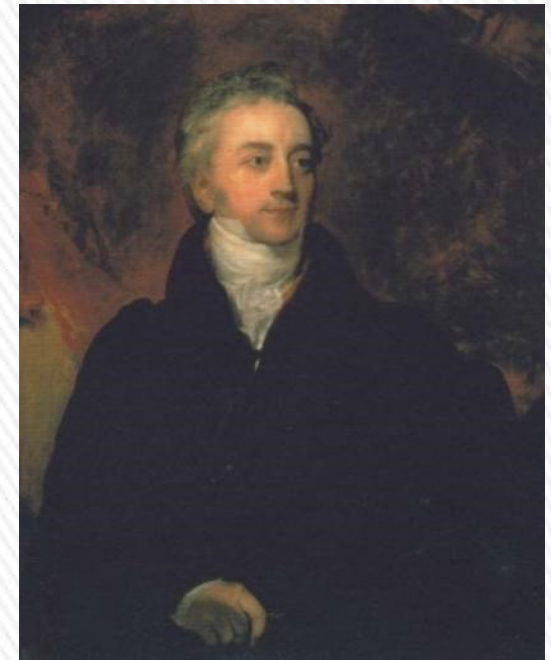


23- PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ



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!!

REPASO DE CLASE PASADA – Interferencia doble rendija

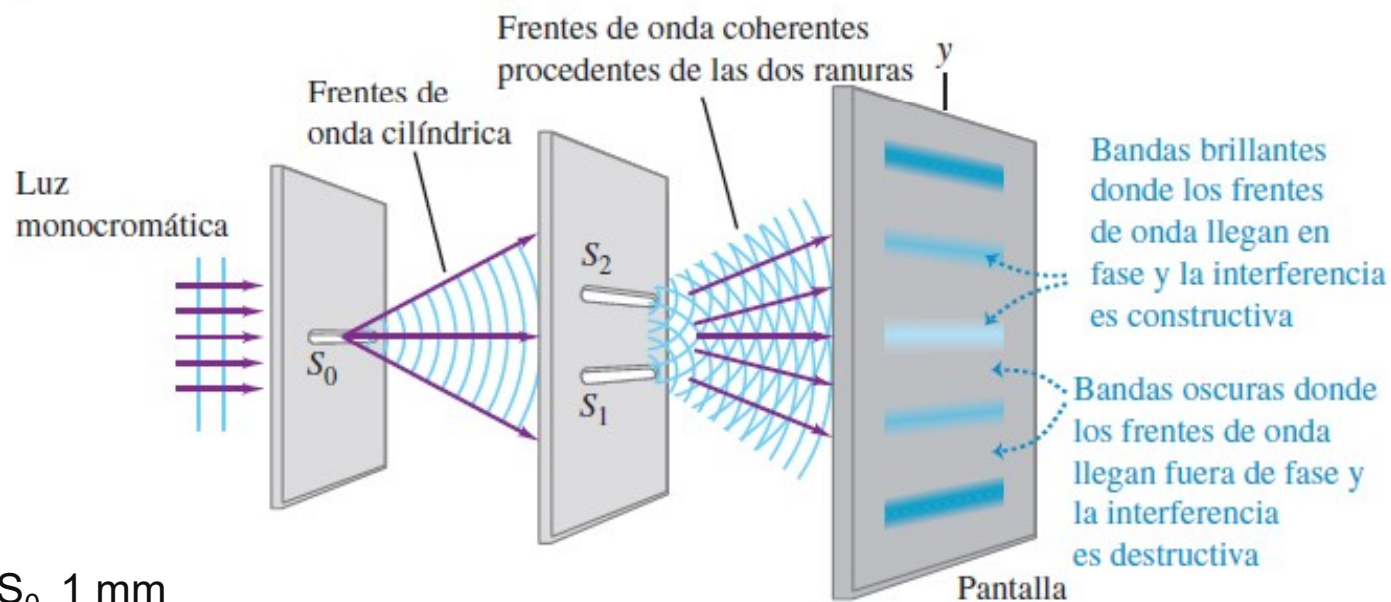
CONDICIONES P/ OBSERVACIÓN INTERFERENCIA LUMINOSA

Las fuentes deben ser:

Coherentes- deben mantener la fase constante respecto de otra.
Monocromáticas, es decir, de una sola longitud de onda.
Igual polarización lineal.

Interferencia por doble rendija (Young-1801)

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



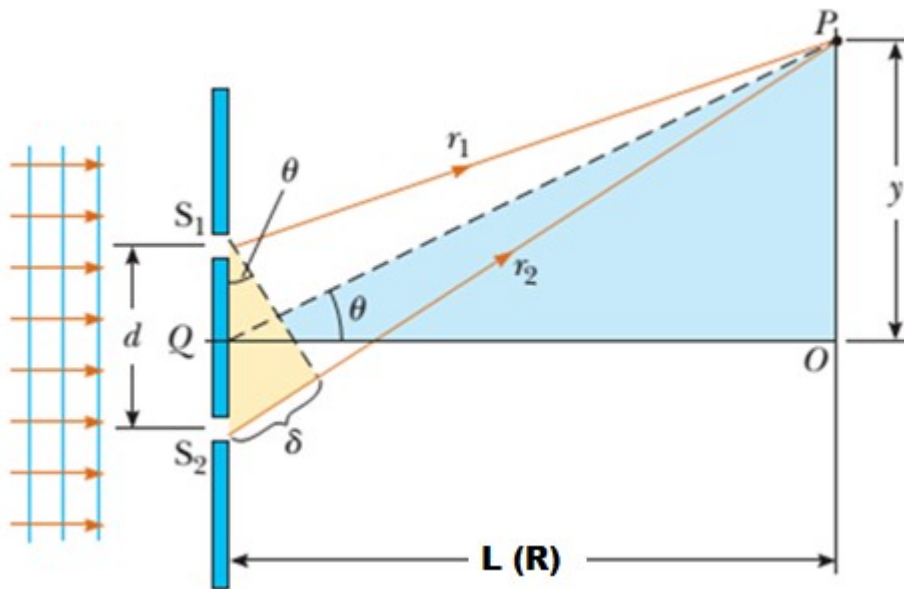
Ancho S_0 1 mm

Ancho S_1 y S_2 : $1\mu\text{m}$

Separación entre S_1 y S_2 : mm

Distancia placa S_1 y S_2 a pantalla: del orden de 1 m

REPASO DE CLASE PASADA – Interferencia doble rendija



La diferencia de la longitud de las trayectorias está dada por

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

interferencia constructiva, dos ranuras:

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

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

interferencia destructiva, dos ranuras:

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

$$y_m = R \tan \theta_m$$

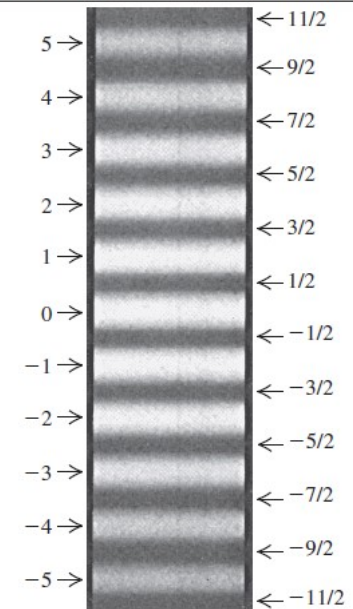
como $y_m \ll R$, y θ_m es muy pequeño, $\tan \theta_m \cong \sin \theta_m$,

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

La separación entre franjas consecutivas:
(es la misma para máximos y mínimos)

$$\Delta y = \frac{R}{d} \lambda$$

m (regiones brillantes con interferencia constructiva)	$m + 1/2$ (regiones oscuras con interferencia destructiva)
---	---

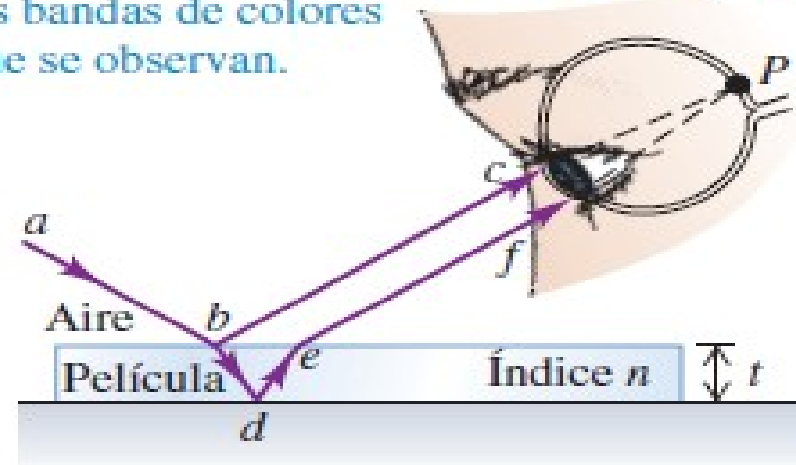


REPASO DE CLASE PASADA – Interferencia película delgada

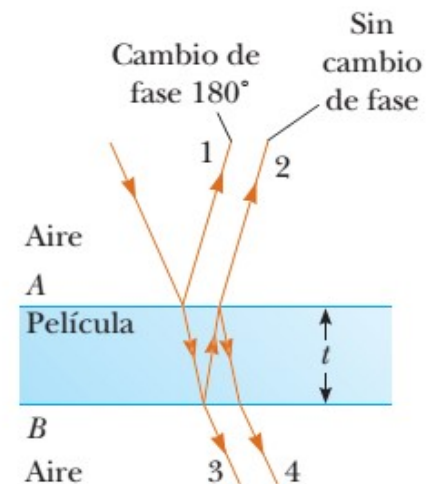


La luz reflejada en las superficies superior e inferior de la película llega junta al punto P en el ojo y experimenta interferencia.

