente más denso de índice de refracción n

Distancia extra recorrida por el rayo 2: $2t$

Longitud de onda en película: $\lambda_n = \lambda/n$

Cambio de fase en 180° en reflexión

interface aire-película

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Condición que toma en cuenta dos factores: 1) diferencia en la distancia de trayectoria para los dos rayos (el término $m \lambda_n$) y 2) cambio de fase de 180° por reflexión (el término $(1/2) \lambda_n$).

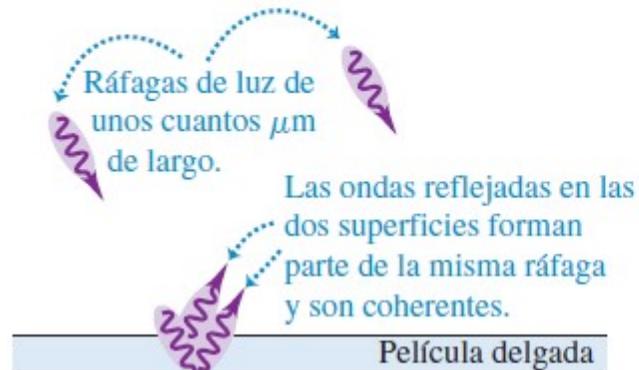
Condición para la interferencia destructiva (Si la distancia extra $2t$ recorrida por el rayo 2 corresponde a un múltiplo de λ_n)

$$2nt = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

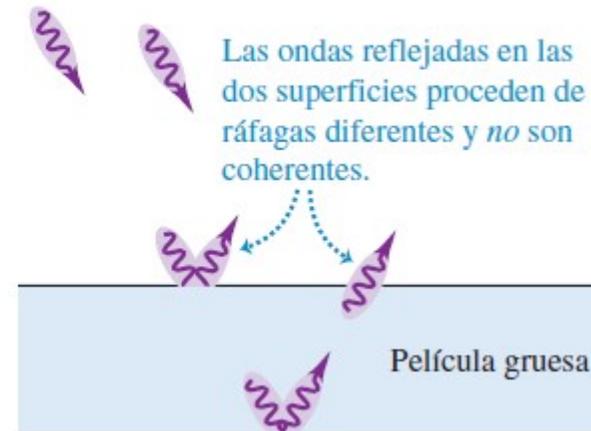
Interferencia en películas delgadas

Películas delgadas y gruesas

a) Luz reflejada en una película delgada



b) Luz reflejada en una película gruesa



Para que dos ondas causen un patrón de interferencia estable, deben ser *coherentes*. El Sol y las bombillas eléctricas emiten luz en una corriente de pequeñas ráfagas, c/u de las cuales mide solo unos cuantos micrómetros de longitud.

Si la luz se refleja en las dos superficies de una película delgada, las dos ondas reflejadas forman parte de la misma ráfaga (figura a).

Por lo tanto, estas ondas son coherentes y se produce la interferencia.

Sin embargo, si la película es demasiado gruesa, las dos ondas reflejadas pertenecerán a ráfagas diferentes (figura b). *Entre distintas ráfagas de luz no hay una relación de fase definida*, por lo que las dos ondas son incoherentes y no hay un patrón de interferencia fijo.

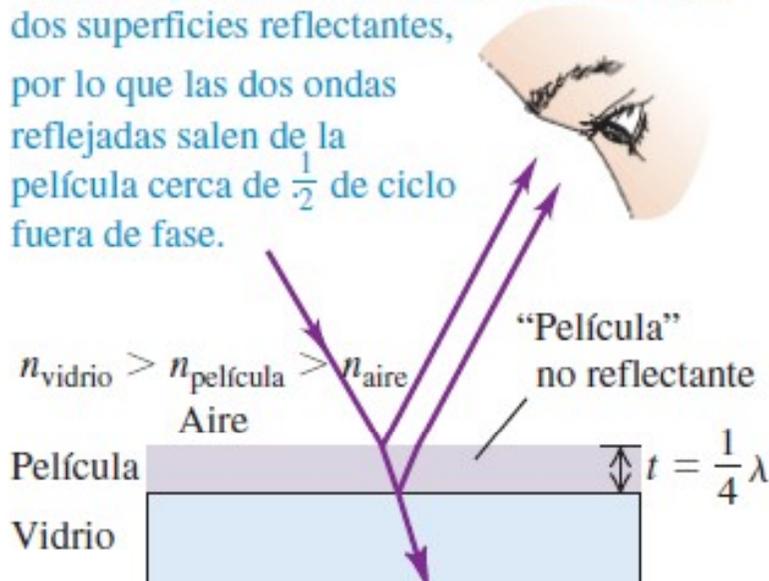
Por eso vemos los colores de interferencia en la luz reflejada en la superficie resbalosa de una película de aceite con espesor de unos cuantos micrómetros, *pero no* vemos esos colores en la luz reflejada en el cristal de una ventana de vidrio que tiene unos cuantos milímetros de grueso (miles de veces mayor).

Recubrimientos reflectantes y no reflectantes

La interferencia destructiva ocurre cuando

- la película tiene un espesor de $\frac{1}{4}\lambda$ y
- la luz experimenta un cambio de fase en las dos superficies reflectantes,

por lo que las dos ondas reflejadas salen de la película cerca de $\frac{1}{2}$ de ciclo fuera de fase.



Los recubrimientos no reflectantes para superficies de lentes se basan en la interferencia en películas delgadas.

Sobre la superficie de la lente se deposita una capa o película delgada de material duro transparente con índice de refracción menor que el del vidrio, como se muestra en la figura. La luz se refleja en ambas superficies de la capa.

En los dos casos la luz se refleja de un medio de índice mayor que el del medio en el que se propaga, por lo que ocurre el mismo cambio de fase en ambas reflexiones.

Si el espesor de la película es la cuarta parte (un cuarto) de la longitud de onda *en la película* (se supone incidencia normal), la diferencia total de las trayectorias es de media longitud de onda.

De esta forma, la luz reflejada en la primera superficie está medio ciclo fuera de fase con respecto a la luz reflejada en la segunda, y hay interferencia destructiva.

