

Interferencia de ondas, experiencias de Young. Interferencia en películas delgadas. Difracción: difracción por una rendija y por varias rendijas: Red de difracción. Polarización de la luz, métodos para polarizar y analizar la luz.

Principio de Huygens

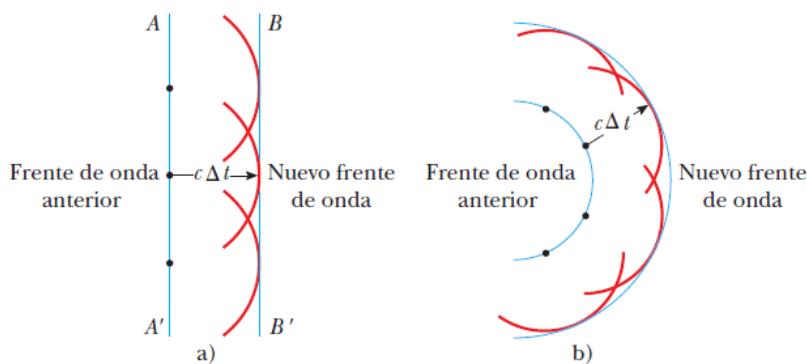
El principio de Huygens es una construcción geométrica para usar el conocimiento de un frente de onda anterior, para determinar la posición de un frente de onda nuevo en algún instante.

Frente de onda

Es una superficie de fase constante, es decir, es una superficie en donde todas las ondas que pasan por puntos de esa superficie, tienen la misma fase.

Principio de Huygens

Todos los puntos en un frente de onda determinado se toman como fuentes puntuales para la producción de ondas esféricas secundarias, llamadas trenes de ondas, que se propagan hacia afuera por un medio con magnitudes de velocidad características de ondas en ese medio. Despues de algún intervalo de tiempo transcurrido la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a los trenes de ondas.



Interferencia de ondas luminosas

Se llama así cuando se superponen dos o más ondas en una misma región del espacio.

Interferencia constructiva: La amplitud de la onda resultante es mayor que la de cualquiera de las ondas individuales.

Interferencia destructiva: La amplitud de la onda resultante es menor que la de cualquiera de las ondas individuales.

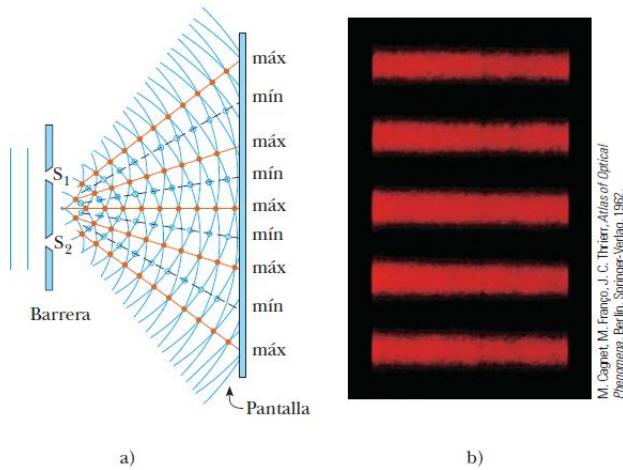
Las ondas de luz también se interfieren entre ellas. Fundamentalmente, toda interferencia asociada con ondas de luz aparece cuando se combinan los campos electromagnéticos que constituyen las ondas individuales.

Condiciones para la interferencia

- Las fuentes deben ser coherentes, es decir, deben mantener una fase constante respecto de otra.
- Las fuentes deben ser monocromáticas, es decir, de una sola longitud de onda.

Experimento de doble ranura de Young

La interferencia entre dos ondas que pasan a través de dos rendijas fue demostrada por primera vez por el científico inglés Thomas Young en 1801.

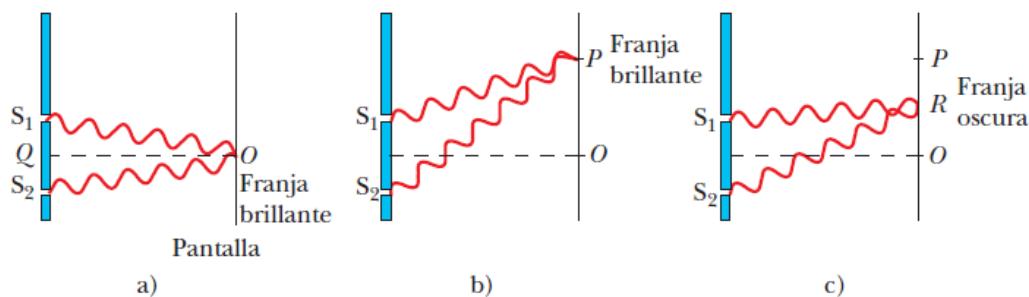


La fig. a muestra el diagrama esquemático del experimento de doble ranura de Young. Las ranuras S_1 y S_2 se comportan como fuentes coherentes de ondas de luz que producen un patrón de interferencia en la pantalla.