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



Quando hay una reflexión en una interfase donde $n_1 < n_2$ (por ejemplo del aire al vidrio) se produce un cambio de fase de 180° en la onda reflejada, lo que equivale a media longitud de onda. Si la reflexión en la interfase donde $n_1 > n_2$ (por ejemplo del vidrio al aire) NO se produce un cambio de fase de 180° en la onda reflejada, lo que equivale a media longitud de onda.



REPASO DE CLASE PASADA –Interferencia película delgada

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

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

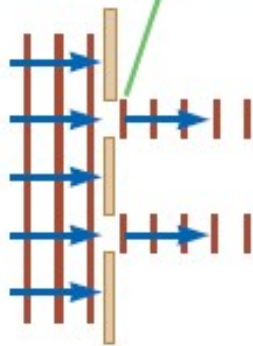
Reflexión destructiva: $2t = m\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$

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

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

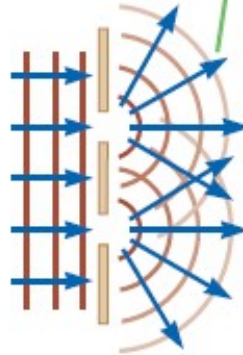
DIFRACCIÓN

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



a

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

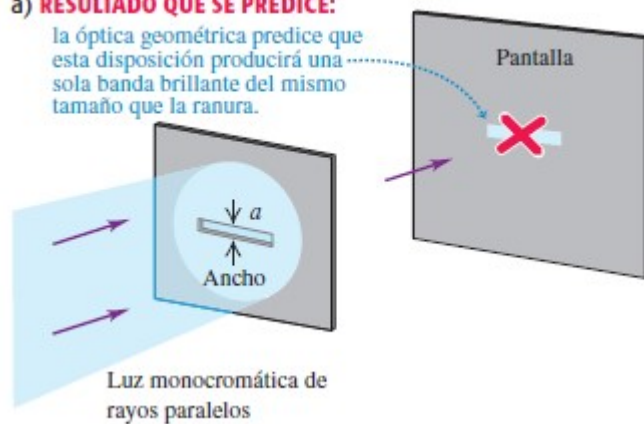


Haz de luz incide sobre una o dos rendijas.

Difracción: comportamiento general de las ondas al dispersarse cuando pasan a través de una rendija o de un obstáculo. En general, la difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de una pequeña abertura, alrededor de obstáculos o mediante bordes agudos.

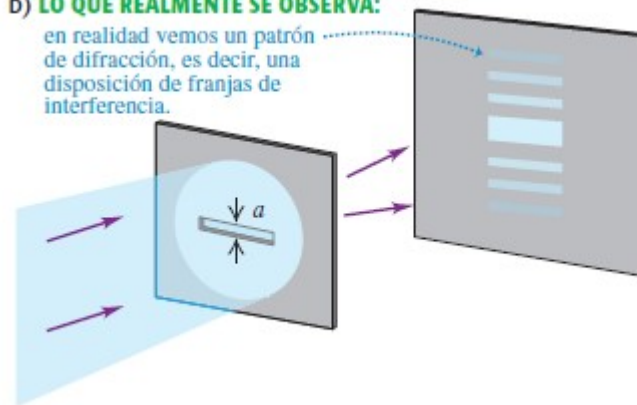
a) **RESULTADO QUE SE PREDICE:**

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.



DIFRACCIÓN

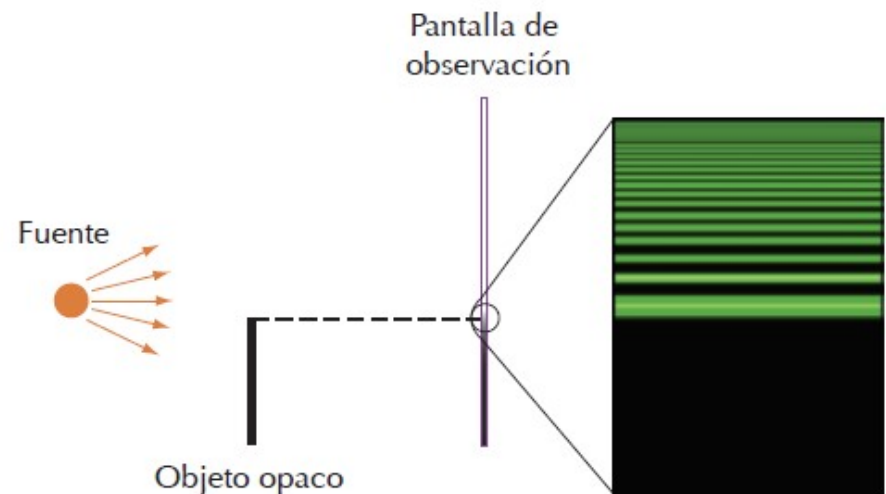
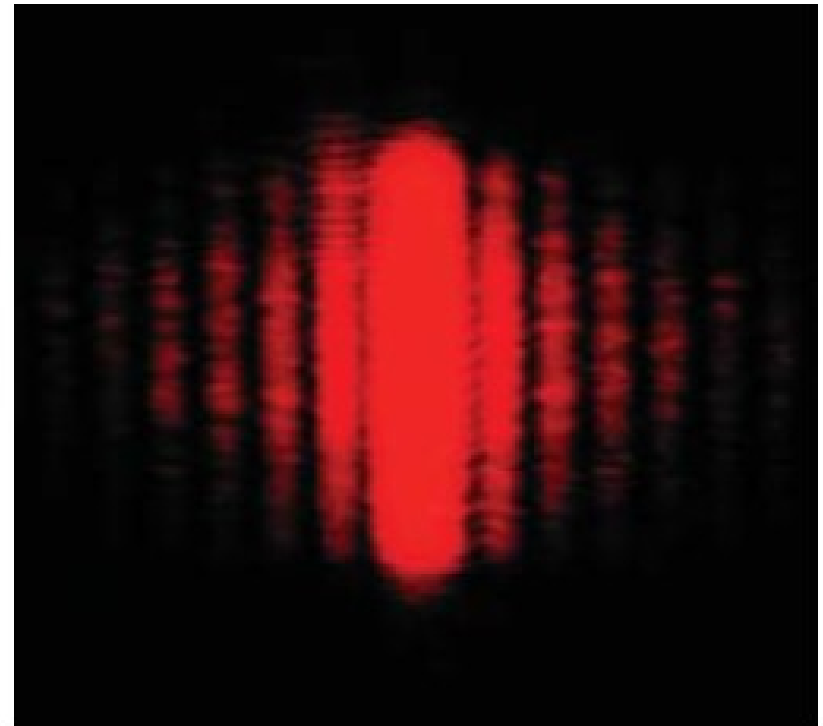
Por ejemplo, cuando una sola rendija estrecha se coloca entre una fuente de luz distante (o un haz láser) y una pantalla, la luz produce un **patrón de difracción** como el de la figura.

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.



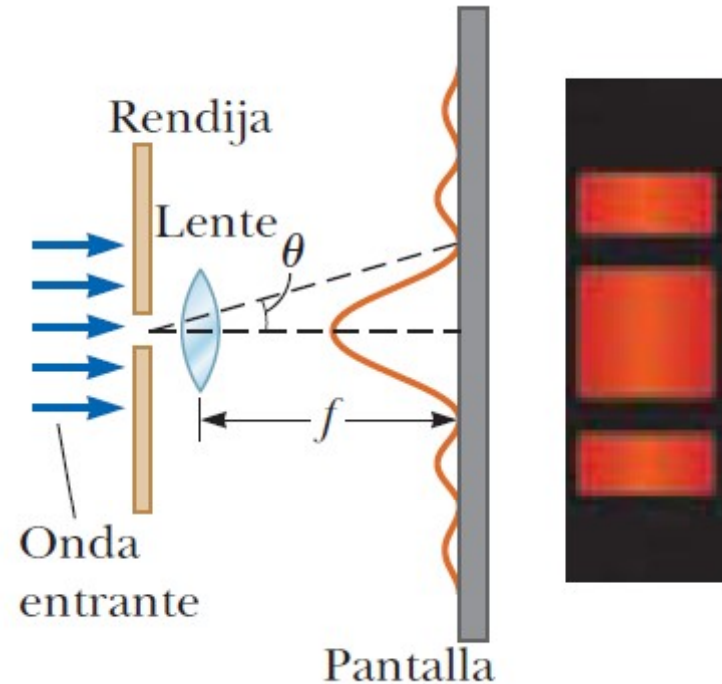
DIFRACCIÓN

Difracción de Fraunhofer (o de campo lejano) de una rendija. La pantalla está a una distancia mucho mayor que el tamaño de la rendija (se aproxima de este modo a que los los rayos son paralelos).

