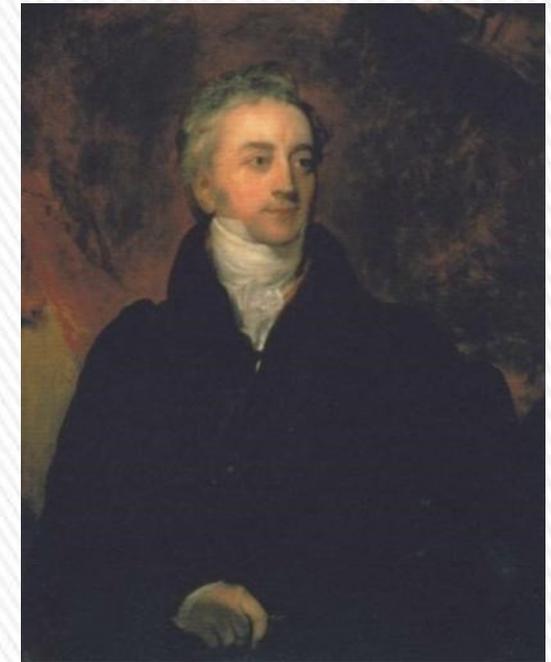


## 13- PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ



**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!!

# Interferencia y fuentes coherentes

El **principio de superposición** establece que la perturbación total ondulatoria en un punto cualquiera es la suma de las perturbaciones debidas a las ondas individuales. Para que la superposición de la luz sea posible de visualizar y formar un **patrón de interferencia**, las ondas luminosas deben cumplir ciertas condiciones, deben ser: **monocromáticas** es decir de una sola longitud de onda (o frecuencia) **coherentes** es decir deben mantener la fase constante respecto de otra.

Como las ondas electromagnéticas son transversales, se debe agregar que tengan la misma **polarización lineal** (que por ejemplo el campo eléctrico oscilen en el mismo plano y dirección).

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.

Sean dos fuentes  $S_1$  y  $S_2$  de igual amplitud y longitud de onda y con la misma polarización a lo largo de un mismo eje y equidistantes del origen.

La superposición de las ondas provenientes de estas fuentes, en distintos puntos dependerá de la diferencia  $\Delta r$  de las distancias recorridas ( $r_1$  desde  $S_1$  y  $r_2$  desde  $S_2$ ).

Así por ejemplo que cuando  $\Delta r$  es un número entero de longitudes de onda, las ondas llegan en fase y hay **interferencia constructiva**, ya que llegan dos máximos juntos.

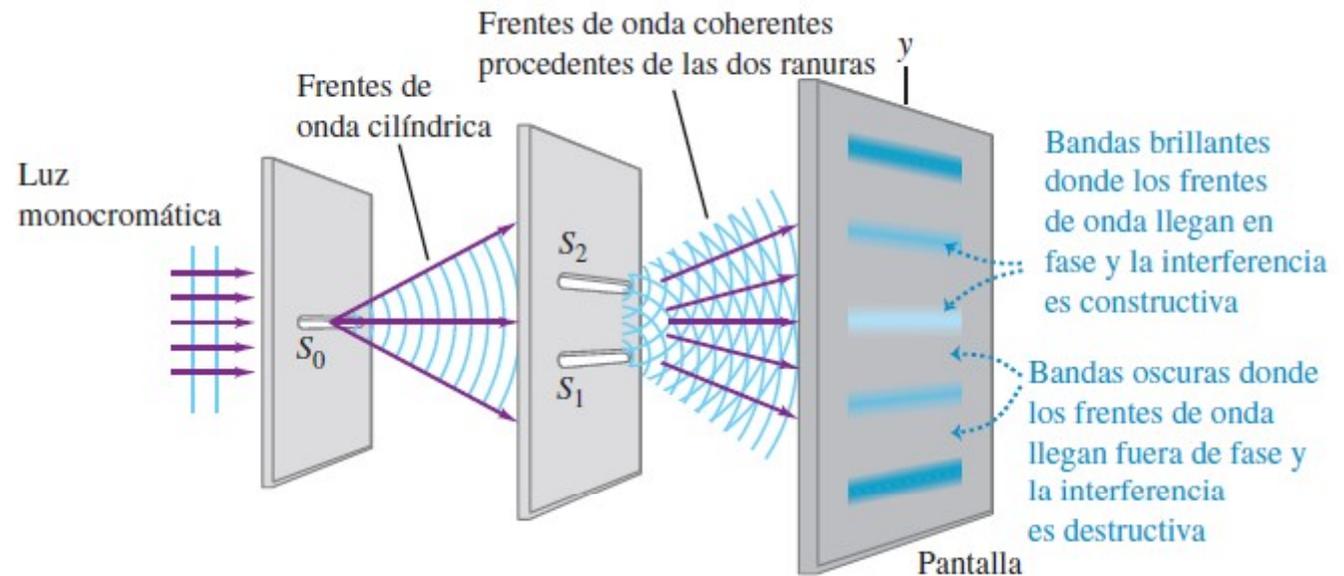
# Interferencia de luz procedente de dos fuentes

Primer experimento de interferencia de la luz de dos fuentes: Thomas Young (1801).

## Montaje de Young:

Fuente monocromática emite luz, se dirige a pantalla que con ranura angosta  $S_0$ , (aprox. 1 mm) que ilumina otra pantalla con 2 ranuras  $S_1$  y  $S_2$ , de ancho aprox. de  $1 \mu\text{m}$  separadas una distancia del orden del milímetro.

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



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.

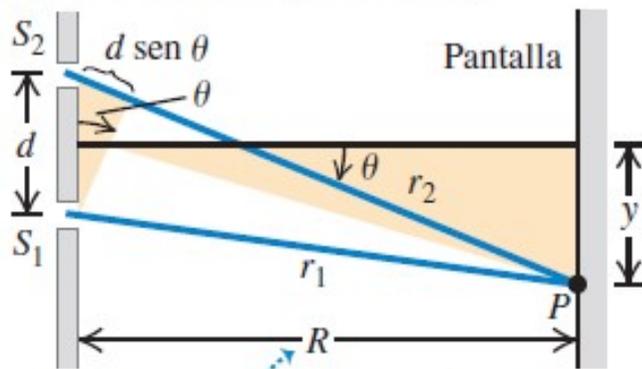
Para visualizar el patrón de interferencia, se coloca una pantalla a más de un metro de manera que la luz procedente de  $S_1$  y  $S_2$  incida sobre ella.