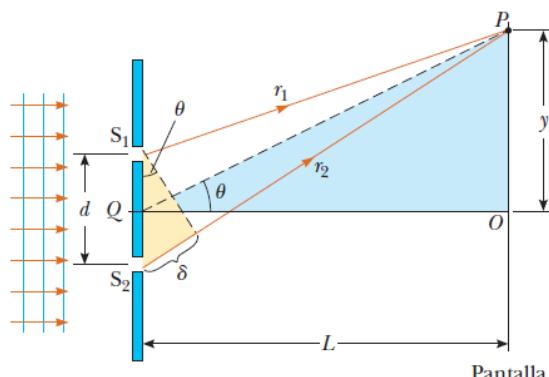
La luz de S_1 y S_2 produce, en una pantalla, una configuración visible de bandas brillantes y oscuras paralelas llamadas franjas, fig.b

Cuando la luz desde S_1 y desde S_2 llega a un punto tal en la pantalla que ocurre interferencia constructiva en ese lugar, aparece una franja brillante. Cuando la luz de las dos ranuras se combina destrutivamente en cualquier lugar sobre la pantalla, resulta una franja oscura.

Lo anterior se puede visualizar más fácilmente en el siguiente esquema:



Podemos obtener una descripción más cuantitativa del experimento de Young con la ayuda de un modelo geométrico construido en la figura siguiente:

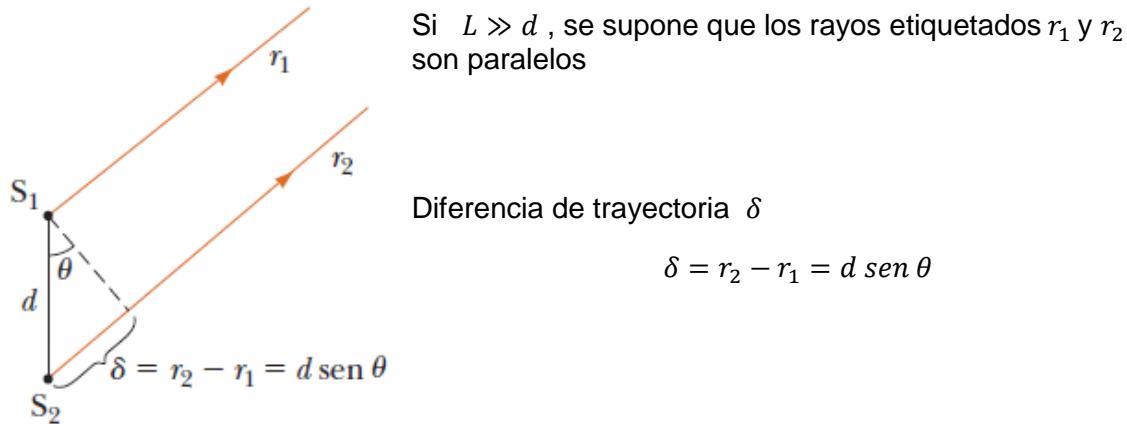


Donde:

d es la distancia entre las dos rendijas.

L la distancia de separación entre las rendijas y la pantalla de observación.

r_1 y r_2 son las distancias que recorren las ondas desde las rendijas hasta la pantalla.



Interferencia constructiva

Si δ es cero o algún entero múltiplo de la longitud de onda, **las dos ondas están en fase** en el punto P y se obtiene **interferencia constructiva (franjas brillantes)**.

$$d \sin \theta_{brillante} = m\lambda \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

Donde m se denomina número de orden.