Cuando los rayos salen de l objeto difractante en direcciones paralelas (la pantalla de observación lejos de la rendija o con 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.

Se muestra una fotografía de un patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.



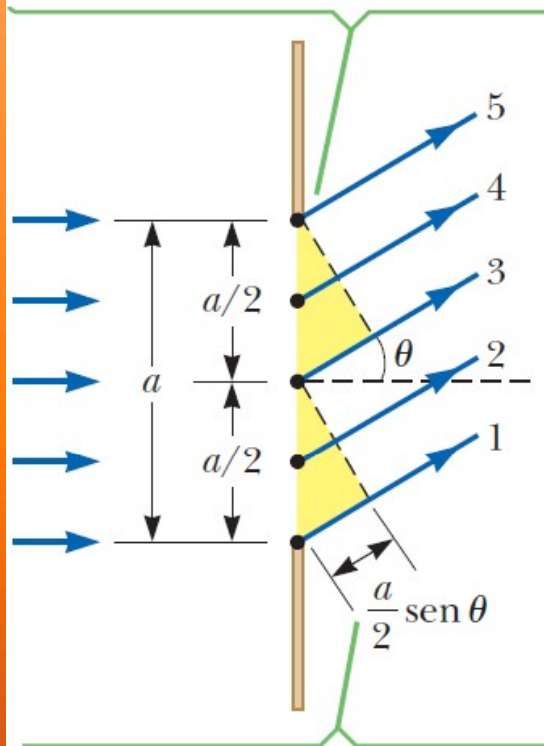
No existe una distinción fundamental entre *interferencia* y *difracción*.

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 secundarias que pasan a través de una abertura, o con un número muy grande de fuentes o aberturas.

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 $(a/2) \sin \theta$.

Anteriormente supusimos que las rendijas tenían ancho despreciable y que actuaban como fuentes lineales de luz.

Ahora consideraremos **una rendija de ancho a** y analizaremos el patrón de **difracción de Fraunhofer**

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, vamos a 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.

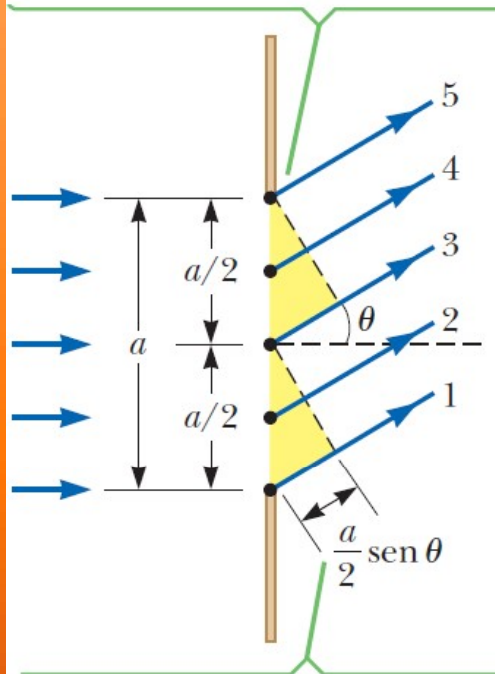
La onda 1 viaja más que la onda 3 por una cantidad igual a la diferencia de trayectoria $(a/2) \sin \theta$.

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.

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 $(a/2) \sin \theta$.

Esto es cierto para dos ondas cualesquiera que se originan en puntos separados por medio ancho de rendija porque su diferencia de fase será de 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:

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

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

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

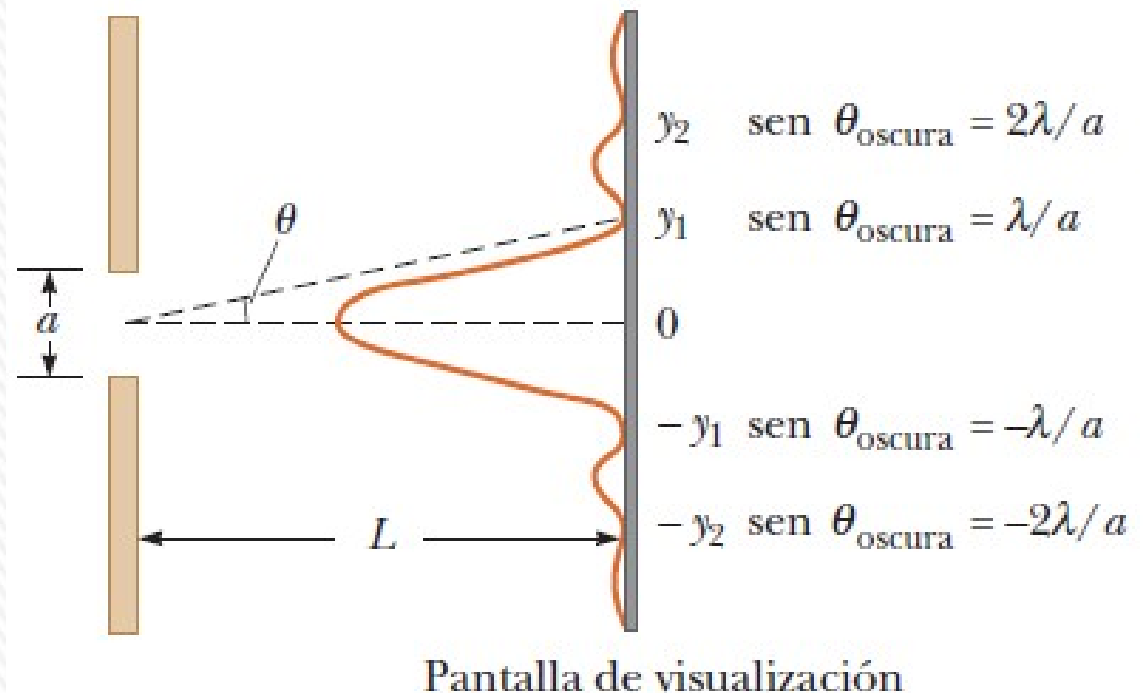


DIFRACCIÓN DE UNA SOLA RENDIJA

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

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.



RED DE DIFRACCIÓN

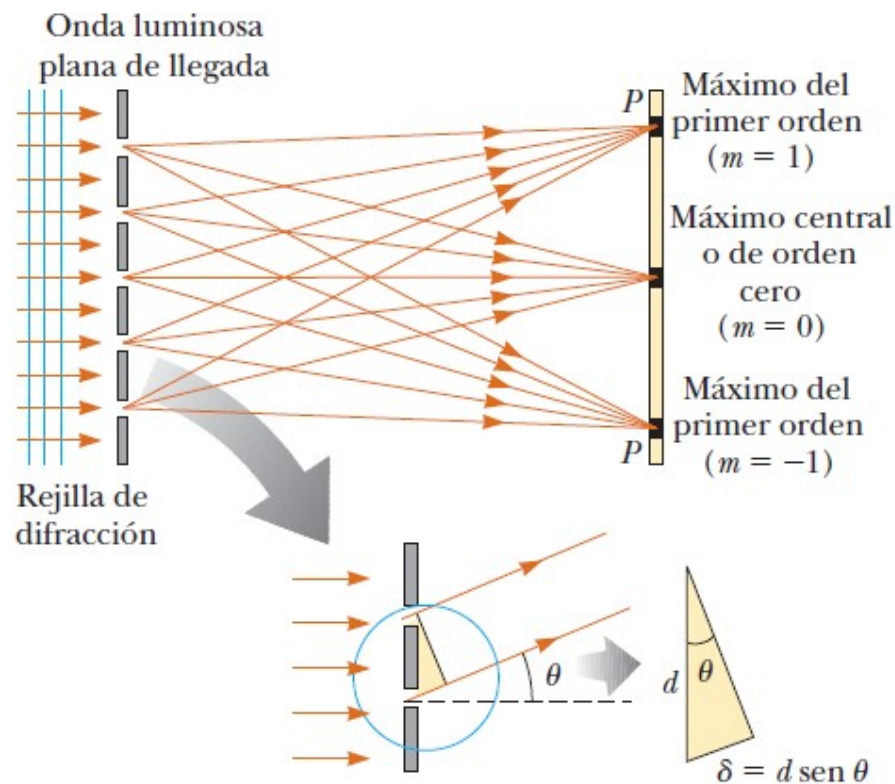
La rejilla o red de difracción es un dispositivo que sirve para analizar fuentes de luz y consiste en un gran número de rendijas paralelas igualmente espaciadas.