Simulación:

<https://ophysics.com/l5.html>

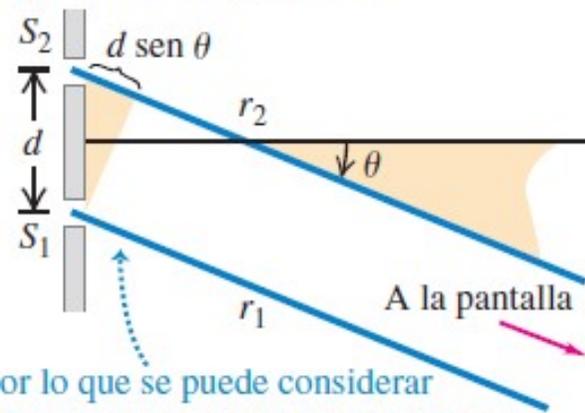
# Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

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 trayectoria es simplemente  $r_2 - r_1 = d \sin \theta$ .

La pantalla se ilumina 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.

Suponemos que la distancia  $R$  (o  $L$ ) 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.

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

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



# Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

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

## Interferencia constructiva y destructiva con dos ranuras

**Interferencia constructiva:** en puntos donde diferencia de las trayectorias es un número entero de longitudes de onda,  $m\lambda$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

las regiones brillantes en la pantalla se presentan en ángulos  $\theta$  en los que:

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

interferencia constructiva,  
dos ranuras

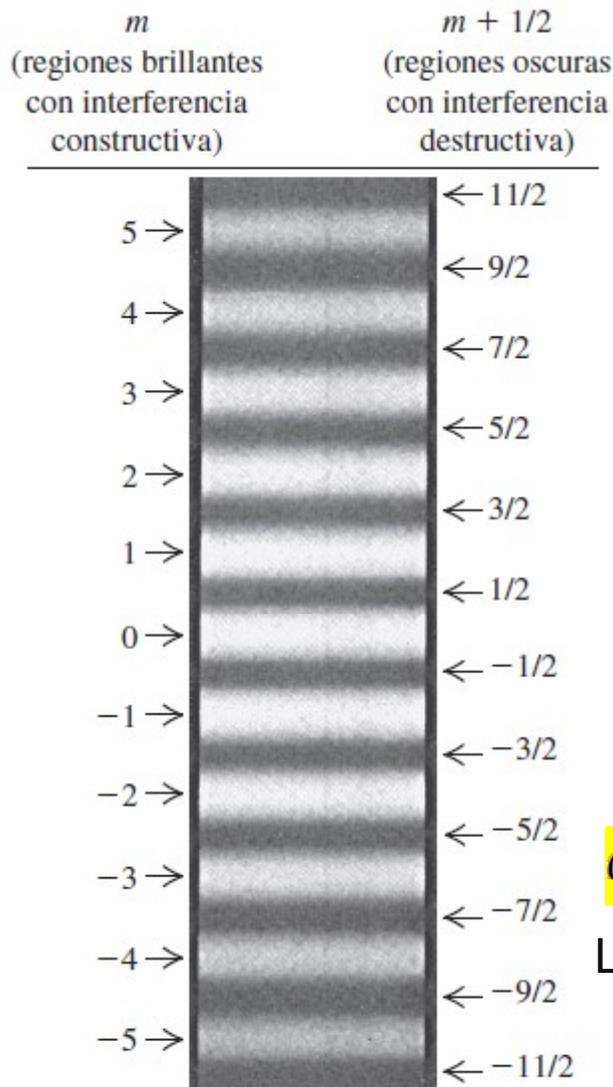
**Interferencia destructiva:** regiones oscuras en la pantalla en puntos para los que la diferencia de las trayectorias es un número semi-entero de longitudes de onda

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

interferencia destructiva,  
dos ranuras

Los resultados del experimento de 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



Patrón en pantalla: *sucesión de bandas* brillantes y oscuras, o **franjas de interferencia**, paralelas a las ranuras  $S_1$  y  $S_2$ .

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

$y_m$  *distancia entre el centro del patrón ( $\theta = 0$ ) al centro de la  $m$ -ésima banda brillante.*

$\theta_m$  *valor correspondiente de  $\theta$ ; así que:*

$$y_m = R \tan \theta_m$$

Como  $y_m \ll R$ , y  $\theta_m$  es *muy pequeño*,

$\tan \theta_m \cong \sin \theta_m$ ,

Entonces para ángulos pequeños:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad d \frac{y_m}{R} = m\lambda$$

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

La separación entre franjas consecutivas:  $\Delta y = \frac{R}{d} \lambda$

es la misma para máximos y mínimos

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  $\lambda$ .

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

## EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.1

Una pantalla de observación está puesta a una distancia de 1,2 m de una fuente de doble rendija. Si la distancia entre las dos rendijas es de 0,030 mm y la franja brillante de segundo orden está a 4,5 cm de la línea central,

- determinar la longitud de onda de la luz
- calcular la distancia entre franjas brillantes adyacentes.

$$L = 1,2 \text{ m} \quad d = 0,030 \text{ mm} = 3,0 \times 10^{-5} \text{ m} \quad y_{2\text{MAX}} = 4,5 \text{ cm} = 4,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

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

$$y_{2\text{MAX}} = L \left( \frac{2\lambda}{d} \right) \Rightarrow \lambda = \frac{d \cdot y_{2\text{MAX}}}{2L} = \frac{4,5 \times 10^{-2} (3,0 \times 10^{-5})}{2(1,2)} = 5,625 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 5,6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

b) Como los ángulos son pequeños, el espaciamiento entre franjas brillantes se puede tomar como lineal

$$\Delta y = \frac{y_{2\text{MAX}}}{2} = \frac{4,5 \text{ cm}}{2} = 2,25 \text{ cm}$$