El espesor del recubrimiento no reflectante se puede hacer de un cuarto de longitud de onda solo para una longitud de onda en particular.

Recubrimientos reflectantes y no reflectantes



Se elige de la parte central amarillo verdosa del espectro ($\lambda = 550 \text{ nm}$), para la que el ojo tiene mayor sensibilidad.

Entonces hay un poco más de reflexión tanto en las longitudes de onda más largas (rojo) como en las más cortas (azul), y la luz reflejada tiene una tonalidad púrpura.

De esta manera, la reflexión total en la superficie de una lente o un prisma se reduce del 4 al 5% a menos del 1%.

Esto también aumenta la cantidad neta de luz que se *transmite a través de la lente*, ya que *la luz que no se refleja se transmitirá*.

Se utiliza el mismo principio para minimizar la reflexión en las celdas solares fotovoltaicas de silicio ($n = 3,5$) mediante el empleo de una capa superficial delgada de monóxido de silicio (SiO_2 , $n = 1,45$); esto ayuda a incrementar la cantidad de luz que realmente llega a las celdas solares.

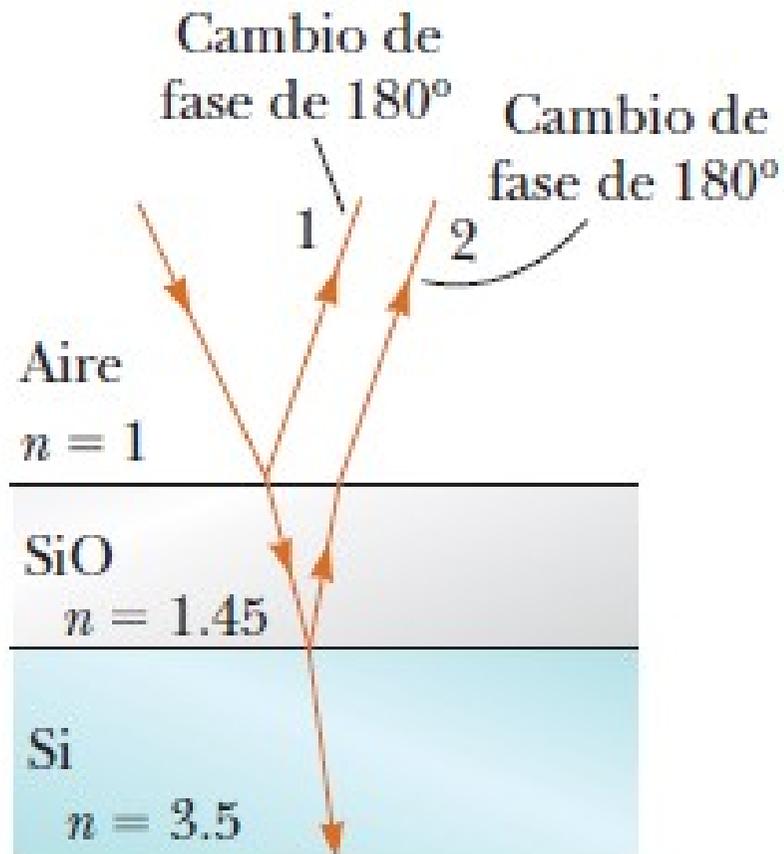


Ejemplo: RECUBRIMIENTOS ANTI-REFLEJO

Con frecuencia, las celdas solares (dispositivos que generan electricidad cuando se exponen a la luz solar) están recubiertas con una delgada película transparente de monóxido de silicio (SiO , $n = 1,45$) para minimizar las pérdidas por reflejo de la superficie.

Suponga que una celda solar de silicio ($n = 3,5$) está recubierta con una delgada película de SiO para este propósito.

Determine el mínimo grosor de película que produce la menor reflexión a una longitud de onda de 550 nm, cerca del centro del espectro visible.



La luz reflejada es un mínimo cuando los rayos 1 y 2 en la figura satisfacen la condición de **interferencia destructiva**. En esta situación, **ambos rayos pasan por un cambio de fase de 180° por reflexión**

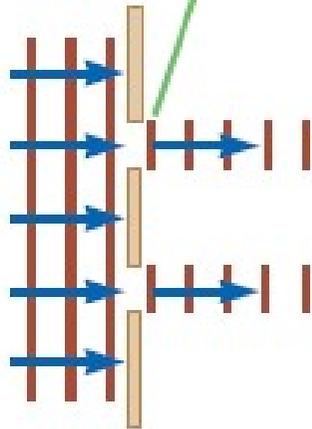
$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

mínimo t para $m=0$

$$t = \frac{\lambda_n}{4} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550}{4(1,45)} = 94,8 \text{ nm}$$

DIFRACCIÓN

La luz que pasa a través de rendijas estrechas *no* se comporta de esta manera.



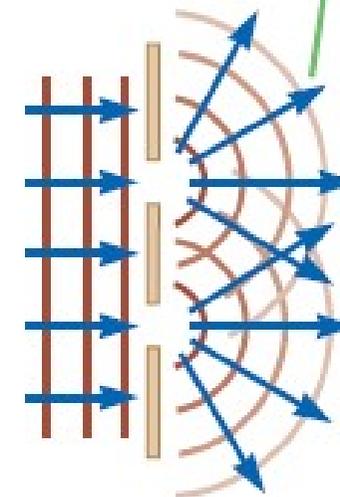
a

Consideremos un haz de luz que incide sobre dos rendijas, como en el experimento de doble rendija de Young.

Si la luz realmente viajara en trayectorias en línea recta después de pasar a través de las rendijas, como en la figura, las ondas no se solaparían y no se vería patrón de interferencia.

En vez de ello, de acuerdo al principio de Huygens las ondas luminosas se dispersan de las rendijas, como se muestra en la figura inferior.

La luz que pasa a través de rendijas estrechas se *difracta*.



En general, la difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de una pequeña abertura, alrededor de obstáculos o mediante bordes agudos.