Se fabrican rayando con gran precisión líneas paralelas sobre una placa de vidrio.

Los paneles claros entre rayas actúan como rendijas.

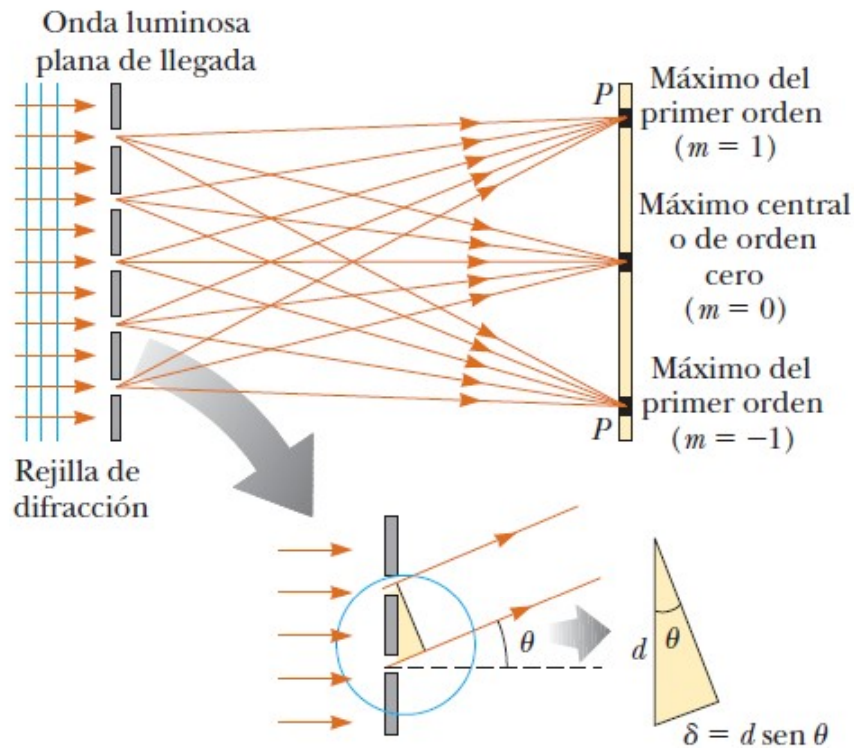
Una rejilla típica contiene muchos miles de líneas por centímetro.

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, $d = (1/5.000) \text{ cm} = 2 \times 10^{-6} \text{ m}$.



Se muestra un diagrama 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 $d \cdot \text{sen } \theta$.

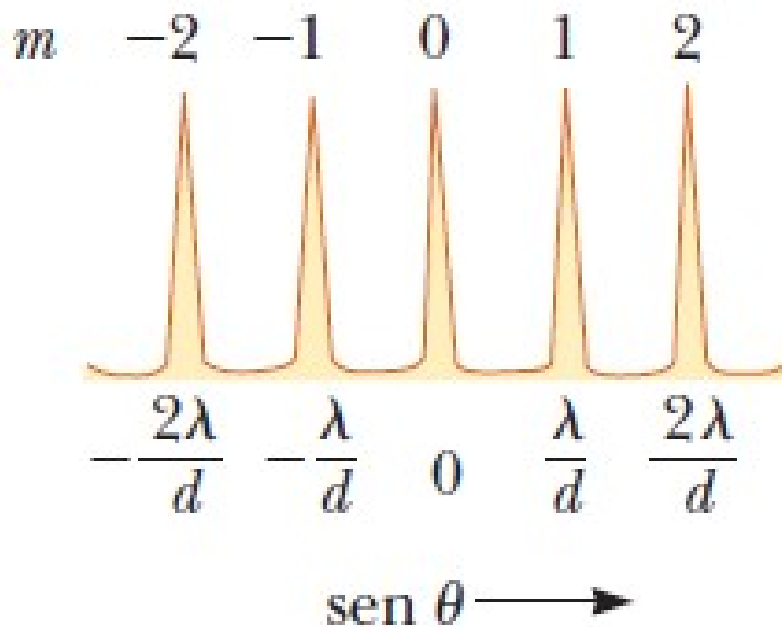
Si esta diferencia de trayectoria es igual a una longitud de onda o cierto múltiplo entero de una longitud de onda, las ondas de todas las rendijas estarán en fase en P y en dicho punto se observará una línea brillante.

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 (o en forma equivalente a una diferencia de recorrido de $m\lambda$).

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.

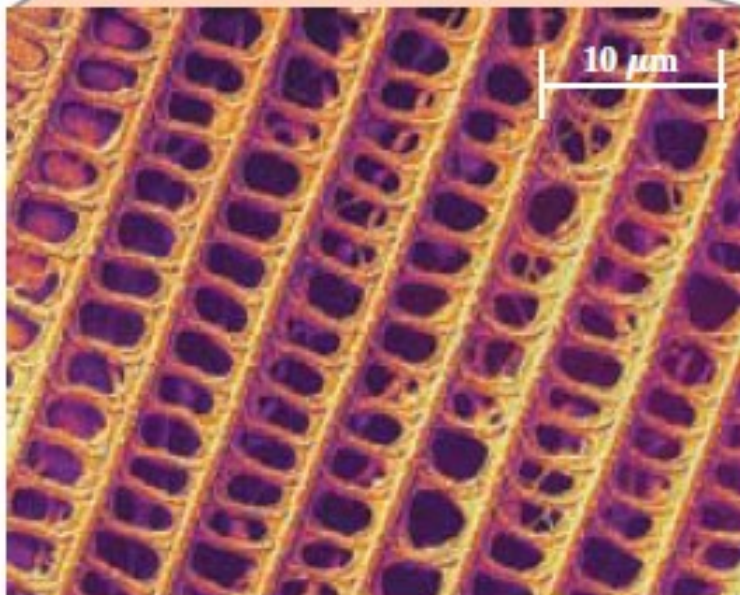
Superficie CD : pista ranurada en espiral (separación $\approx 1 \mu\text{m}$): **rejilla de reflexión.**

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.

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.8

Difracción- a) Luz con 600 nm de longitud de onda cae sobre una rendija de 0,400 mm de ancho y forma un patrón de difracción sobre una pantalla a 1,50 m de distancia. Encuentre la posición de la primera banda oscura a cada lado del máximo central y el ancho del máximo central.

Es un caso de difracción por una rendija de campo lejano.

Datos: $\lambda = 600 \text{ nm}$ $a = 0,400 \text{ mm} = 4,00 \times 10^{-4} \text{ m}$ $L = 1,50 \text{ m}$

la condición general para **interferencia destructiva para una sola rendija de ancho a es:**

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

Como estamos en la condición de campo lejano, podemos hacer la aproximación, para la primer mínimo o franja oscura ($m=1$):

$$y_1 = L \tan \theta \cong L \sin \theta = L \frac{\lambda}{a}$$
$$y_1 = L \tan \theta \cong L \sin \theta = L \frac{\lambda}{a} = (1,50) \frac{600 \times 10^{-9}}{4,00 \times 10^{-4}} = 2,25 \times 10^{-3} \text{ m}$$

La primer banda oscura corresponde a $m = 1$, y la distancia desde el centro del máximo central vale: **$y_1 = 2,25 \text{ mm}$**

El máximo central se extiende desde la banda oscura de $m = 1$ hasta la banda correspondiente a $m = -1$, por tanto vale $2y_1$. **$\Delta y = 4,50 \text{ mm}$**

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.8

b) Una pantalla se coloca a 50,0 cm de una sola rendija, que se ilumina con luz de 680 nm de longitud de onda. Si la distancia entre el primero y tercer mínimos en el patrón de difracción es 3,00 mm, ¿cuál es el ancho de la rendija?

Es un caso de difracción por una rendija de campo lejano.

Datos: $\lambda = 680 \text{ nm}$ $L = 50,0 \text{ cm}$ $(y_3 - y_1) = 3,00 \text{ mm}$

$$\sin \theta_m \cong \tan \theta_m = \frac{y_m}{L} = m \frac{\lambda}{a} \quad y_m = mL \frac{\lambda}{a}$$

$$y_3 - y_1 = 3L \frac{\lambda}{a} - 1L \frac{\lambda}{a} = 2L \frac{\lambda}{a}$$

$$a = \frac{2L\lambda}{(y_3 - y_1)} = \frac{2(0,500)(680 \times 10^{-9})}{3,00 \times 10^{-3}} = 2,27 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$a = 0,227 \text{ mm}$$



EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.8

c) El espectro del hidrógeno tiene una línea roja a 656 nm y una línea violeta a 434 nm. ¿Qué separación angular entre estas dos líneas espectrales se obtiene con una rejilla de difracción que tiene 4.500 líneas/cm?