$$\Delta y = 22 \text{ mm}$$

# INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS



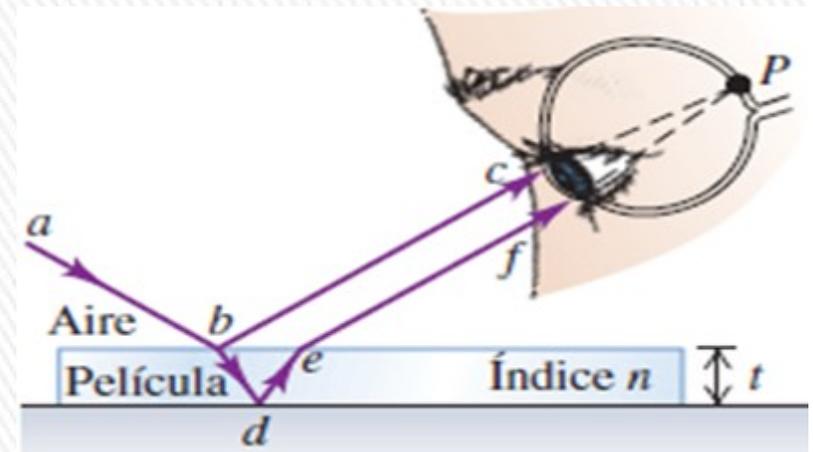
Efectos de interferencia se observan en películas delgadas (espesor del orden de  $\lambda$ ), como en capas finas de aceite sobre agua o en la superficie de una pompa de jabón. Los colores que se ven cuando incide luz blanca sobre estas películas resultan por la interferencia de ondas que se reflejan desde las dos superficies de la película.

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

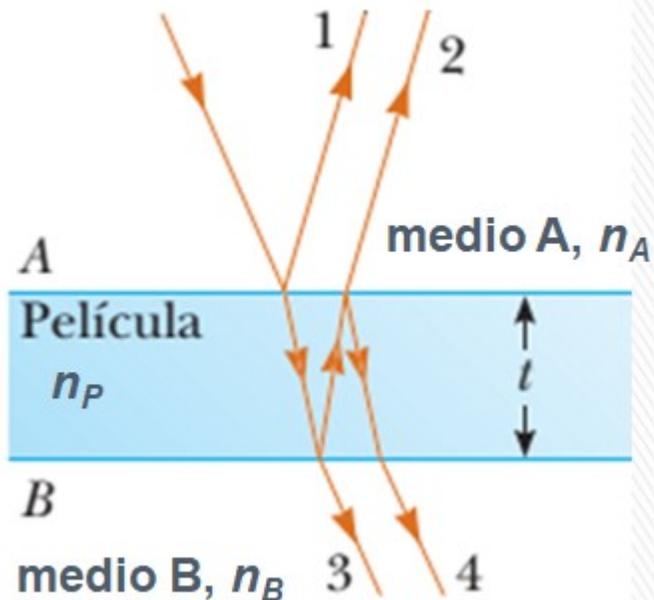
*La luz transmitida a través de la superficie superior se refleja parcialmente en la superficie inferior (trayectoria abdef).*

*Las dos ondas reflejadas llegan juntas al punto P en la retina del ojo y dependiendo de la relación de fase, interferirán en forma constructiva o destructiva.*

**Cuando hay una reflexión en una interfase donde  $n_1 < n_2$  se produce un cambio de fase de  $180^\circ$  en la onda reflejada, lo que equivale a media longitud de onda.**



# INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS



Si la película tiene espesor  $t$ , la luz tiene incidencia normal y longitud de onda  $\lambda_n$  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 (las habituales):

**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  $n_A > n_P$  y  $n_P > n_B$  no hay ninguna, o si  $n_A < n_P$  y  $n_P < n_B$  hay 2 cambios de fase

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

Si  $n_A < n_P$  y  $n_P > n_B$  o si  $n_A > n_P$  y  $n_P < n_B$  hay 1 cambio de fase

## EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.6

Una película de índice de refracción 1,33 y espesor 320 nm está suspendida en el aire. Si luz blanca incide normalmente sobre ella, ¿qué color tendrá la luz reflejada?

Rangos aproximados de longitud de onda para el espectro visible:

$\lambda_{\text{violeta}} = 380-430\text{nm}$ ,  $\lambda_{\text{añil}} = 430-450\text{nm}$ ,  $\lambda_{\text{azul}} = 450-500\text{nm}$ ,  $\lambda_{\text{celeste}} = 500-520\text{nm}$ ,  
 $\lambda_{\text{verde}} = 520-565\text{nm}$ ,  $\lambda_{\text{amarillo}} = 565-590\text{nm}$ ,  $\lambda_{\text{naranja}} = 590-625\text{nm}$ ,  $\lambda_{\text{rojo}} = 625-780\text{nm}$ .

$n = 1,33$ ;  $t = 320 \text{ nm}$

Interfase: aire-agua hay cambio de fase en  $180^\circ$

Interfase: agua-aire no hay cambio de fase en  $180^\circ$

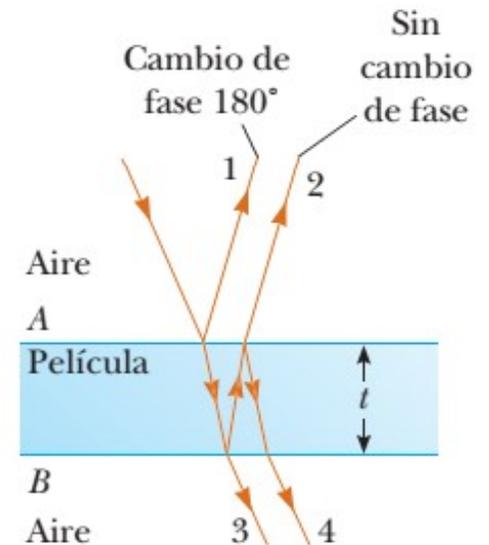
La condición de máximos es entonces:

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

$$\lambda = \frac{2nt}{\left(m + \frac{1}{2}\right)} = \frac{2(1,33)(320)}{\left(m + \frac{1}{2}\right)}$$

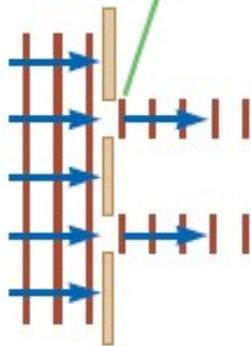
**$\lambda = 567 \text{ nm}$ : amarillo**

m	$\lambda \text{ (nm)}$	
0	1702,40	no visible
1	567,47	visible
2	340,48	no visible



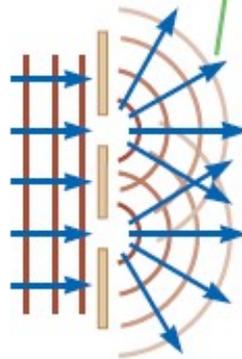
# DIFRACCIÓN

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*.