Interferencia destructiva

Cuando δ es múltiplo impar de $\lambda/2$, las dos ondas que lleguen al punto P están 180° fuera de fase y dan lugar a una **interferencia destructiva**. Por lo tanto, la condición para **franjas oscuras**, o interferencia destructiva, en el punto P es

$$d \sin \theta_{oscuro} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

Posiciones lineales de las franjas brillante

A partir del triángulo OPQ de la figura

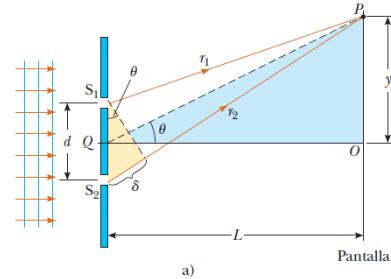
$$\tan \theta = \frac{y}{L}$$

Las posiciones lineales de las franjas brillante y oscura se proporcionan por

$$y_{brillante} = L \tan \theta_{brillante}$$

$$y_{oscuro} = L \tan \theta_{oscuro}$$

Para ángulos pequeños, $\tan \theta \approx \sin \theta$



La posición de las franjas brillante es

$$y_{brillante} = L \operatorname{sen} \theta_{brillante}$$

Si

$$d \operatorname{sen} \theta_{brillante} = m\lambda \therefore \operatorname{sen} \theta_{brillante} = \left(\frac{m\lambda}{d}\right)$$

Por lo tanto

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

La posición de las franjas oscuro es

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

Ejercicio:

Una pantalla de visualización está separada de una doble rendija por 1,2 m. La distancia entre las dos rendijas es 0,030 mm. Hacia la doble rendija se dirige luz monocromática y forma una configuración de interferencia sobre la pantalla. La franja brillante de segundo orden ($m = 2$) esta a 4.5 cm de la linea central sobre la pantalla.

- a- Calcula la longitud de onda de la luz
- b- Calcula la distancia entre franjas brillantes adyacentes.

Solución

Datos

$$L = 1.2 \text{ m}$$

$$d = 0.030 \text{ mm} \text{ a } m = 3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$m = 2$$

$$y_{brillante} = 4,5 \text{ cm} \text{ a } m = 4,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{a- } y_{brillante} &= L \left(\frac{m\lambda}{d}\right) \therefore \lambda = \frac{y_{brillante} d}{m L} \\ \lambda &= \frac{4,5 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot 3 \times 10^{-5} \text{ m}}{2 \cdot 1.2 \text{ m}} = 5,6 \times 10^{-7} \text{ m} = 560 \text{ nm} \end{aligned}$$

El color depende de la longitud de onda en el ejemplo $\lambda = 560 \text{ nm}$ que corresponde a un verde casi amarillo.

- b- Franja brillante

$$y_m = L \left(\frac{m\lambda}{d}\right)$$

Franja brillante siguiente (consecutiva)

$$y_{m+1} = L \frac{(m+1)\lambda}{d}$$

La distancia entre franjas brillantes adyacentes seria

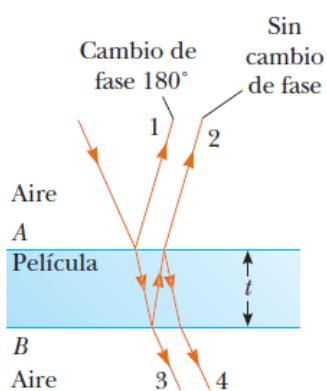
$$y_{m+1} - y_m = L \frac{(m+1)\lambda}{d} - L \left(\frac{m\lambda}{d}\right) = L \left(\frac{\lambda}{d}\right)$$

$$y_{m+1} - y_m = L \left(\frac{\lambda}{d} \right) = 1.2 m \left(\frac{5.6 \times 10^{-7} m}{3 \times 10^{-5} m} \right) = 2.2 \times 10^{-2} m = 2.2 \text{ cm}$$

Interferencia en películas delgadas

Se produce cuando tenemos una mancha de aceite en el agua o en una pompa de jabón. Se ve una forma coloreada por no estar usando una luz monocromática si no blanca.

Consideremos una película de espesor uniforme t , e índice de refracción n . Para considerar si los rayos reflejados interfieren constructiva o destructivamente debemos considerar lo siguiente:



La longitud de onda de luz $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ en la película, donde λ es la longitud de onda de la luz en espacio libre y n es el índice de refracción del material de la película.

El rayo reflejado 1, que se refleja desde la superficie superior A, se somete a un cambio de fase de 180° respecto a la onda incidente.

El rayo reflejado 2, que se refleja desde la superficie inferior de la película B, no pasa por el cambio de fase porque se refleja desde un medio (aire) que tiene un índice de refracción menor.