Difracción: comportamiento general de las ondas al dispersarse cuando pasan a través de una rendija o de un obstáculo.

DIFRACCIÓN

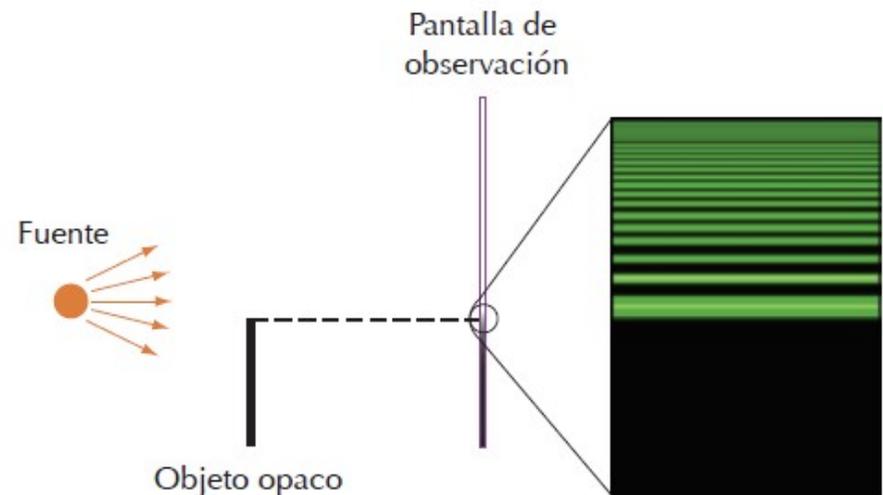
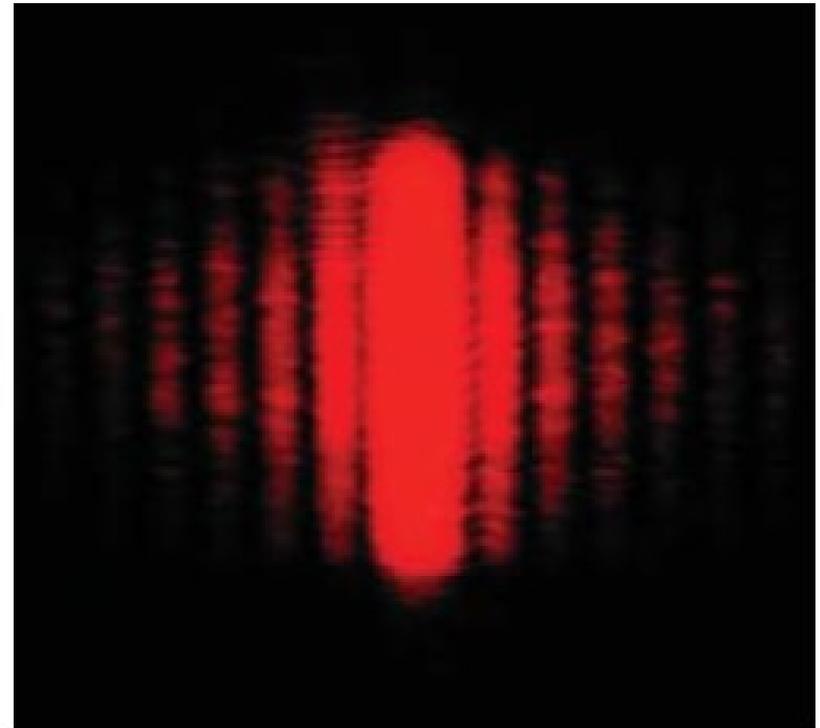
Por ejemplo, cuando una sola rendija estrecha se coloca entre una fuente de luz distante (o un haz láser) y una pantalla, la luz produce un **patrón de difracción** como el de la figura.

El patrón consiste en una amplia banda central intensa flanqueada por una serie de bandas secundarias más estrechas y menos intensas (llamados **máximos secundarios**) y una **serie de bandas oscuras, o mínimos**.

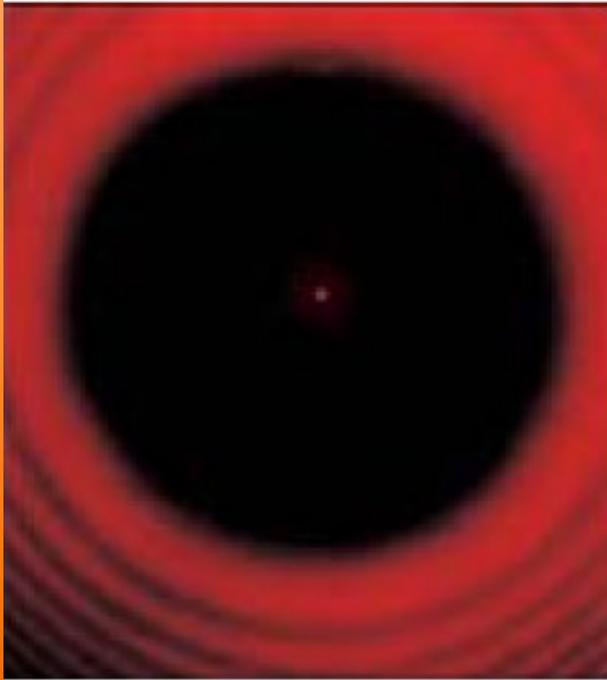
Este fenómeno no se puede explicar dentro del marco de la óptica geométrica, que dice que los rayos de luz que viajan en línea recta deben proyectar una imagen clara de la rendija sobre la pantalla.

La luz de una fuente pequeña pasa por el borde de un objeto opaco y continúa hacia una pantalla.

En la pantalla aparece en la región sobre el borde del objeto un patrón de difracción formado por franjas brillantes y oscuras.