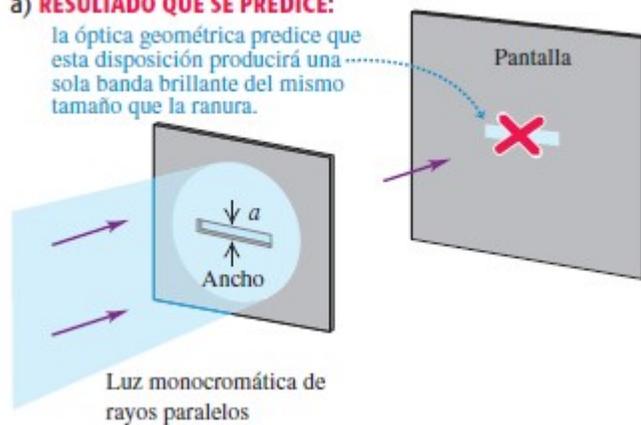


Haz de luz incide sobre dos rendijas o una...

**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.

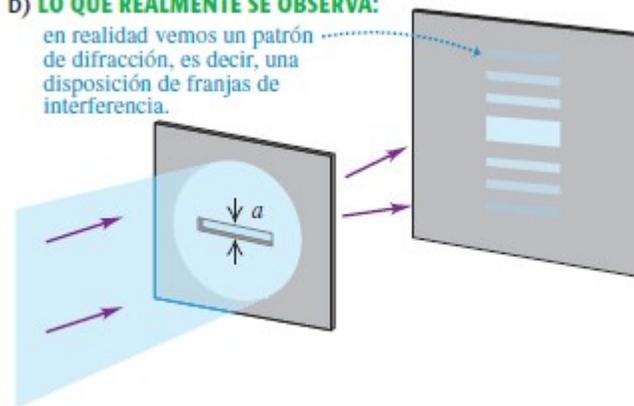
a) **RESULTADO QUE SE PREDICE:**

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

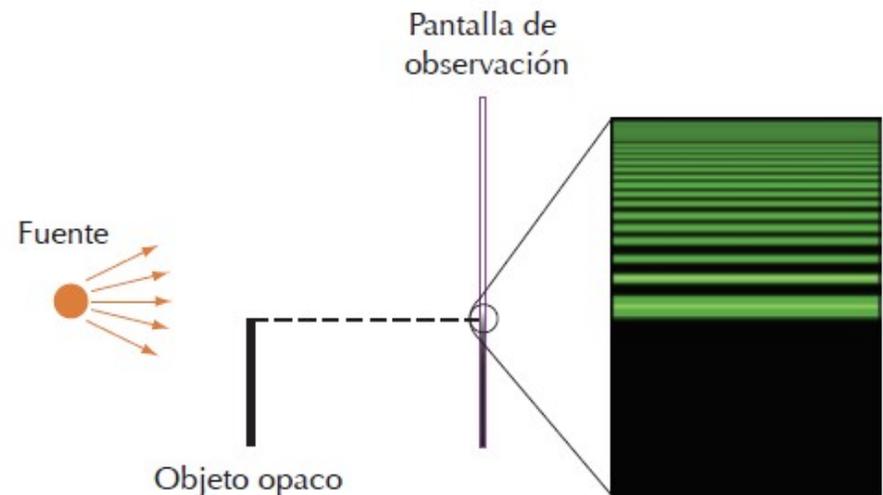
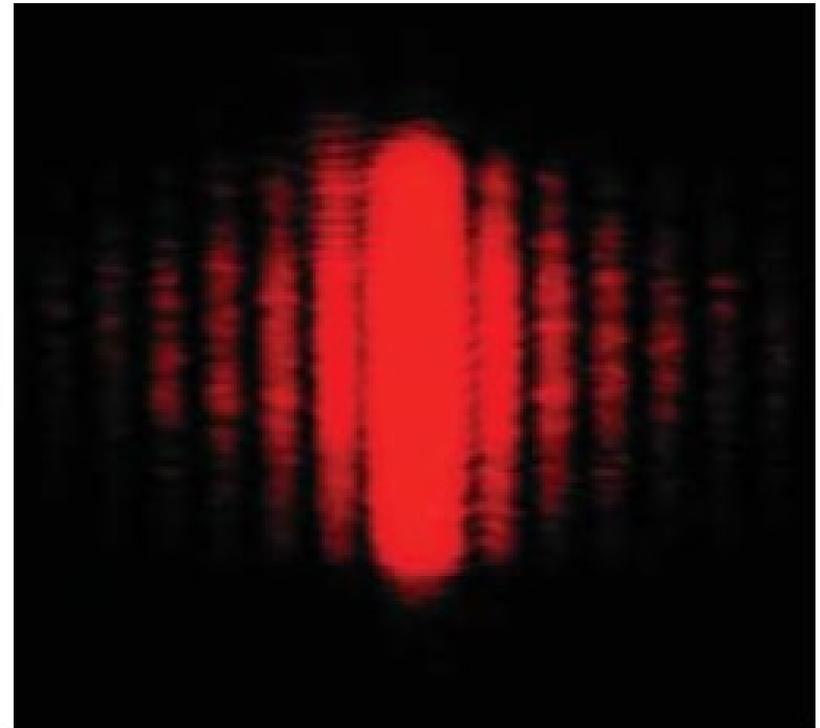
Por ejemplo, cuando una sola rendija estrecha se coloca entre una fuente de luz distante (o un haz láser) y una pantalla, la luz produce un **patrón de difracción** como el de la figura.

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.

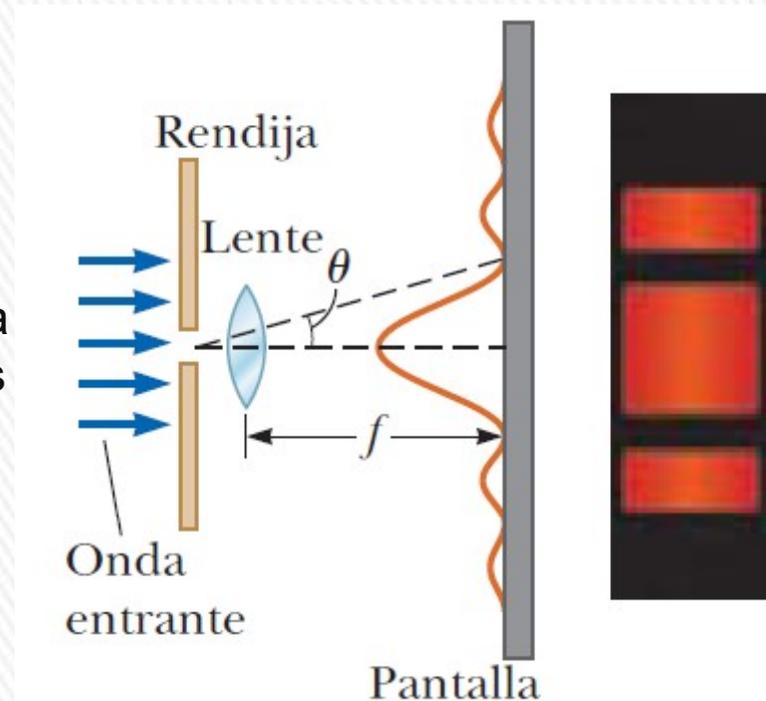
En la pantalla aparece en la región sobre el borde del objeto un patrón de difracción formado por franjas brillantes y oscuras.