Por lo tanto, el rayo 1 está 180° fuera de fase en relación con el rayo 2, que es equivalente a una diferencia de trayectoria de $\lambda_n / 2$.

Interferencia

- Cuando un rayo luminoso llega a la superficie de separación por un medio que tiene un n superior, la parte reflejada de la onda experimenta un cambio de fase de 180° .
- Cuando el rayo luminoso llega a la superficie de separación que tiene un n inferior, no se produce ningún cambio de fase en el rayo reflejado.

Por lo tanto, el rayo 1 está 180° fuera de fase en relación con el rayo 2, que es equivalente a una diferencia de trayectoria de $\lambda_n / 2$.

También debe considerar que el rayo 2 se desplaza una distancia extra $2t$ antes de que las ondas se recombinen en el aire sobre la superficie A. (t es el espesor de la película)

Interferencia constructiva

Si $2t = \lambda_n / 2$, entonces los rayos 1 y 2 se recombinan en fase, y el resultado es **interferencia constructiva**.

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

En general, la condición para la interferencia constructiva en películas delgadas es

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

Interferencia Destructiva

Si la distancia extra $2t$ recorrida por el rayo 2 corresponde a un múltiplo de λ_n , las dos ondas se combinan fuera de fase, y el resultado es **interferencia destructiva**.

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

Condiciones para las interferencias constructiva y destructiva

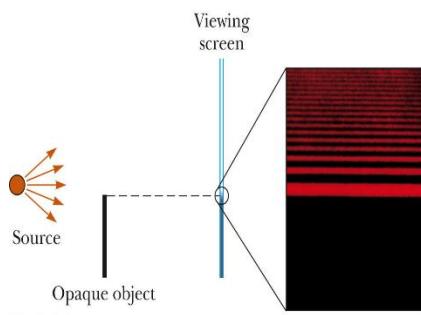
Las anteriores condiciones para las interferencias constructiva y destructiva son válidas cuando el medio que está por encima de la superficie superior de la película es el mismo que el medio

por debajo de la superficie inferior o, si existen medios diferentes arriba y abajo de la película, el índice de refracción de ambos es menor a n .

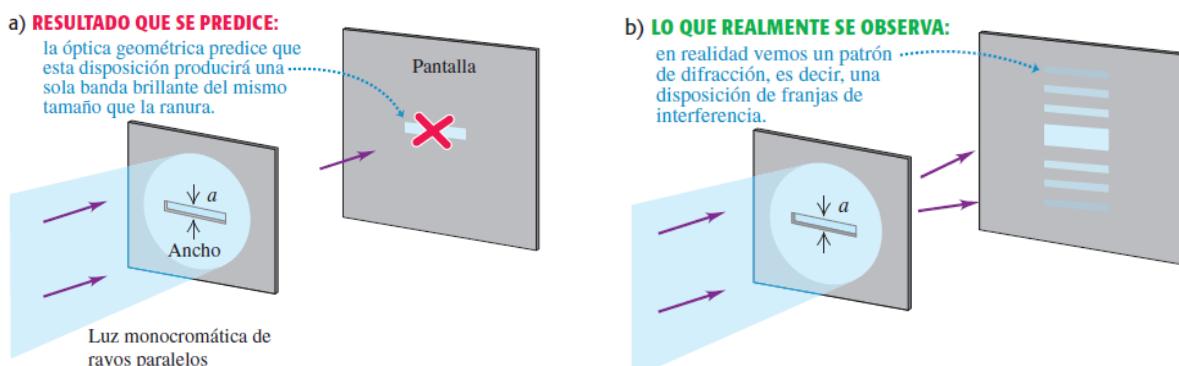
Difracción de la luz

Cuando ondas de luz plana pasan a través de una pequeña abertura en una barrera opaca, esta abertura actúa como una fuente puntual de luz, con las ondas ingresando en la región oscura por detrás de la barrera. **Este fenómeno, conocido como difracción**, solo puede describirse con el modelo ondulatorio para la luz.

La **Difracción** es el fenómeno del movimiento ondulatorio en el que una onda se extiende después de pasar junto al borde de un objeto sólido o atravesar una rendija estrecha, en lugar de seguir avanzando en línea recta.



Cuerpo Filoso: La luz pasa por el borde de un objeto alargado y filoso. El patrón de difracción es vertical, con un máximo en la parte inferior



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.

La difracción solo se observa si el tamaño del obstáculo que encuentra las ondas es del mismo orden de longitud de onda del movimiento, ya que cuando es mayor, las ondas siguen la propagación rectilínea.