Es un caso de rejilla de difracción

Datos: $\lambda_R = 656 \text{ nm}$ $\lambda_V = 434 \text{ nm}$ $L = 50,0 \text{ cm}$ $(y_3 - y_1) = 3,00 \text{ mm}$

espaciado de la rejilla vale: $d = \frac{1,00 \text{ cm}}{4500} = 2,222 \times 10^{-6} \text{ m}$ $d = 2222 \text{ nm}$

Como la condición de máximos es $d \sin \theta = m\lambda$ $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right)$

$$\Delta\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda_{rojo}}{d} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda_{violeta}}{d} \right)$$

$$\Delta\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m \times 656}{2222} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{m \times 434}{2222} \right)$$

$$\Delta\theta_1 = 5,91^\circ;$$

$$\Delta\theta_2 = 13,2^\circ;$$

$$\Delta\theta_3 = 24,5^\circ$$

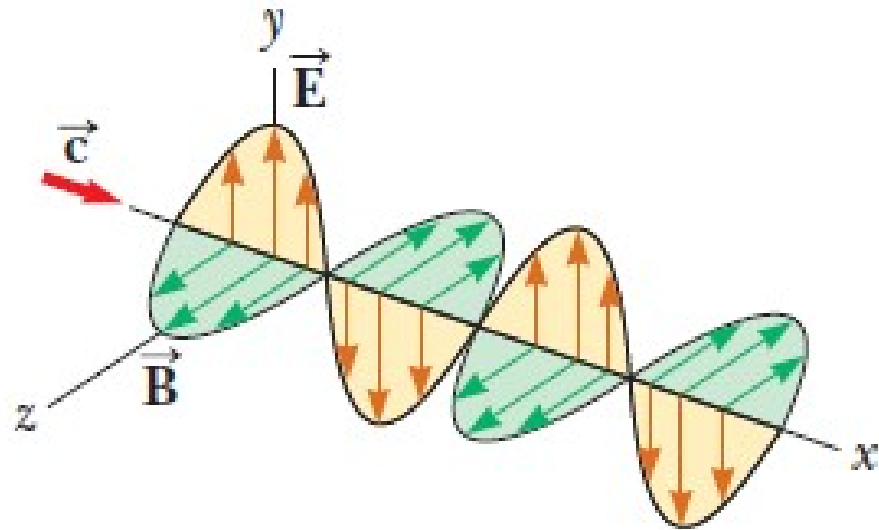
no hay para $m > 3$

d=	2.22222E-06	m	2222	nm
m=	1	2	3	4
$\theta_{rojo} =$	0.299695741	0.6316275	1.08797501	#iNUM!
$\theta_{violeta} =$	0.196583247	0.40132571	0.62606251	0.89671088
$\Delta\theta = (\text{rad})$	0.103112494	0.23030179	0.4619125	#iNUM!
$\Delta\theta = (^\circ)$	5.907910719	13.1953206	26.465637	#iNUM!



POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

La luz es una onda electromagnética, y por tanto transversal, con los vectores de campo eléctrico \vec{E} y magnético \vec{B} asociados con la onda perpendiculares entre sí y también con la dirección de propagación de la onda (\vec{c}).



Un haz de luz ordinario consiste en un gran número de ondas electromagnéticas emitidas por átomos o moléculas de la fuente de luz.

Las cargas asociadas a los átomos vibran y actúan como pequeñas antenas emisoras.

Cada átomo produce una onda con su propia orientación de \vec{E} , que corresponde a la dirección de 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, dado que todas las direcciones de vibración son posibles, la onda electromagnética resultante es una superposición de ondas producidas por las fuentes atómicas individuales.

POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

El resultado es una onda de luz **no polarizada**, figura a.

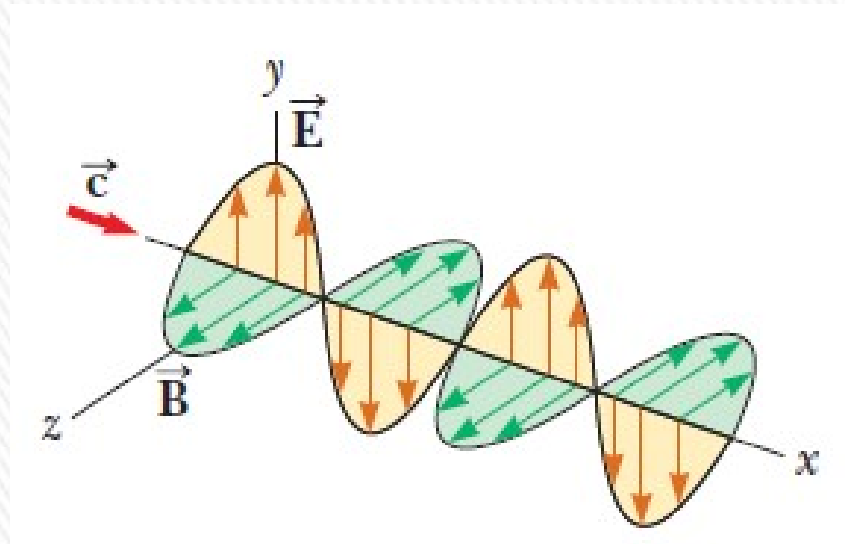
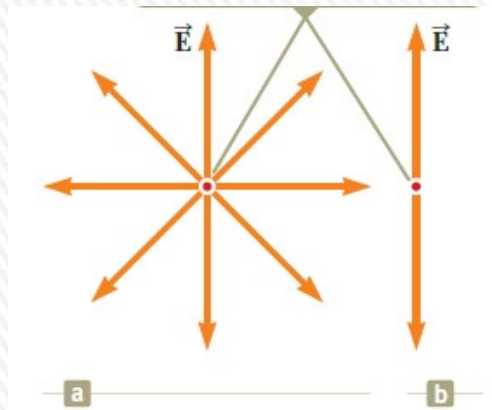
Todas las direcciones de \mathbf{E} son de igual forma probables y están en un plano (el plano de la página) perpendicular a la dirección de propagación.

Una onda está **linealmente polarizada** si el campo eléctrico \mathbf{E} vibra en la misma dirección *en todo momento en un punto particular*, figura b.

A veces se describe como *polarizada plana o sólo polarizada*.

*Esta onda está linealmente polarizada en la dirección y . Conforme la onda se propaga en la dirección x , \mathbf{E} siempre está en la dirección y . El plano que forma \mathbf{E} y la dirección de propagación se llama **plano de polarización de la onda (plano xy)**.*

Es posible obtener un haz linealmente polarizado a partir de un haz no polarizado al remover todas las ondas del haz excepto aquellas con vectores de campo eléctrico que oscilan en un solo plano.



Veremos cuatro procesos para hacer esto: 1) absorción selectiva, 2) reflexión, 3) doble refracción y 4) dispersión o esparcimiento (o scattering).

Polarización por absorción selectiva

Es la técnica más común para polarizar luz.

Se usa un material que transmite ondas que tengan vectores de \mathbf{E} que vibren en un plano paralelo a cierta dirección y absorban las ondas con vectores de \mathbf{E} que vibren en direcciones perpendiculares a dicha dirección.

En 1932, E. H. Land descubrió un material, el **Polaroid**, que polariza luz a través de absorción selectiva mediante moléculas orientadas.

Se fabrica en hojas delgadas de hidrocarburos de cadena larga, que se estiran durante la fabricación de modo que las moléculas se alinean. Después se sumergen en una solución de yodo, de modo que las moléculas se convierten en buenos conductores eléctricos.

La conducción tiene lugar principalmente a lo largo de las cadenas de hidrocarburos, debido a que los electrones de valencia de las moléculas se pueden mover con facilidad sólo a lo largo de dichas cadenas.

Como resultado, **las moléculas fácilmente absorben luz que tiene un vector de campo eléctrico paralelo a las cadenas y transmiten luz con un vector de campo eléctrico perpendicular a las cadenas.**

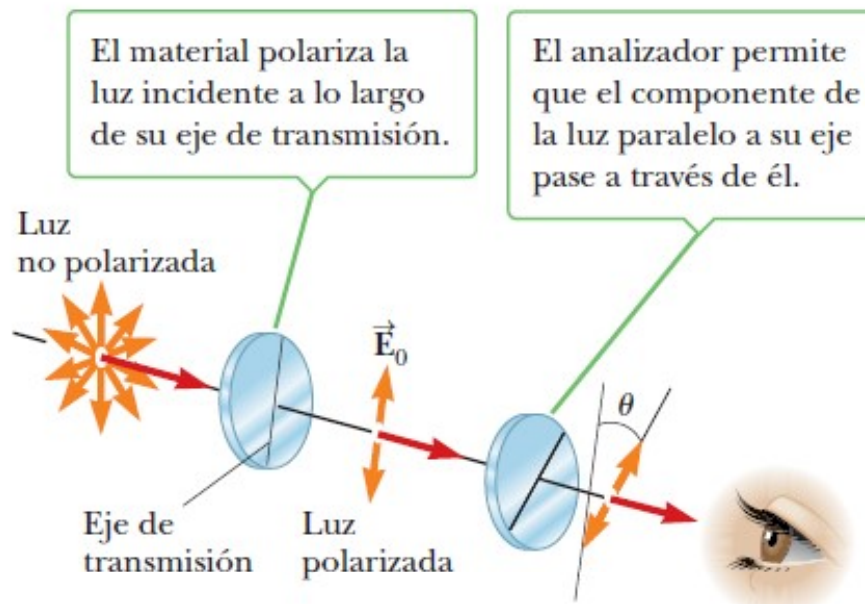
La dirección perpendicular a las cadenas moleculares es el **eje de transmisión.**

En un polarizador ideal, se absorbe toda la luz con \mathbf{E} perpendicular al eje de transmisión.