DIFRACCIÓN

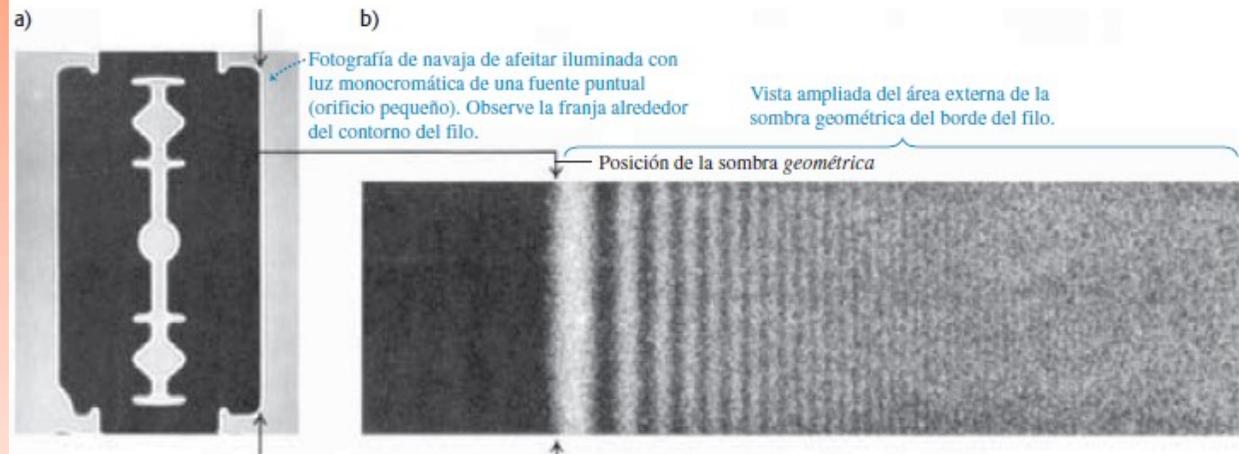


Patrón de difracción y sombra de una moneda. El patrón consiste en la sombra, una mancha brillante en su centro y una serie de bandas de luz circulares brillantes y oscuras cerca de la sombra. La mancha brillante en el centro (llamada la *mancha brillante de Fresnel*) se explica mediante la teoría ondulatoria de la luz de Augustin Fresnel, que predice interferencia constructiva en este punto para ciertas ubicaciones de la moneda. Desde el punto de vista de la óptica geométrica, no habría mancha brillante alguna: la moneda ocultaría por completo el centro del patrón.

Patrón de difracción de una hoja de afeitar.

El área que se encuentra afuera de la sombra geométrica esta bordeada por bandas brillantes y oscuras alternas.

La primera banda brillante, inmediatamente a la derecha de la sombra geométrica, es considerablemente más brillante que en la región de iluminación uniforme de la extrema derecha.



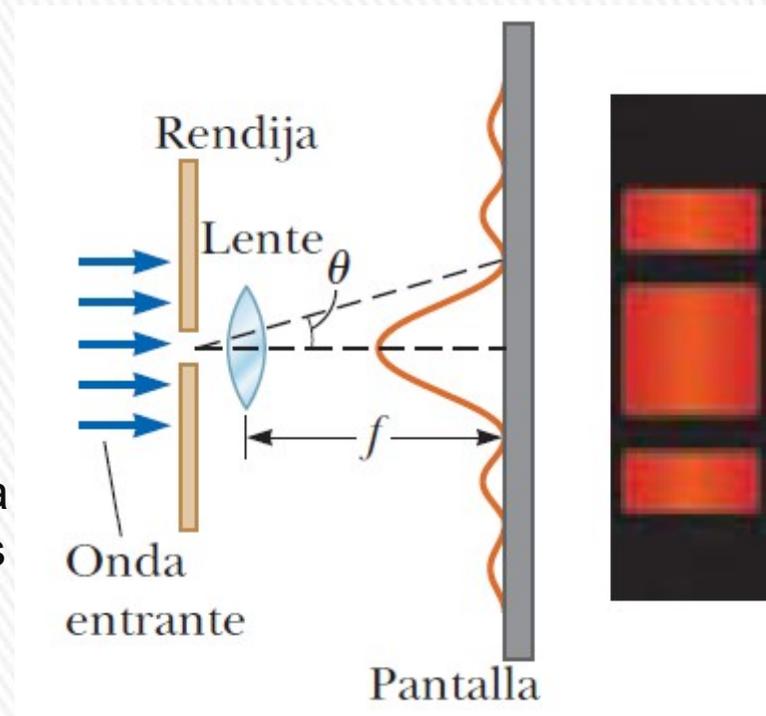
DIFRACCIÓN

Un tipo de difracción, llamada **difracción de Fraunhofer (o de campo lejano)**, ocurre cuando los rayos salen del objeto difractante en direcciones paralelas.

La difracción de Fraunhofer se puede lograr en experimentos o al colocar la pantalla de observación lejos de la rendija o con el uso de una lente convergente para enfocar los rayos paralelos sobre una pantalla cercana.

A lo largo del eje, en $\theta = 0$, se observa una franja brillante, con franjas oscuras y brillantes alternas en cada lado de la franja brillante central.

La figura b es una fotografía de un patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.



No existe una distinción fundamental entre *interferencia* y *difracción*.

El término interferencia se usa a los efectos en los que intervienen ondas de un número pequeño de fuentes, dos por lo general.

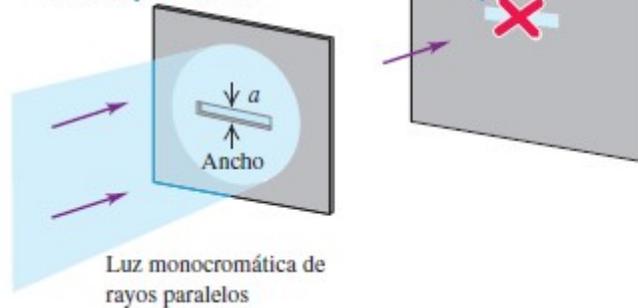
La difracción se relaciona normalmente con una distribución continua de ondas de Huygens que pasan a través de una abertura, o con un número muy grande de fuentes o aberturas.

Pero tanto la interferencia como la difracción son producto de la superposición y del principio de Huygens.