Hay dos formas de estudiar la difracción

a- Difracción de Fresnel (o de campo cercano)

Tanto la fuente puntual como la pantalla están relativamente cerca del obstáculo que forma el patrón de difracción.

b- Difracción de Fraunhofer (o de campo lejano)

Si la fuente, el obstáculo y la pantalla están lo suficientemente alejados para considerar como paralelas todas las líneas de la fuente al obstáculo y todas las líneas del obstáculo a un punto del patrón. Esto se puede lograr experimentalmente utilizando una lente convergente para enfocar los rayos paralelos sobre una pantalla cercana.

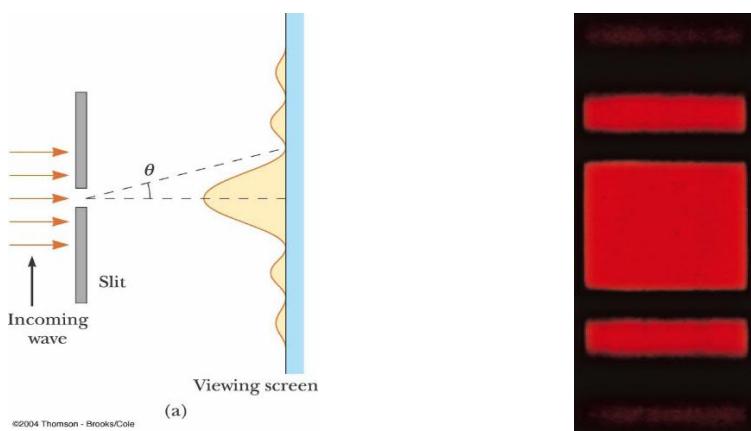
Difracción de una rendija

Consideramos una situación en donde a través de una ranura angosta (rendija), pasa luz que posteriormente se proyecta en una pantalla. Suponemos, por sencillez, que se trata de un caso de patrón de difracción de Fraunhofer.

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

- Una Franja brillante se ve en el medio
- Franjas brillantes y oscuras alterna se ven en cada lado

Foto de Patrón de Fraunhofer



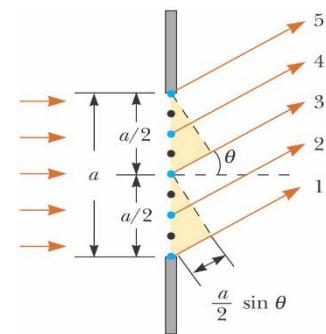
Hasta ahora hemos supuesto que las rendijas son fuentes puntuales de luz. En esta sección abandonaremos esta suposición y veremos como el ancho finito de las rendijas es la base para la comprensión de la difracción.

De acuerdo al principio de **Huygens**, cada parte de la rendija actúa como una fuente de onda luminosa, por lo tanto, la luz proveniente de una sección de la rendija puede interferir con la luz proveniente de otra porción, y la intensidad de la luz resultante sobre la pantalla de observación dependerá de la dirección de θ .

Con base a este análisis, reconocemos que un patrón de difracción es realmente un patrón de interferencia, en el cual las diferentes fuentes de luz son porciones diferentes de la misma rendija.

Con finalidad de analizar el patrón de difracción resulta conveniente dividir la rendija en dos mitades como se muestra en la figura.

Recordando que todas las ondas estarán en fase cuando salga de la rendija, consideramos los rayos 1 y 3, conforme estos dos rayos se desplazan hacia la derecha de la figura hacia la pantalla de observación, el rayo 1 se desplaza más que el rayo 3 en una cantidad igual a la diferencia de trayectoria $\frac{a}{2} \sin \theta$, siendo a el ancho de la rendija. De manera similar la diferencia de trayectoria entre los rayos 2 y 4, y entre 3 y 5 es también $\frac{a}{2} \sin \theta$, respectivamente. Si esta diferencia de trayectoria es igual a la mitad de una longitud de onda (lo que corresponde a una diferencia de fase de 180°), entonces las ondas



se cancelan entre sí, lo que da como resultado **interferencia destructiva**. Entonces esto se dará cuando:

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

Se puede expresar de manera general como

$$\operatorname{sen} \theta_{oscuro} = m \frac{\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

Esta ecuación proporciona los valores de θ_{oscuro} para los cuales el patrón de difracción tiene la intensidad luminosa igual a cero, esto es cuando se forma una franja oscura. Cada pico de franja brillante ocurre aproximadamente a la mitad del camino entre las franjas oscuras mínimas limitantes.