Los polarizadores reducen la intensidad de la luz que pasa a través de ellos.



Polarización por absorción selectiva



Un haz de luz no polarizado incide sobre la 1er. hoja polarizadora (**polarizador**) con un determinado eje de transmisión (vertical).

La luz pasa a través de esta hoja se polariza verticalmente y el vector de campo eléctrico transmitido es \mathbf{E}_0 .

Una segunda hoja polarizadora (**analizador**), intercepta este haz con su eje de transmisión a un ángulo de θ con el eje del polarizador.

La componente de \mathbf{E}_0 perpendicular al eje del analizador se absorbe por completo, mientras que la componente de \mathbf{E}_0 paralela al eje del analizador, $E_0 \cos \theta$, se transmite a través del analizador.

Como la intensidad del haz transmitido varía como el cuadrado de su amplitud E , se concluye que la intensidad del haz (polarizado) transmitido a través del analizador varía como: **$I = I_0 \cos^2 \theta$ (Ley de Malus)**.

I_0 es la intensidad de la onda polarizada incidente sobre el analizador.

La ley de Malus, se aplica a dos materiales polarizadores cualesquiera que tengan ejes de transmisión a un ángulo θ uno con otro.

Si la luz no polarizada de intensidad I_0 se envía a través de un solo polarizador ideal, la luz linealmente polarizada que se transmite tiene intensidad $I_0/2$.

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.10

a) Luz no polarizada pasa a través de dos hojas Polaroid. El eje de transmisión del analizador forma un ángulo de $35,0^\circ$ con el eje del polarizador.

¿Qué fracción de la luz no polarizada original se transmite a través del analizador y qué fracción de la luz original se absorbe en el analizador?

Por la ley de Malus, la fracción de la intensidad de la luz no polarizada incidente que se transmite por el polarizador vale: $I_0/2$.

Esta fracción es la que llega al segundo Polaroid (analizador).

La intensidad que sale de este analizador vale:

$$I = (I_0/2) \cos^2 \theta = (I_0/2) \cos^2 35,0^\circ = 0,336 I_0$$

Se transmite un 33,6% de la intensidad incidente por parte del analizador.

Como sobre el analizador incidió un 50,0% de la intensidad inicial y se transmitió un 33,6 %, la cantidad absorbida fue del 16,4%.

El analizador absorbe 16,4% de la intensidad incidente.

Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada es por completo polarizada, parcialmente polarizada o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia.

Si el ángulo de incidencia es 0° o 90° (un ángulo normal o que pasa rozando), el haz reflejado es no polarizado.

Sin embargo, para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , la luz reflejada está parcialmente polarizada.

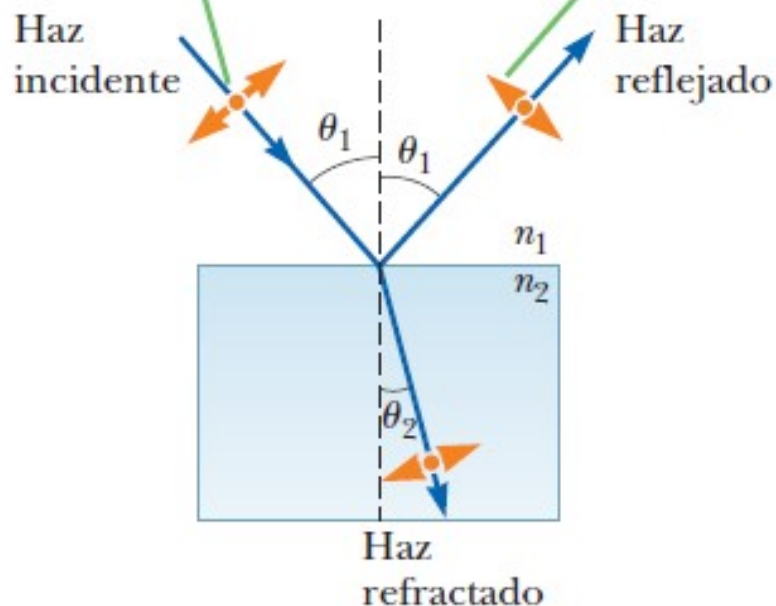
Se comprueba que para un ángulo de incidencia particular, el haz reflejado se polariza totalmente.

Sea un haz de luz no polarizado que incide sobre una superficie.

El haz se puede describir mediante dos componentes de campo eléctrico, uno paralelo a la superficie (representado mediante puntos) y el otro perpendicular al primer componente y a la dirección de propagación (representados mediante flechas anaranjadas).

Los puntos representan las oscilaciones del campo eléctrico paralelo a la superficie reflectante y perpendicular a la página.

Las flechas representan las oscilaciones del campo eléctrico perpendicular a las representadas por los puntos.



Polarización por reflexión

Se encuentra que el componente paralelo se refleja con más intensidad que los otros componentes y el resultado es un haz parcialmente polarizado.

Además, el haz refractado también es parcialmente polarizado.

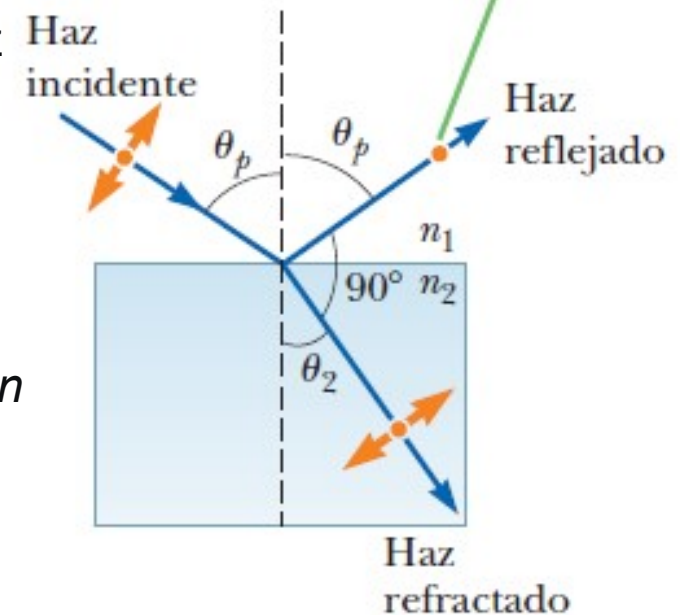
Ahora supongamos que el ángulo de incidencia, θ_1 , varía hasta que el ángulo entre los haces reflejado y refractado es 90° .

A este ángulo de incidencia particular, llamado **ángulo de polarización θ_p** , **el haz reflejado es completamente polarizado**, con su vector de campo eléctrico paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado es parcialmente polarizado.

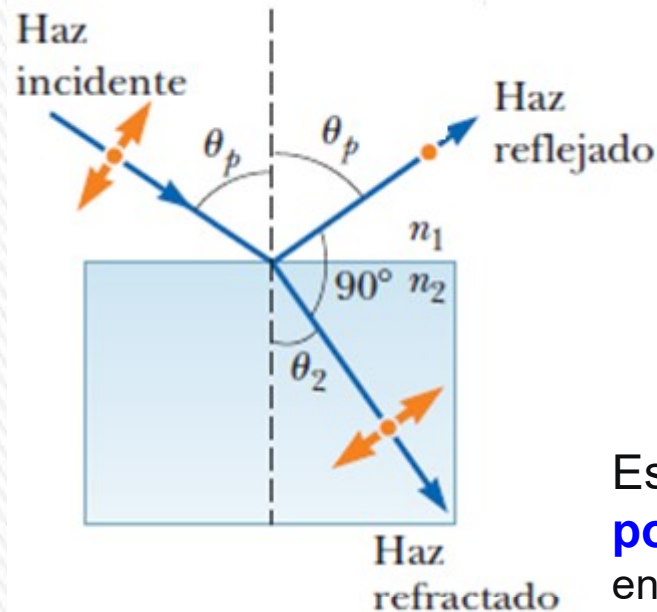
Una expresión que relaciona el ángulo de polarización con el índice de refracción de la superficie reflejante se puede obtener usando la figura: $\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ$ es decir: $\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$
Al usar la ley de Snell y tomar $n_1 = n_{\text{aire}} = 1,00$ y $n_2 = n$

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_2}$$

Los electrones en la superficie oscilan en la dirección del rayo reflejado (perpendicular a los puntos y paralelo a la flecha azul) no envían la energía en esta dirección.