# DIFRACCIÓN

**Difracción de Fraunhofer (o de campo lejano)**, cuando los rayos salen del 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.



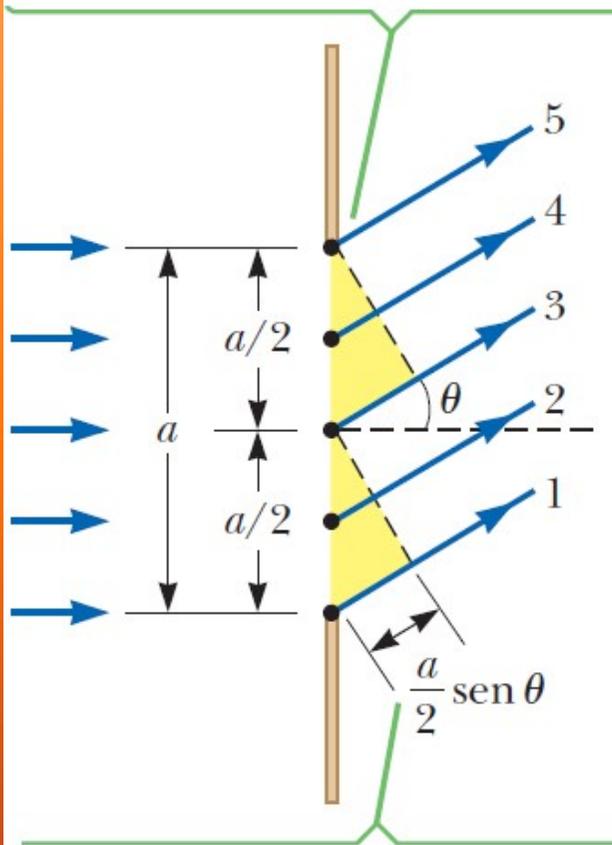
No existe una distinción fundamental entre *interferencia* y *difracción*.

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

Veremos qué sucede cuando consideramos los anchos de las rendijas.

Consideremos una sola rendija de ancho  $a$  (del orden de décimas de mm).

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

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  $\theta$ .

Se puede probar que 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  $\theta$  para los cuales el patrón de difracción tiene intensidad cero, donde se forma una franja oscura.

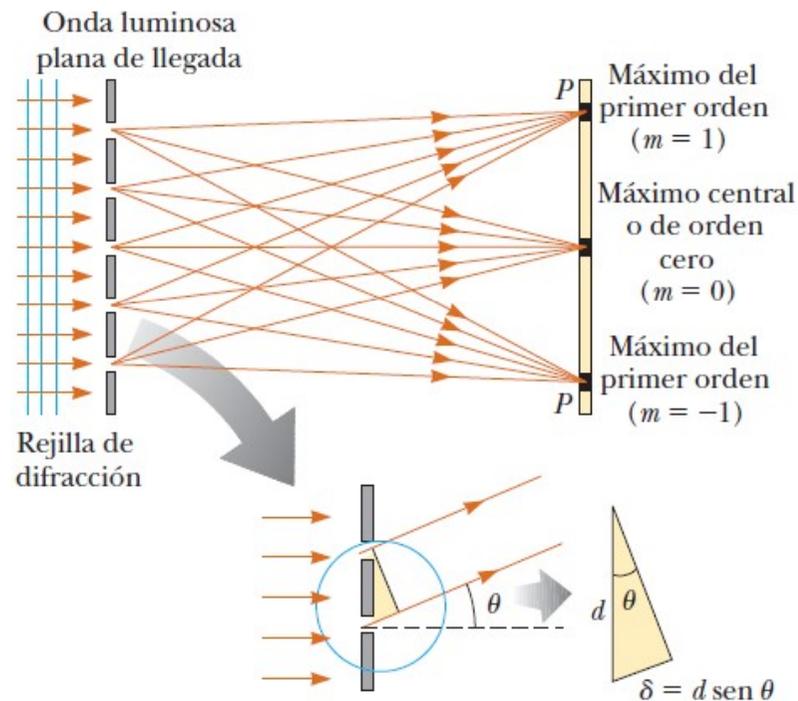
Las diversas franjas oscuras (puntos de intensidad cero) ocurren en los valores de  $\theta$  que satisfacen la ecuación anterior.

# RED DE DIFRACCIÓN

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

Una rejilla se elabora rayando líneas paralelas sobre una placa de vidrio con grandes paneles claros entre rayas actúan como rendijas.

Una rejilla típica contiene muchos miles de líneas por centímetro.



La intensidad del patrón sobre la pantalla es resultado de los efectos combinados de interferencia y difracción.

Cada rendija actúa como una fuente de ondas y todas las ondas parten en fase en las rendijas, pero para alguna dirección arbitraria  $\theta$ , las ondas recorren *diferentes longitudes* de trayectoria antes de llegar a un punto particular  $P$  sobre la pantalla.

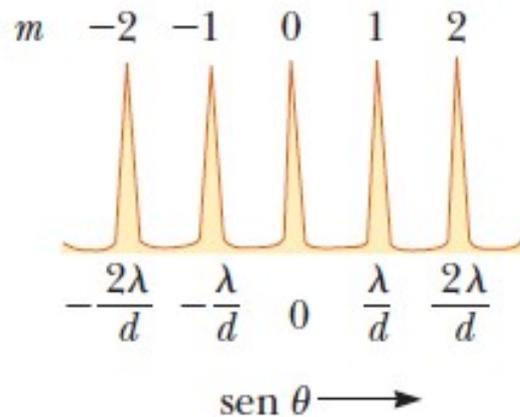
La diferencia de trayectoria entre ondas desde cualesquiera dos rendijas adyacentes es  $d \cdot \sin \theta$ .