Observe que el brillo central máximo tiene el doble de ancho que los máximos secundarios.

Para la existencia de interferencia constructiva es:

$$\operatorname{sen} \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{a} \quad (m = 0 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

Intensidad de patrones de difracción de una sola rendija

Intensidad de un patrón de difracción Fraunhofer de una sola rendija

$$I = I_{\max} \left[\frac{\operatorname{sen}(\pi a \operatorname{sen} \theta / \lambda)}{\pi a \operatorname{sen} \theta / \lambda} \right]^2$$

donde I_{\max} es la intensidad en $\theta = 0$ (el máximo central) y λ es la longitud de onda de la luz para iluminar la rendija. Esta expresión demuestra que los mínimos se presentan cuando

$$\pi a \operatorname{sen} \frac{\theta_{oscuro}}{\lambda} = m \pi$$

o bien

$$\operatorname{sen} \theta_{oscuro} = m \frac{\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

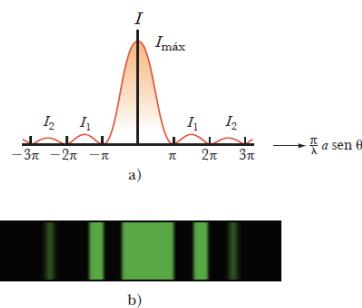
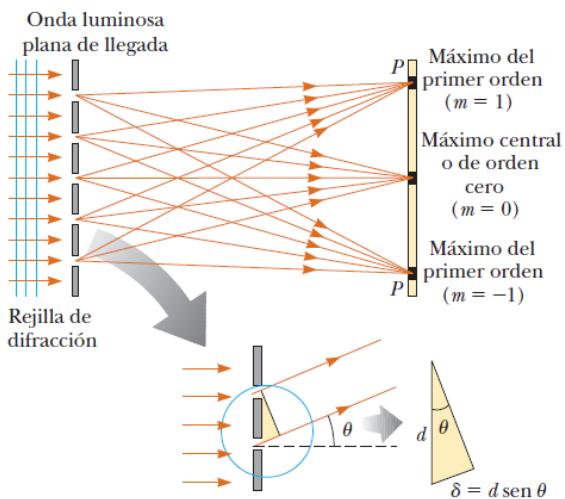


Figura 38.6 a) Gráfica de la intensidad de la luz I en función de $(\pi/\lambda) a \operatorname{sen} \theta$ para el patrón de difracción Fraunhofer de una sola rendija. b) Fotografía de un patrón de difracción Fraunhofer de una sola rendija.

Difracción por varias rendijas: red de difracción

Una red de difracción es un dispositivo regular de rendijas paralelas a una misma distancia. El espaciamiento d entre rendijas es muy pequeño y el número N de rendijas es generalmente grande. Por ejemplo, una rejilla típica rayada con 5000 ranuras por centímetro tiene un espaciamiento entre rendijas $d = (1/5000) \text{ cm}$, lo que es igual a $2,00 \times 10^{-4} \text{ cm}$. Las redes de difracción permiten separar un haz de luz en longitudes de ondas o colores constituyentes como consecuencia de la interferencia de los múltiples que vienen de las rendijas.



En la figura se muestra una red de difracción formada por rendijas a una misma distancia, una distancia d , iluminadas por una onda plana. Cada rendija se convierte en una fuente puntual en fase con el resto de las fuentes. A un cierto ángulo θ de la normal a la red de difracción, la diferencia de camino recorrido por la luz proveniente de rendijas vecinas será

$$\delta = d \operatorname{sen} \theta$$

La **interferencia constructiva** ocurrirá en el punto donde la diferencia de camino recorrido por ambas ondas se igual a un número entero de longitudes de onda.

$$d \operatorname{sen} \theta_{\text{brillante}} = m \lambda \quad (m = 0 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

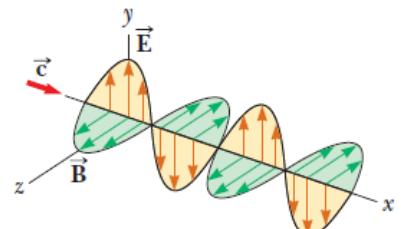
Como en la red de difracción la separación de entre rendijas es constante, la luz de longitudes de onda diferentes se difracta a diferentes ángulos.