Polarización por reflexión



$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_2}$$

Como $\sin \theta_2 = \sin (90^\circ - \theta_p) = \cos \theta_p$ la expresión para n se puede escribir:

$$n = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_p}{\cos \theta_p} = \tan \theta_p$$

Esta ecuación se llama **ley de Brewster** y el **ángulo de polarización** θ_p a veces se llama **ángulo de Brewster** en honor a su descubridor, sir David Brewster (1781-1868).

Como n varía con la longitud de onda para una sustancia dada, el ángulo de Brewster también es una función de la longitud de onda.

La polarización por reflexión es un fenómeno común.

La luz solar que se refleja del agua, vidrio o nieve es parcialmente polarizada. Si la superficie es horizontal, el vector de campo eléctrico de la luz reflejada tiene un fuerte componente horizontal.

Si la incidencia no es desde el aire, sino de un medio con índice de refracción n_1 , la ley de Brewster se expresa de la siguiente forma:

ley de Brewster

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.10

b) El ángulo crítico para reflexión interna total para zafiro rodeado por aire es $34,4^\circ$. Calcule el ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire.

El ángulo crítico para la reflexión interna total está dado por: $n_1 \cdot 1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_{\text{CRIT}}$

por tanto en nuestro caso, considerando que $n_1 = n_{\text{aire}} = 1$, y que $n_2 = n_{\text{zafiro}}$:

$$n_{\text{zafiro}} = \frac{1}{\text{sen}\theta_{\text{CRIT}}} = \frac{1}{\text{sen}34,4^\circ} = 1,7700$$

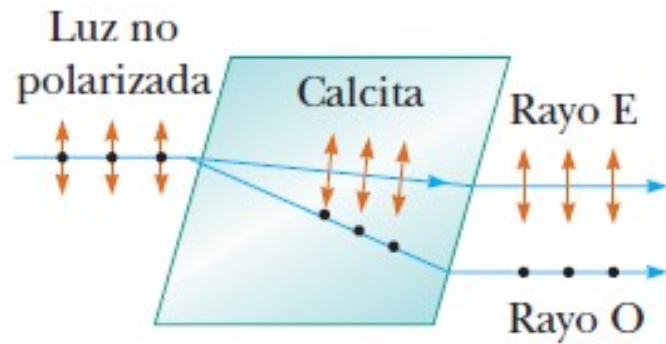
Ley de Brewster: $\tan \theta_P = \frac{n_2}{n_1}$

$$\theta_P = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \tan^{-1}(n_{\text{zafiro}}) = \tan^{-1}(1,770) = 60,53^\circ$$

Ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire: $60,5^\circ$.



Polarización por refracción doble



La luz no polarizada que incide en un ángulo al eje óptico en un cristal de calcita se divide en un rayo ordinario (O) y un rayo extraordinario (E). Estos dos rayos están polarizados en direcciones mutuamente perpendiculares.
(El dibujo no está a escala.)

La luz también puede ser polarizada por refracción doble.

Cuando un rayo de luz incidente no polarizada entra en algunos **cristales anisótropos (calcita y cuarzo)**, que se caracterizan por tener dos índices de refracción, se divide en dos rayos llamados **rayo ordinario y extraordinario**, que se encuentran **polarizados en direcciones perpendiculares** entre sí y viajan a velocidades diferentes.

Este fenómeno se denomina **doble refracción o birrefringencia**.

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 (**eje óptico**), en la que los rayos ordinario y extraordinario tienen la misma rapidez.

Si la luz entra a un material birrefringente en un ángulo distinto al eje óptico, los índices de refracción diferentes ocasionarán que los dos rayos polarizados se dividan y viajen en direcciones diferentes.

El índice de refracción n_O , para el rayo ordinario es el mismo en todas direcciones, mientras que el índice de refracción n_E varía con la dirección de propagación.

Polarización por refracción doble

La diferencia en rapidez para los dos rayos es máximo en la dirección perpendicular al eje óptico.

Si coloca una pieza de calcita sobre una hoja de papel y se mira a través del cristal cualquier cosa escrita sobre papel, se verá dos imágenes (formada por los dos rayos)

Algunos materiales como el vidrio y el plástico se convierten en birrefringentes cuando son sometidos a un esfuerzo.

Si se somete el plástico a un esfuerzo, las regiones de mayor esfuerzo se hacen birrefringentes y cambia la polarización de la luz que pasa a través de él.

Índices de refracción para algunos cristales de doble refracción a una longitud de onda de 589.3 nm.

Cristal	n_O	n_E	n_O/n_E
Calcita (CaCO_3)	1.658	1.486	1.116
Cuarzo (SiO_2)	1.544	1.553	0.994
Nitrato de sodio (NaNO_3)	1.587	1.336	1.188
Sulfito de sodio (NaSO_3)	1.565	1.515	1.033
Cloruro de zinc (ZnCl_2)	1.687	1.713	0.985
Sulfuro de zinc (ZnS)	2.356	2.378	0.991



Polarización por dispersión (esparcimiento)

Cuando la luz incide sobre un sistema de partículas, como un gas, los electrones en el medio pueden absorber y volver a radiar parte de la luz.

La absorción y re-radiación de la luz por el medio, llamada **dispersión** (más exactamente se debería hablar de esparcimiento, difusión o **scattering**), es lo que hace que se polarice la luz solar que llega a un observador en la Tierra directa sobre su cabeza.

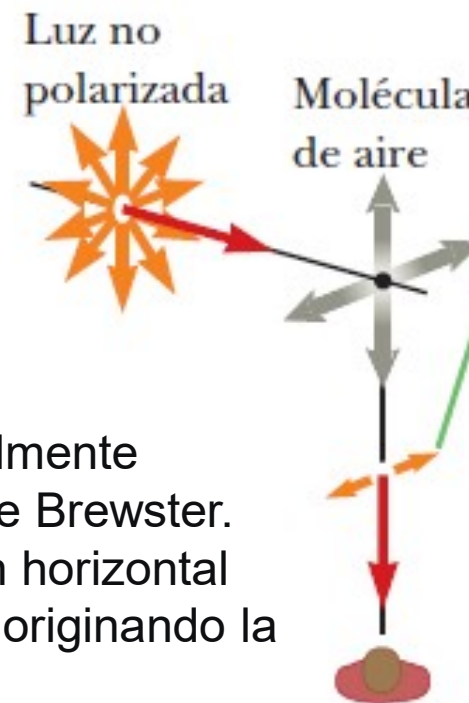
Esto se puede observar al mirar directamente hacia arriba a través de un par de lentes para el Sol hechas de vidrio polarizado.

Menos luz pasa a través de ciertas orientaciones de las lentes que de otras.

El fenómeno es similar al de la creación de una luz totalmente polarizada al reflejarse de una superficie en el ángulo de Brewster. Un haz de luz solar no polarizado que viaja en dirección horizontal (paralelo a la tierra) incide sobre una molécula del aire, originando la vibración de sus electrones.

Estas cargas en vibración actúan como las cargas vibratorias de una antena.

La luz dispersada viaja perpendicular a la luz incidente y está polarizada en un plano, porque las vibraciones verticales de las cargas en la molécula de aire no envían la luz en esta dirección.

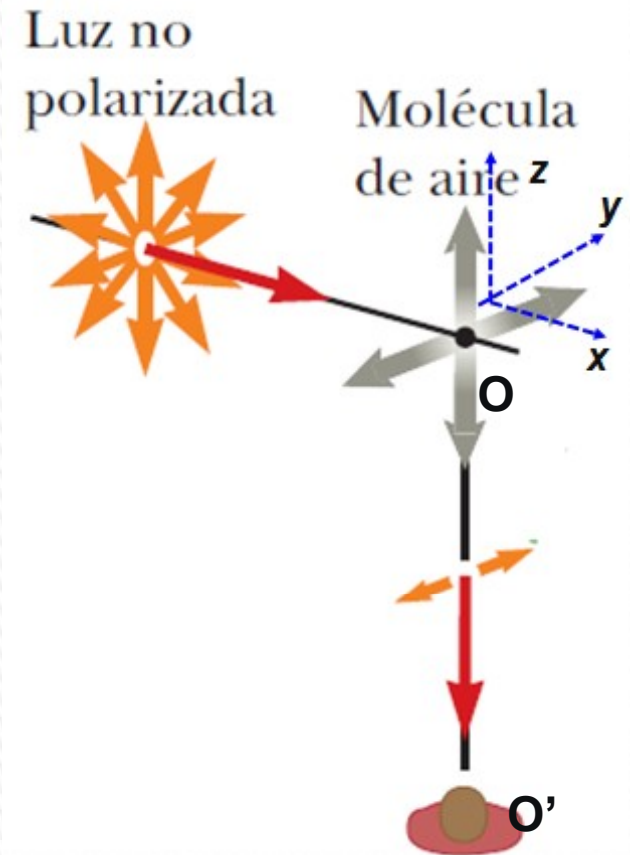


Polarización por dispersión (esparcimiento)

Los electrones de la molécula oscilan en respuesta a las componentes eléctricas de la onda incidente, siendo su movimiento equivalente a dos dipolos oscilatorios cuyos ejes están en las direcciones y y z en O . Por tanto la componente horizontal del vector del campo eléctrico de la onda incidente crea una componente horizontal de la vibración de las cargas, y la componente vertical del vector da como resultado una componente vertical de la vibración.