DIFRACCIÓN

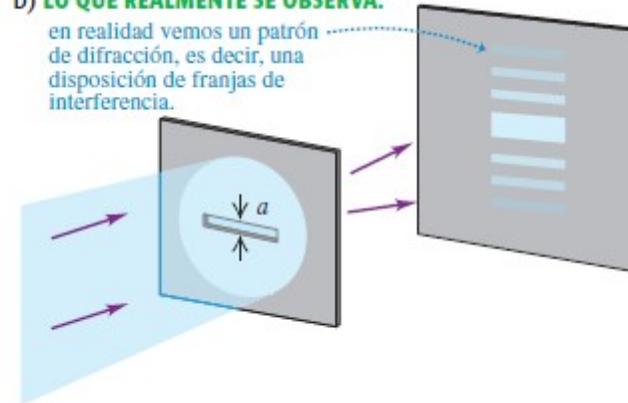
a) RESULTADO QUE SE PREDICE:

la óptica geométrica predice que esta disposición producirá una sola banda brillante del mismo tamaño que la ranura.



b) LO QUE REALMENTE SE OBSERVA:

en realidad vemos un patrón de difracción, es decir, una disposición de franjas de interferencia.



a) La óptica geométrica predice incorrectamente la “sombra” de una ranura horizontal.
b) Una ranura horizontal forma en realidad un patrón de difracción. Por claridad se exageró considerablemente el ancho de la ranura.

Las ondas de *todo tipo sufren difracción, no sólo la luz.*

Las ondas sonoras experimentan difracción cuando pasan a través de una ranura o abertura, como el vano de una puerta ordinaria.

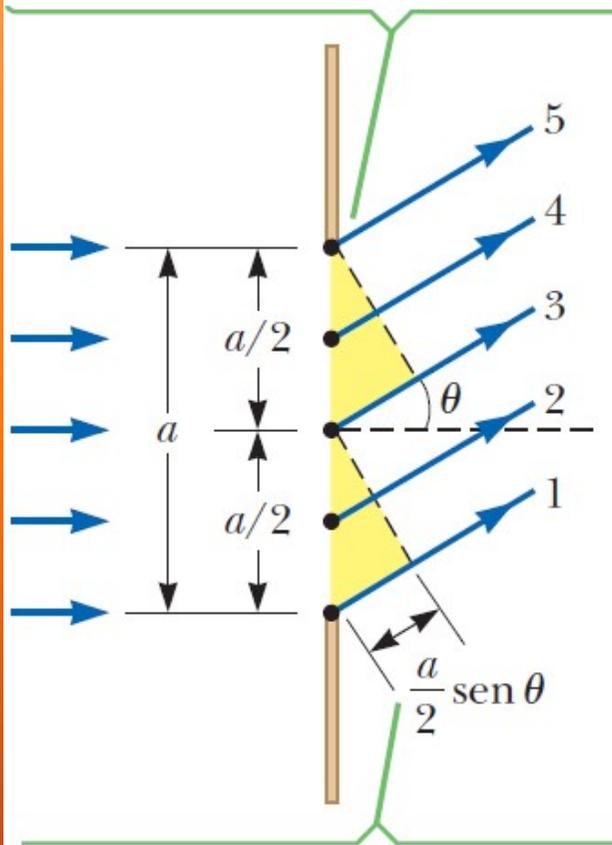
Las ondas sonoras del habla tienen longitudes de onda de un metro o más, y un vano de puerta típico tiene menos de 1 m de ancho; en esta situación, *ancho es menor que λ y el máximo central de intensidad abarca 180° .*

Por ello, los sonidos que pasan a través de una puerta abierta pueden escucharse sin dificultad por un oyente furtivo que se oculte a la vuelta de la esquina.

En cambio, prácticamente no hay difracción de luz a través de un vano de puerta porque la anchura es *mucho mayor* que la longitud de onda λ (del orden de 5×10^{-7} m).

DIFRACCIÓN DE UNA SOLA RENDIJA

Cada porción de la rendija actúa como fuente puntual de ondas.



La diferencia de trayectoria entre las ondas 1 y 3 o entre las ondas 2 y 4 o las ondas 3 y 5 es igual a $(a/2) \sin \theta$.

Hemos supuesto hasta ahora que las rendijas tienen ancho despreciable y que actúan como fuentes lineales de luz.

Veremos qué sucede cuando consideramos los anchos de las rendijas.

Consideremos una sola rendija de ancho a para comprender la naturaleza del patrón de difracción de Fraunhofer producido por la misma.

De acuerdo con el principio de Huygens, **cada porción de la rendija actúa como una fuente de ondas.**

Por lo tanto, la luz proveniente de una porción de la rendija puede interferir con la luz proveniente de otra porción y la intensidad resultante sobre la pantalla depende de la dirección θ .

Para analizar el patrón de difracción, es conveniente dividir la rendija en mitades, como en la figura.

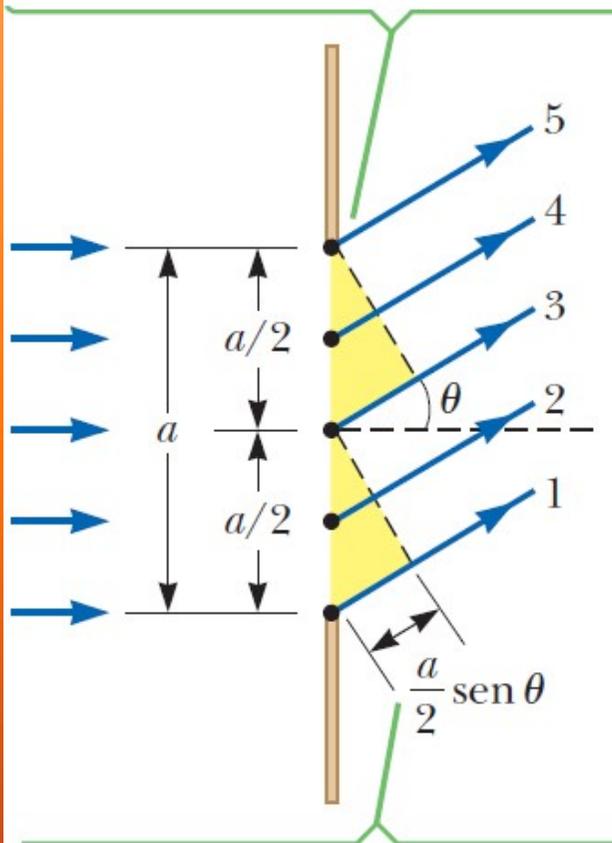
Todas las ondas que se originan en la rendija están en fase.