Polarización de las ondas luminosas

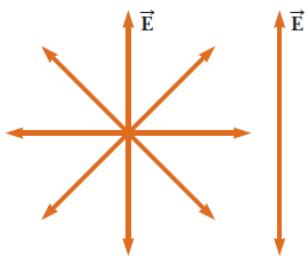
La polarización se da únicamente con ondas transversales.

Las ondas de luz y todas las demás ondas electromagnéticas tienen naturaleza transversal, una prueba firme de esta naturaleza transversal es la polarización de la luz.

Como hemos visto los vectores de campo eléctrico y campo magnético asociados a una onda electromagnética son perpendiculares entre sí, y también lo son respecto la dirección de propagación de la onda.



Un haz normal de luz está formado por un gran número de ondas emitidas por los átomos de la fuente luminosa. Cada átomo produce una onda que tiene una orientación particular del vector del campo eléctrico \vec{E} , correspondiente a la dirección de la vibración atómica. La dirección de polarización de cada una de las ondas individuales se define como la dirección en la que vibra su campo eléctrico. Sin embargo, una onda electromagnética individual podría tener su vector \vec{E} sobre el plano yz , con lo que podría formarse cualquier ángulo posible con el eje y . Porque es factible cualquier dirección de vibración de la fuente de las ondas, la onda electromagnética resultante es una superposición de ondas que vibran en muchas direcciones distintas. El resultado es un rayo de luz no polarizado.



Las flechas muestran unas cuantas direcciones posibles de los vectores del campo eléctrico que conforman el haz resultante.

Se dice que una **onda está linealmente polarizada** si en todo momento el campo eléctrico resultante \vec{E} vibra en la misma dirección en un punto en particular. (Algunas veces, a este tipo de onda **se le llama plana polarizada, o simplemente polarizada.**)

El plano formado por \vec{E} y la dirección de propagación se conoce como el **plano de polarización** de la onda.

Métodos para la polarización de la luz a partir de luz no polarizada.

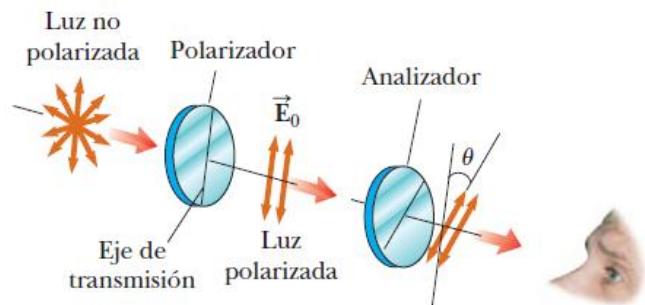
a. Polarización por absorción selectiva

La técnica más común para producir luz polarizada es usar material que transmita ondas cuyos campos eléctricos vibren en un plano paralelo a cierta dirección y que absorba las ondas cuyos campos eléctricos estén vibrando en todas las demás direcciones.

En el año de 1938, E. H. Land (1909-1991) descubrió un material, que llamo polaroid, que polariza la luz mediante la absorción selectiva. Este material se fabrica en hojas delgadas de hidrocarburos de cadena larga. Las láminas u hojas son estiradas durante su fabricación de forma que las moléculas de la cadena larga se alinean.

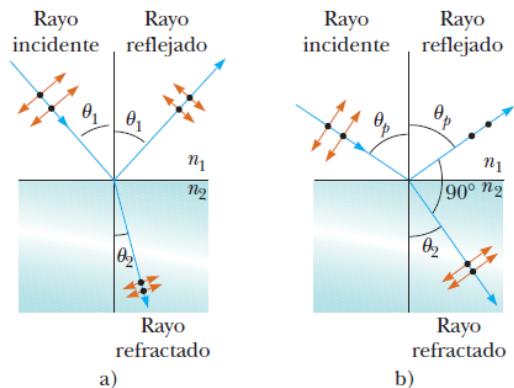
Ley de Malus

$$I = I_{\max} \cos \theta$$



b. Polarización por reflexión

Cuando un rayo de luz no polarizado se refleja desde una superficie, la luz reflejada puede estar totalmente polarizada, parcialmente polarizada, o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia es igual a 0° , el rayo reflejado no es un rayo polarizado. Para otros ángulos de incidencia, la luz reflejada estará polarizada hasta cierto grado, y para un ángulo particular de incidencia, la luz reflejada quedará totalmente polarizada. Analice ahora la reflexión en este ángulo especial.