En las ondas electromagnéticas transversales, un dipolo oscilatorio no irradia a lo largo de su propio eje. Así, un observador en O' no recibiría ninguna radiación del dipolo en O que oscila en la dirección z . La radiación que llega a O' provendría por completo del dipolo en O que oscila en la dirección y y se polarizaría linealmente en la dirección y .

Si el observador de la figura mira directo hacia arriba (perpendicularmente a la dirección original de propagación de la luz), las oscilaciones verticales de las cargas (según z) no emiten radiación alguna hacia él. Por tanto, esta persona verá una luz totalmente polarizada en la dirección horizontal (según y), como lo indican las flechas cafés



Polarización por dispersión (esparcimiento)

Si mirara en otras direcciones, la luz estaría parcialmente polarizada en la dirección horizontal.

Variaciones en el color de la luz dispersada en la atmósfera se pueden entender como sigue.

Cuando incide luz de diversas longitudes de onda λ sobre moléculas de gas de diámetro d , donde $d \ll \lambda$ la intensidad relativa de la luz dispersa varía en función de $1/\lambda^4$ (scattering de Rayleigh).


La condición $d \ll \lambda$ se cumple para la dispersión a causa de moléculas de oxígeno (O_2) y de nitrógeno (N_2) en la atmósfera, cuyos diámetros son cercanos a 0,2 nm. Por esto las longitudes de onda corta (luz violeta) se dispersan con mayor eficiencia que las longitudes de onda larga (luz roja).

En consecuencia, cuando la luz solar es dispersada por las moléculas de gas que existen en el aire, la radiación de longitud de onda corta (violeta) se dispersa con mayor intensidad que la radiación de longitud de onda larga (rojo):

$(750 \text{ nm}/380 \text{ nm})^4 = 15$; la luz esparcida contiene 15 veces más luz violeta que roja.

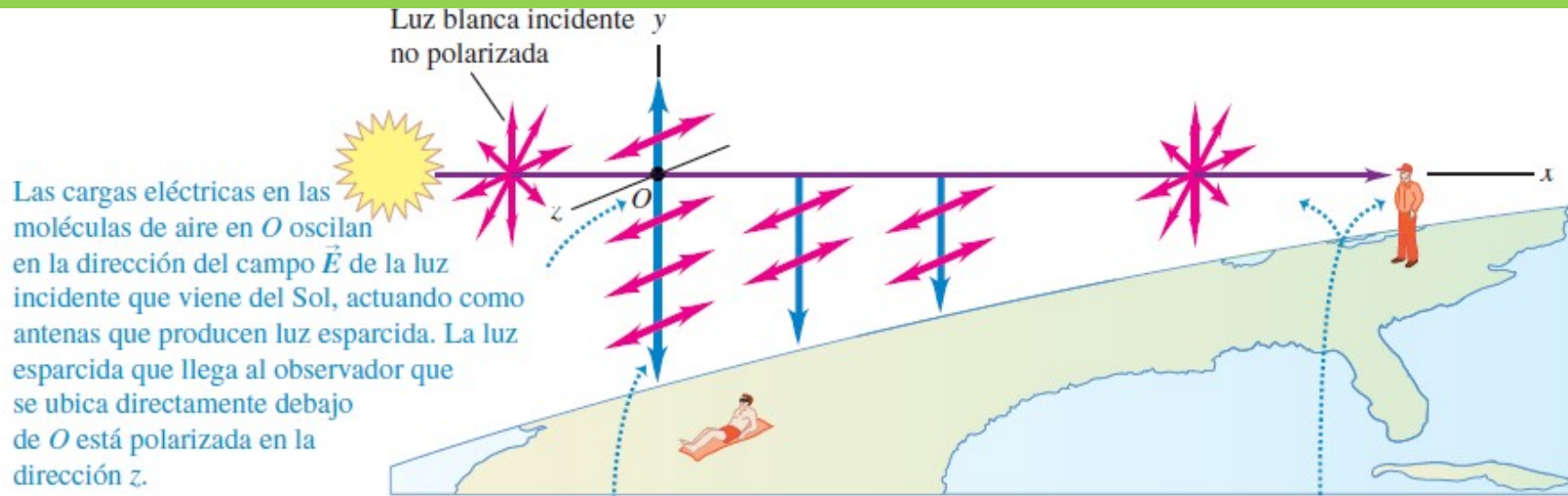
Cuando mira hacia el cielo en una dirección que no sea hacia el Sol, lo que se ve es la luz dispersa, que es predominantemente violeta.

Sin embargo, el ojo humano no son muy sensible a la luz violeta.

La luz del siguiente color en el espectro, azul, se dispersa con menos intensidad que el violeta, pero los ojos son más sensibles a la luz azul que a la luz violeta. 

Por esto, se observa un cielo azul.

Polarización por dispersión (esparcimiento)



Las cargas eléctricas en las moléculas de aire en O oscilan en la dirección del campo \vec{E} de la luz incidente que viene del Sol, actuando como antenas que producen luz esparcida. La luz esparcida que llega al observador que se ubica directamente debajo de O está polarizada en la dirección z .

Las moléculas de aire esparcen la luz azul con más eficacia que la luz roja; vemos el cielo que está arriba gracias a la luz esparcida, por lo que se ve de color azul.

Este observador mira la luz del Sol de color rojizo porque se ha esparcido la mayor parte de la luz azul.

Si se mira hacia el Sol en el ocaso (o hacia el este al amanecer), se estará mirando en dirección hacia el Sol y viendo luz que ha pasado a través de una gran distancia de aire a través de la atmósfera .

La mayor parte de la luz azul ha sido dispersada por el aire entre usted y el Sol.

La luz que supera este recorrido a través del aire ha dispersado la mayor parte de su componente azul y, debido a eso está cargado hacia el extremo rojo del espectro; como resultado, se ven los colores rojo y naranja.

La luz blanca sin la luz azul se ve de color amarillo o rojo, lo cual explica el tono amarillo o rojizo que es frecuente ver durante el ocaso (y que percibe el observador en el extremo derecho de la figura.

Polarización por dispersión (esparcimiento)

En conclusión, el cielo es azul y los atardeceres son rojos debido a que la luz del cielo está parcialmente polarizada; por ello, el cielo se ve más oscuro desde ciertos ángulos que desde otros cuando se observa a través de unos anteojos Polaroid para sol.

Cuando miramos el cielo durante el día, la luz que se observa es la del Sol que ha sido absorbida y vuelta a irradiar en diferentes direcciones.

Si la Tierra no tuviera atmósfera, el cielo se vería tan negro durante el día como durante la noche, tal como lo ve un astronauta en el espacio o en la Luna.

Las nubes contienen una gran concentración de gotas de agua o cristales de hielo suspendidos, que también esparcen la luz. Como tal concentración es elevada, la luz que pasa a través de una nube tiene mucho más oportunidades de esparcirse que la luz que pasa a través de un cielo despejado.

En consecuencia, luz de *todas las longitudes de onda terminan por* esparcirse fuera de la nube y, por eso, la nube es de color blanco.

La leche se ve blanca por la misma razón: el esparcimiento se debe a los glóbulos de grasa de la leche.



Polarización en animales

Muchos animales pueden ser capaces de percibir la polarización de luz, usando esa habilidad con objetivos de navegación ya que la polarización lineal de la luz de cielo es siempre perpendicular a la dirección del sol.

Esta capacidad es muy común entre los insectos, incluyendo las abejas, que usan esta información para orientar su danza de la abeja. La sensibilidad a la polarización también ha sido observada en especies de pulpo, calamar, sepia y mantis.

El rápido cambio en la coloración de la piel de la sepia se usa para la comunicación, polarizando la luz que se refleja sobre ella.

La mantis religiosa es conocida por tener un tejido reflexivo selectivo que polariza la luz.

El ojo humano es débilmente sensible a la polarización, sin necesidad de la intervención de filtros externos.



Visión de las abejas y la luz polarizada del cielo- Los ojos de una abeja pueden detectar la polarización de la luz. Las abejas aprovechan esta capacidad para volar entre la colmena y las fuentes de alimento. Una abeja ve la luz no polarizada si observa directamente hacia el Sol, y la luz polarizada completamente si observa con un ángulo de 90° con respecto al Sol. Estas polarizaciones no se ven afectadas por la presencia de nubes, de modo que una abeja puede volar en relación con el Sol, incluso en un día nublado.