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 **hay máximos** cuando:

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

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

# RED O REJILLA DE DIFRACCIÓN



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.

La condición para que se alcance la intensidad máxima en el patrón de la red de difracción es la misma que en el caso de la interferencia de dos fuentes; pero los máximos producidos por la rejilla son muy pronunciados y angostos .

La ecuación anterior se puede usar para calcular la longitud de onda a partir del espaciamiento de la rejilla y el ángulo de desviación  $\theta$ .

El entero  **$m$  es el número de orden del patrón 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  $\text{sen } \theta = \lambda/d$ ; etc*

En una **rejilla de reflexión**, se utiliza una serie de crestas o surcos igualmente espaciados en una pantalla reflectora.

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

# 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  $\approx 1 \mu\text{m}$ ): 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.

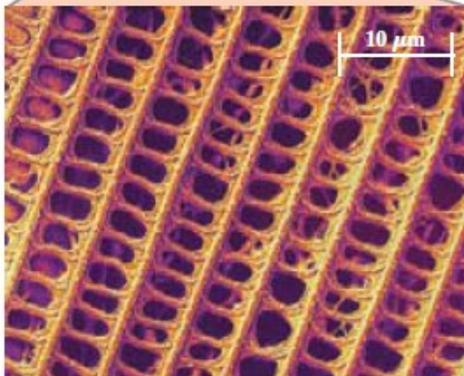


Los colores iridiscentes de ciertas mariposas tienen su origen en crestas microscópicas de las alas de la mariposa que forman una rejilla de reflexión.

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.

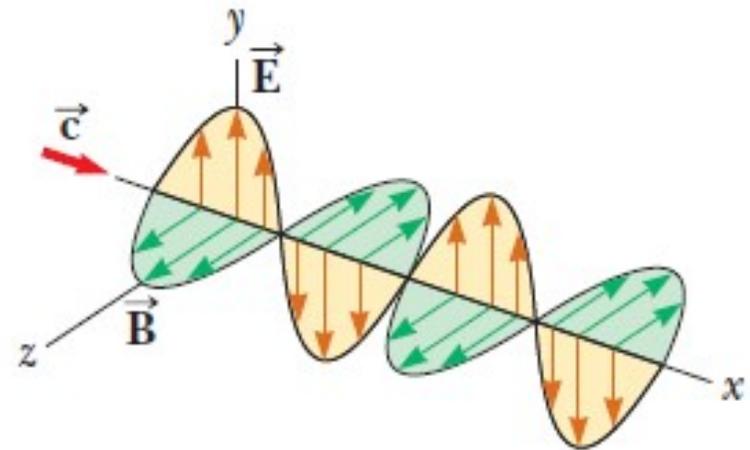
Los destellos de luz que emiten las alas en movimiento de una *Morpho* pueden deslumbrar y aturdir momentáneamente a depredadores como lagartos y aves.



# POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

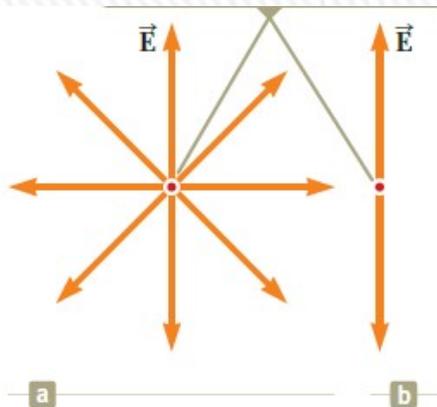
La luz es una onda electromagnética, y por tanto transversal, con los vectores de campo eléctrico  $\vec{E}$  y magnético  $\vec{B}$  asociados con la onda perpendiculares entre sí y también con la dirección de propagación de la onda.

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



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



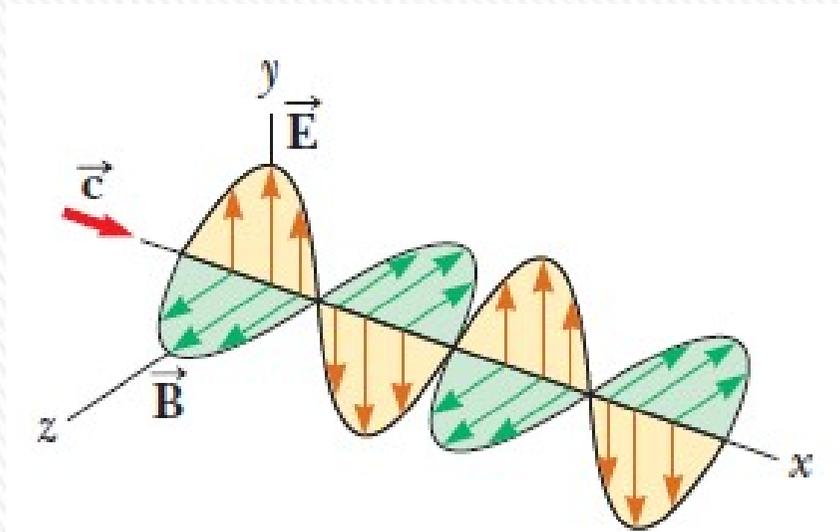
El resultado es una onda de luz **no polarizada**, figura a. *Todas las direcciones de  $\vec{E}$  son de igual forma probables y están en un plano (el plano de la página) perpendicular a la dirección de propagación.*

Una onda está **linealmente polarizada** si el campo eléctrico  $\vec{E}$  vibra en la misma dirección *en todo momento en un punto particular, figura b*. A veces se describe como *polarizada plana o sólo polarizada*.

# POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

Esta onda está linealmente polarizada en la dirección  $y$ . Conforme la onda se propaga en la dirección  $x$ ,  $\vec{E}$  siempre está en la dirección  $y$ . El plano que forma  $\vec{E}$  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.



Existen cuatro formas de para realizar una polarización, por:

- 1) absorción selectiva,
- 2) reflexión,
- 3) doble refracción y
- 4) dispersión (o scattering).



# Polarización por absorción selectiva

Técnica más común para polarizar luz.