Consideremos las ondas 1 y 3, que se originan en el fondo y el centro de la rendija, respectivamente.

La onda 1 viaja más que la onda 3 por una cantidad igual a la diferencia de trayectoria $(a/2) \sin \theta$.

DIFRACCIÓN DE UNA SOLA RENDIJA

Cada porción de la rendija actúa como fuente puntual de ondas.



La diferencia de trayectoria entre las ondas 1 y 3 o entre las ondas 2 y 4 o las ondas 3 y 5 es igual a $(a/2) \sin \theta$.

De igual modo la diferencia de trayectoria entre las ondas 3 y 5 es $(a/2) \sin \theta$.

Si esta diferencia de trayectoria es exactamente la mitad de una longitud de onda (que corresponde a una diferencia de fase de 180°), las dos ondas se cancelan de manera mutua y resulta interferencia destructiva.

Esto es cierto, de hecho, para cualesquiera dos ondas que se originan en puntos separados por medio ancho de rendija porque la diferencia entre dos de tales puntos es 180° .

Por lo tanto, las ondas provenientes de la mitad superior de la rendija interfieren *destructivamente con las ondas provenientes de la* mitad inferior de la rendija cuando:

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \quad \text{es decir:} \quad \sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

Si la rendija se divide en cuatro partes en lugar de dos y se usa un razonamiento similar, se encuentra que la pantalla también es oscura cuando:

$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{a}$$

DIFRACCIÓN DE UNA SOLA RENDIJA

Al continuar de esta forma, puede dividir la rendija en seis partes y demostrar que la oscuridad ocurre sobre la pantalla cuando $\sin \theta = \frac{3\lambda}{a}$

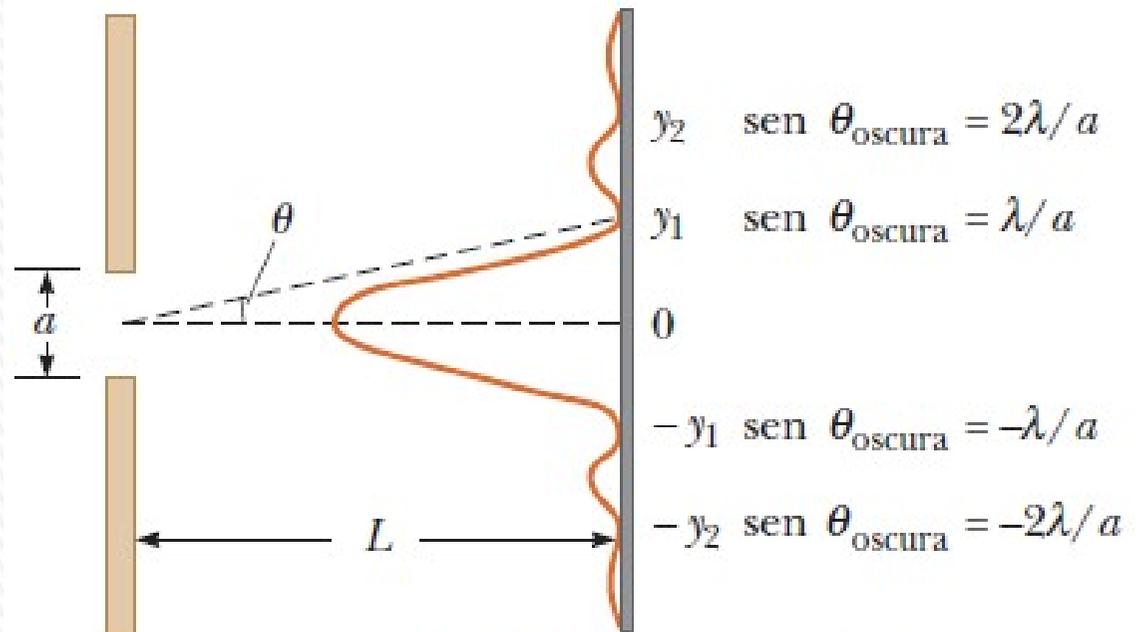
Por lo tanto, la condición general para **interferencia destructiva para una sola rendija de ancho a es**

$$\sin \theta_{\text{oscuro}} = \frac{m\lambda}{a} \quad m = \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$$

Esta ecuación da los valores de θ para los cuales el patrón de difracción tiene intensidad cero, donde se forma una franja oscura.

La distribución de intensidad a lo largo de la pantalla se muestran en la figura.

Una amplia franja brillante central está flanqueada por franjas brillantes mucho más débiles que alternan con franjas oscuras. Las diversas franjas oscuras (puntos de intensidad cero) ocurren en los valores de θ que satisfacen la ecuación anterior.