Suponga que el ángulo de incidencia θ_1 se modifica hasta que el ángulo que se forma entre los rayos reflejado (con su vector de campo eléctrico paralelo a la superficie), y el rayo refractado está todavía solo parcialmente polarizado.

El ángulo de incidencia en que se presenta la polarización se conoce como **ángulo de polarización** θ_p .

$$\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ \rightarrow \theta_2 = 90^\circ - \theta_p$$

Por la ley de Snell

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

Haciendo $n_1 = n_{\text{aire}} = 1$ y $n_2 = n$

$$\operatorname{sen} \theta_p = n \operatorname{sen} (90^\circ - \theta_p) = \cos \theta_p$$

Así

$$n = \frac{\operatorname{sen} \theta_p}{\cos \theta_p} = \operatorname{tg} \theta_p \quad \text{Ley de Brewster}$$

La expresión se conoce como **ley de Brewster**, y en ocasiones también al ángulo de polarización θ_p se le llama **ángulo de Brewster**, en honor a su descubridor, David Brewster (1781-1868). Porque para una sustancia específica n varía en función de la longitud de onda, el ángulo de Brewster es también una función de la longitud de onda.

c. Polarización por refracción doble

Los sólidos pueden ser clasificados sobre la base de su estructura interna. Aquellos en los cuales los átomos están organizados con un orden específico se llaman cristalinos. La estructura del NaCl es un ejemplo de un **sólido cristalino**. Aquellos sólidos en los cuales los átomos están distribuidos al azar se llaman **amorfos**. Cuando la luz se desplaza a través de un material amorfo, como por ejemplo el vidrio, se desplaza con una rapidez que es la misma en cualquier dirección. Es decir, el vidrio tiene un solo índice de refracción.

No obstante, en ciertos **materiales cristalinos**, como por ejemplo **la calcita y el cuarzo**, la rapidez de luz no es la misma en todas direcciones. En estos materiales la rapidez de la luz depende de la dirección de propagación y del plano de polarización de la luz.

Estos materiales se caracterizan por tener dos índices de refracción, por lo que a menudo se les llama materiales de doble refracción o birrefringentes.

Cuando la luz no polarizada entra en un material birrefringente, puede dividirse en un rayo ordinario (O) y un rayo extraordinario (E). Estos dos rayos tienen polarizaciones mutuamente perpendiculares y viajan con magnitudes de velocidades diferentes a través del material. Las dos magnitudes de velocidad corresponden a dos índices de refracción, n_o para el rayo ordinario y n_E para el rayo extraordinario.

Existe una dirección, denominada eje óptico, junto con los rayos ordinario y extraordinario que tienen la misma rapidez. ($n_o = n_E$)

Nota

n_o = constante en todas las direcciones

n_E = varia con la dirección de propagación

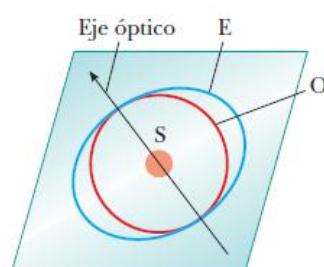
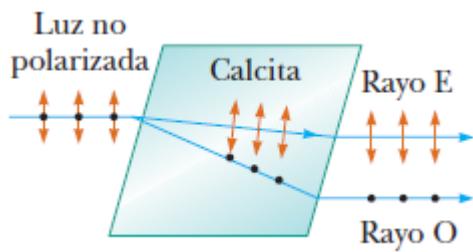


Figura 38.31 Un cristal de calcita produce una imagen doble debido a que se trata de un material birrefringente (de doble refracción).

d. Polarización por dispersión

Cuando incide la luz sobre cualquier material, los electrones del material absorben y vuelven a enviar parte de la luz. Esta absorción y rerradiación de la luz por los electrones de las moléculas de gas que forman el aire es lo que hace que la luz solar que llega hasta un observador sobre la Tierra este parcialmente polarizada. Se puede observar este efecto, conocido como dispersión, mirando directamente hacia el cielo a través de anteojos de sol cuyas lentes estén fabricadas de un material polarizador.

Cuando mira hacia el cielo en una dirección que no sea hacia el Sol, lo que se ve es la luz dispersa, que es predominantemente violeta. De cualquier modo, sus ojos no son muy sensibles a la luz violeta. La luz del siguiente color en el espectro, azul, se dispersa con menos intensidad que el violeta, pero sus ojos son más sensibles a la luz azul que a la luz violeta. Por esto, observa un cielo azul. Si mira hacia el Sol en el ocaso.