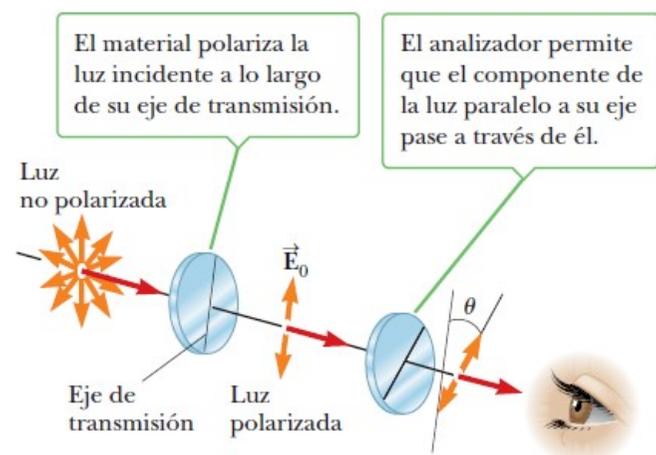
Se usa un material que transmite ondas que tengan vectores de  $\mathbf{E}$  que vibren en un plano paralelo a cierta dirección y absorban las ondas con vectores de  $\mathbf{E}$  que vibren en direcciones perpendiculares a dicha dirección (1932 – **Polaroid**).

La conducción tiene lugar 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. Así, las moléculas *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**.

Idealmente 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.



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.

Se cumple la **Ley de Malus**  $I = I_0 \cos^2 \theta$

$I_0$  intensidad incidente sobre el analizador.

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  $I_0/2$ .

## Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada se puede polarizar total o parcialmente o no polarizar, según el ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia vale  $0^\circ$  o  $90^\circ$  el haz reflejado no se polariza.

Para ángulos de incidencia entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , hay una polarización parcial, pero **para un ángulo de incidencia particular, el haz reflejado se polariza totalmente.**

Resulta que la componente paralela a la interfase se refleja con más intensidad que las otras componentes y el resultado es un haz parcialmente polarizado.

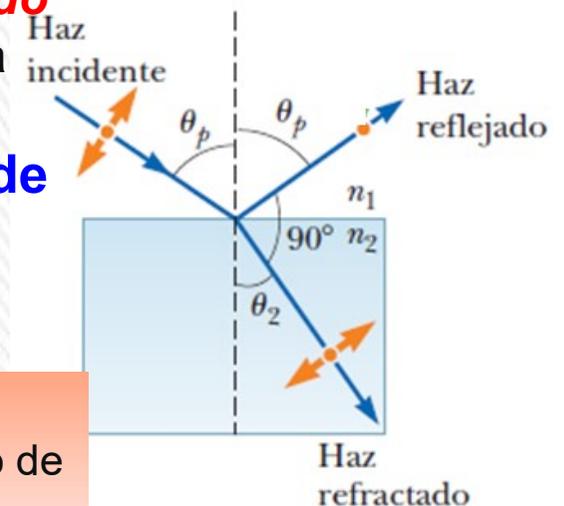
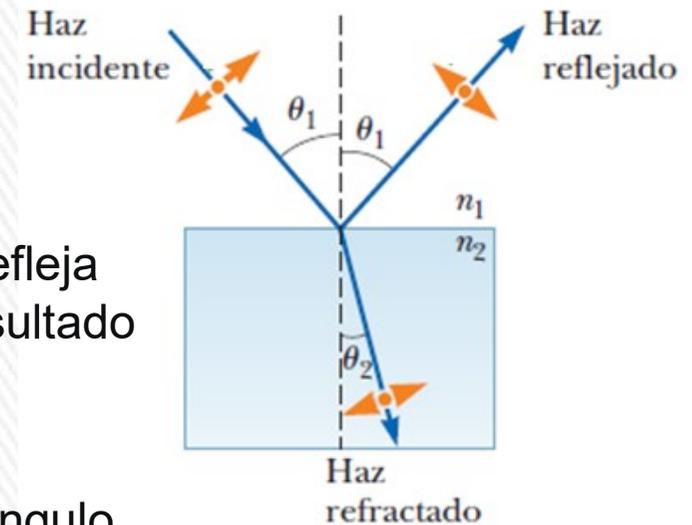
El haz refractado también se polariza parcialmente.

Si variamos el ángulo de incidencia,  $\theta_1$ , hasta que el ángulo entre los haces reflejado y refractado vale  $90^\circ$ , **el haz reflejado está completamente polarizado**, con su vector  $\mathbf{E}$  paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado es parcialmente polarizado. A este ángulo de incidencia se le llama **ángulo de polarización  $\theta_p$  o ángulo de Brewster**

Se cumple la **ley de Brewster**:

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

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.



## 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:  $\tan \theta_P = \frac{n_2}{n_1}$

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

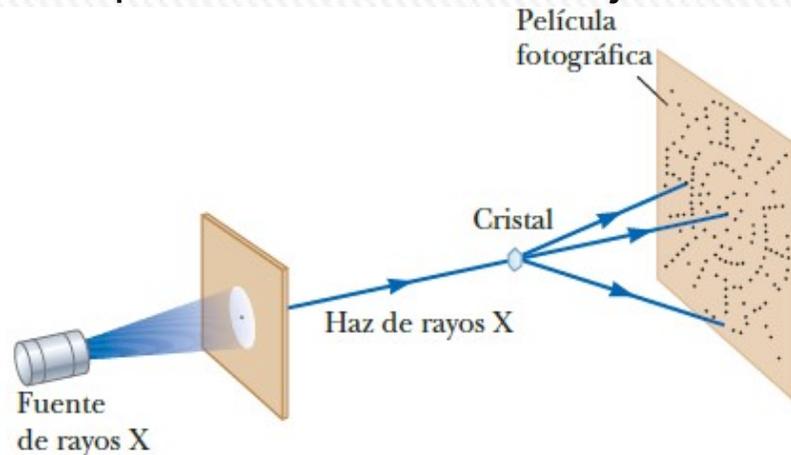
**Ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire:  $60,5^\circ$ .**



# DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES

En principio, es posible determinar la  $\lambda$  de cualquier onda electromagnética si se dispone de una rejilla con un espaciado adecuado (del orden de  $\lambda$ ).

Los rayos X (1895- Wilhelm Roentgen) son ondas electromagnéticas con  $\lambda \approx 0,1 \text{ nm}$ . Es imposible construir una rejilla con un espaciado tan pequeño.



En 1913 Max von Laue sugirió que la organización normal de átomos en un cristal puede funcionar como una rejilla de difracción tridimensional, ya que el espaciado atómico es de aproximadamente  $0,1 \text{ nm}$ . La figura muestra un arreglo experimental para la observación de la difracción de los rayos X mediante un cristal.