Pantalla de visualización

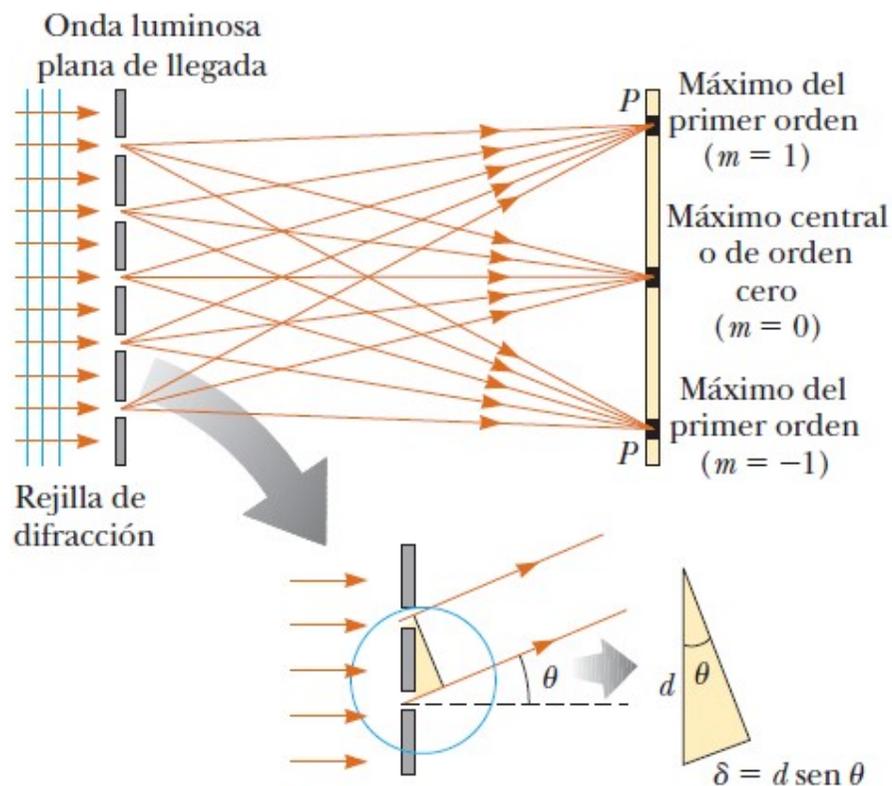
RED DE DIFRACCIÓN

La rejilla o red de difracción, un útil dispositivo para analizar fuentes de luz, consiste en un gran número de rendijas paralelas igualmente espaciadas.

Una rejilla se puede elaborar al rayar líneas paralelas sobre una placa de vidrio con una técnica de fabricación de precisión. Los paneles claros entre rayas actúan como rendijas.

Una rejilla típica contiene muchos miles de líneas por centímetro.

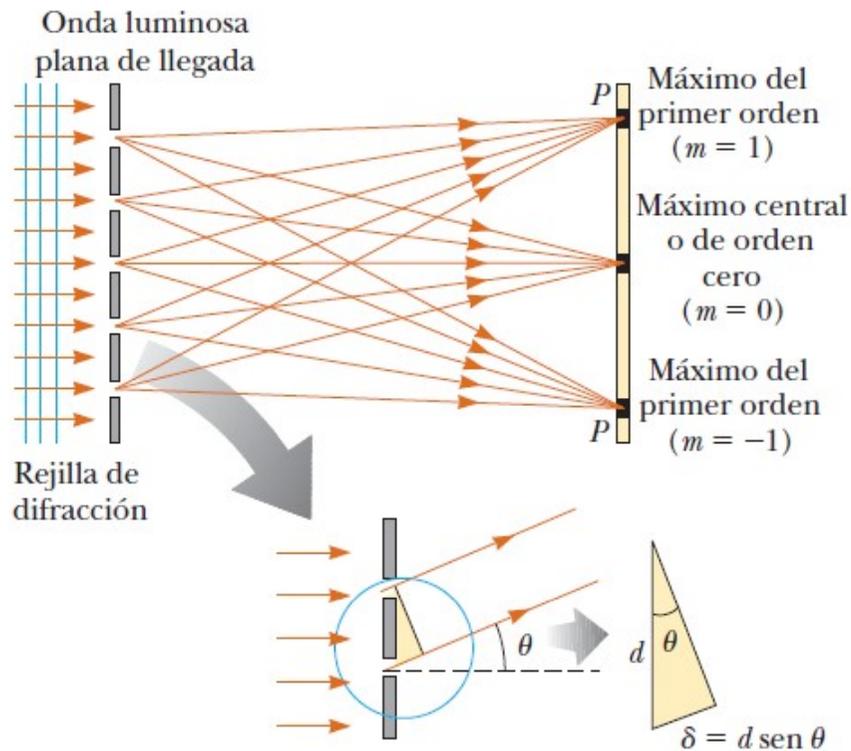
Por ejemplo, una rejilla pautada con 5.000 líneas/cm tiene un espaciamiento de rendija d igual al recíproco de dicho número; por lo tanto, $d = (1/5.000) \text{ cm} = 2 \times 10^{-6} \text{ m}$.



La figura es un diagrama esquemático de una sección de una rejilla de difracción plana.

Una onda plana incide desde la izquierda, normal al plano de la rejilla. La intensidad del patrón sobre la pantalla es resultado de los efectos combinados de interferencia y difracción. Cada rendija causa difracción y los haces difractados a su vez interfieren unos con otros para producir el patrón.

RED O REJILLA DE DIFRACCIÓN



Cada rendija actúa como una fuente de ondas y todas las ondas parten en fase en las rendijas.

Sin embargo, para alguna dirección arbitraria θ medida desde la horizontal, las ondas deben recorrer *diferentes longitudes* de trayectoria antes de llegar a un punto particular P sobre la pantalla.

En la figura se puede ver que la diferencia de trayectoria entre ondas desde cualesquiera dos rendijas adyacentes es $d \cdot \sin \theta$.

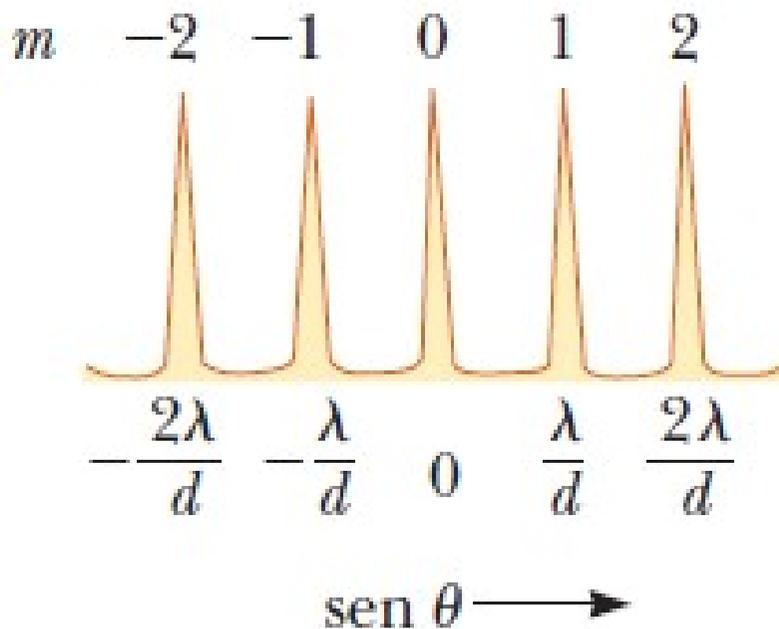
Si esta diferencia de trayectoria es igual a una longitud de onda o cierto múltiplo entero de una longitud de onda, las ondas de todas las rendijas estarán en fase en P y en dicho punto se observará una línea brillante.