Sobre el cristal incide un haz colimado de rayos X monocromáticos.

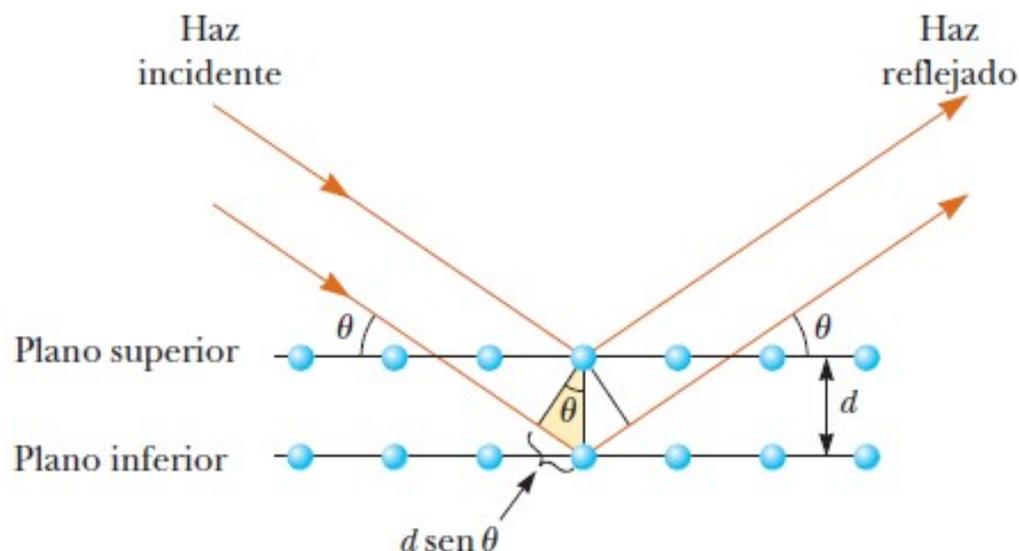
Los rayos difractados son muy intensos en ciertas direcciones debido a la interferencia constructiva de ondas reflejadas de las capas de átomos del cristal.

Los rayos difractados, que pueden ser detectados sobre una película fotográfica, forman un arreglo de puntos conocido como **patrón de Laue**.

Es posible deducir la estructura cristalina al analizar las posiciones relativas y las intensidades de los diversos puntos en dicho patrón.



# DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



Supongamos que un rayo X incidente forma un ángulo  $\theta$  con uno de los planos.

El rayo puede reflejarse tanto del plano superior como del inferior. El rayo reflejado del plano inferior se desplaza más que el rayo reflejado proveniente del plano superior.

La diferencia en la trayectoria efectiva es igual a  $2d \sin \theta$ .

Los dos haces se refuerzan (*interferencia constructiva*) cuando esta diferencia de trayectoria es igual a algún múltiplo entero de  $\lambda$ .

Esto también ocurre para la reflexión de toda la familia de planos paralelos.

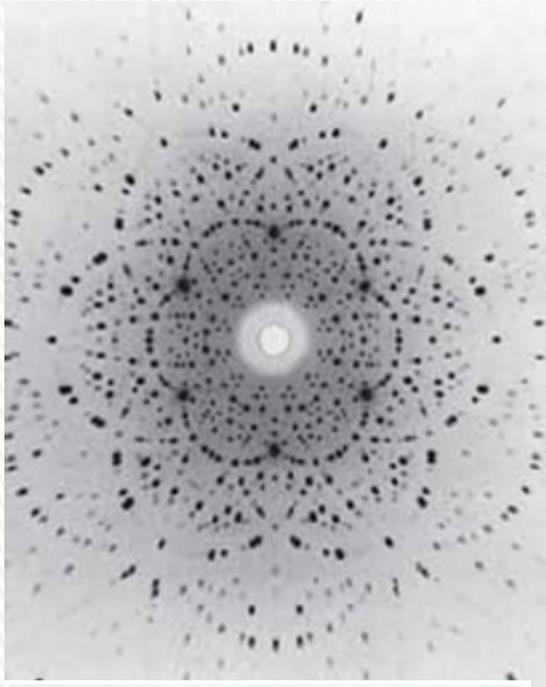
La condición para una *interferencia constructiva* (*máximos en el rayo reflejado*) es igual a:

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{condición de Bragg}$$

Esta condición se conoce como **Ley de Bragg**, en honor a W. L. Bragg (1890-1971), quien fue el primero en deducir la relación.

Si se mide la longitud de onda y el ángulo de difracción, es posible calcular el espaciamiento entre los planos atómicos.

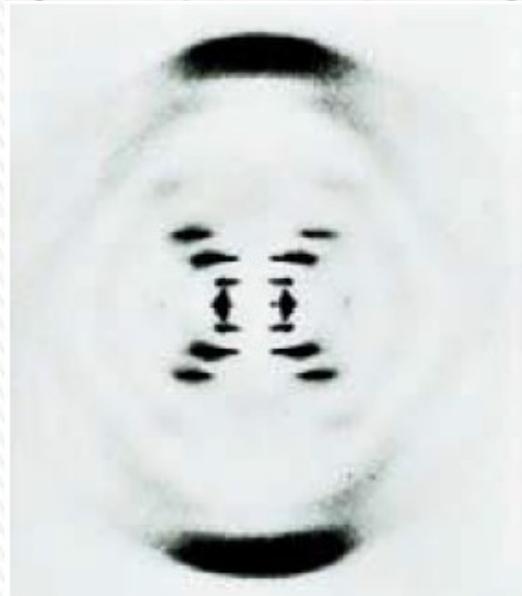
# DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



Un patrón Laue de un cristal simple del mineral berilio (alumino-silicato de berilio)

La difracción de rayos X se usó inicialmente con cristales inorgánicos relativamente simples, pero luego se aplicó exitosamente a moléculas orgánicas y líquidos (proteínas y ácidos nucleicos).

Ha sido una de las principales técnicas experimentales para establecer la estructura de doble hélice del DNA y lograr avances posteriores en genética molecular.



La científica británica Rosalind Franklin obtuvo esta revolucionaria imagen de difracción de rayos X del DNA en 1953.

Las bandas oscuras dispuestas en cruz de la figura de la derecha suministraron la primera prueba de la estructura helicoidal de la molécula de DNA.