Por tanto, la condición para **máximos en el patrón de interferencia en el ángulo θ** es

$$d \sin \theta_{\text{brillante}} = m\lambda$$

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

RED O REJILLA DE DIFRACCIÓN



Intensidad en función de $\sin \theta$ para una rejilla de difracción.

También se muestran los máximos de orden cero, primero y segundo

La luz que sale de una rendija a un ángulo distinto a aquel para un máximo interfiere casi por completo de manera destructiva con la luz proveniente de alguna otra rendija en la rejilla.

Todos esos pares resultarán en poca o ninguna transmisión en dicha dirección, como se ilustra en la figura.

La ecuación anterior se puede usar para calcular la longitud de onda a partir del espaciamiento de la rejilla y el ángulo de desviación, θ

El entero m es el **número de orden** del patrón de difracción. Si la radiación incidente contiene muchas longitudes de onda, cada longitud de onda se desvía a través de un ángulo específico, que se puede encontrar a partir de dicha ecuación.



RED O REJILLA DE DIFRACCIÓN

Todas las longitudes de onda se enfocan en $\theta=0$, que corresponden a $m = 0$.

*Este punto se llama **máximo de orden cero**.*

El máximo de primer orden, que corresponde a $m = 1$, se observa a un ángulo que satisface la relación $\sin \theta = \lambda/d$;

el máximo de segundo orden, que corresponde a $m = 2$, se observa a un ángulo mayor θ , etc.

Se observa un agudo máximo principal de intensidad y el amplio rango de áreas oscuras, un patrón en contraste directo con las amplias franjas brillantes características del patrón de interferencia de dos rendijas.

En una **rejilla de reflexión**, la serie de rendijas igualmente espaciadas vistas anteriormente se sustituye por una serie de crestas o surcos igualmente espaciados en una pantalla reflectora.

La luz reflejada tiene una intensidad máxima en ángulos donde la diferencia de fase entre las ondas luminosas que se reflejan desde crestas o surcos adyacentes es un múltiplo entero de 2π .

Si sobre una rejilla de reflexión con una separación d entre crestas o surcos adyacentes incide luz con longitud de onda λ en dirección normal, los ángulos *reflejados* a los que se presentan máximos de intensidad están dados por la misma ecuación anterior.

$$d \sin \theta_{\text{brillante}} = m\lambda$$

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

RED O REJILLA DE DIFRACCIÓN



Disco compacto observado bajo luz blanca. Los colores observados en la luz reflejada y sus intensidades dependen de la orientación del CD en relación con el ojo y con la fuente de luz.

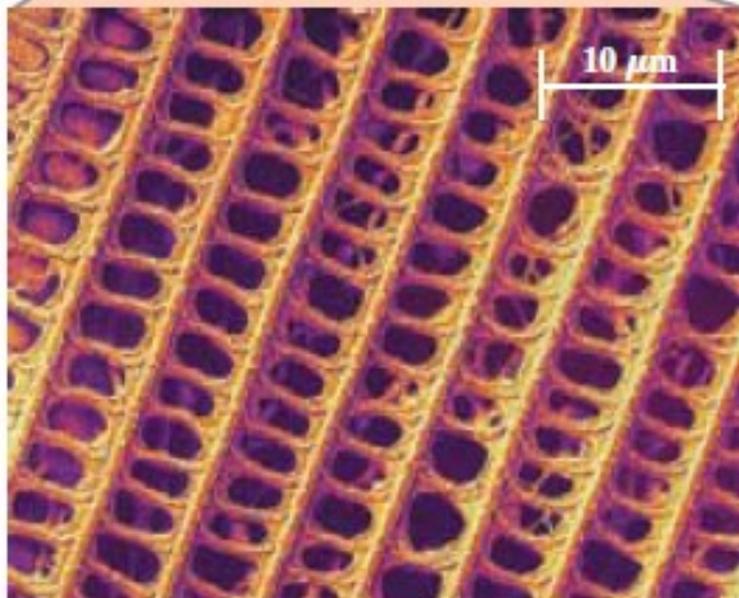
Superficie CD : pista ranurada en espiral (separación $\approx 1 \mu\text{m}$): **rejilla de reflexión.**

La luz reflejada interfiere de manera constructiva solo en ciertas direcciones que dependen de la longitud de onda y la dirección de la luz incidente.

Cualquier sección del CD sirve como rejilla de difracción para luz blanca, enviando colores distintos en diferentes direcciones.

Los diferentes colores que se ven al observar una sección cambian cuando la fuente de luz, el CD o usted cambian de posición. Este cambio en posición hace que se alteren el ángulo de incidencia o el ángulo de luz difractada.

RED DE DIFRACCIÓN



Los colores iridiscentes de ciertas mariposas tienen su origen en crestas microscópicas de las alas de la mariposa que forman una rejilla de reflexión.

Las millones de escalas microscópicas en las alas de la mariposa tropical *Morpho peleides* se comportan como rejilla de difracción.

Vistas desde el ángulo adecuado, estas escamas reflejan intensamente la luz azul, que es como un mecanismo de defensa.

Los destellos de luz que emiten las alas en movimiento de una *Morpho* pueden deslumbrar y aturdir momentáneamente a depredadores como lagartos y aves.