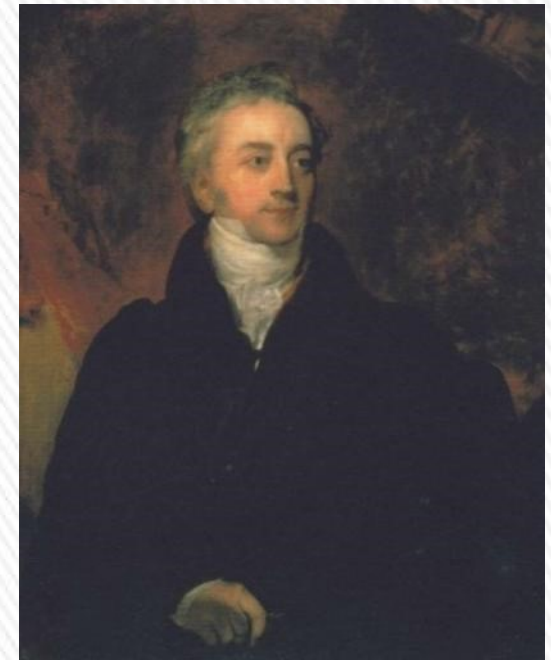


# PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ



**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

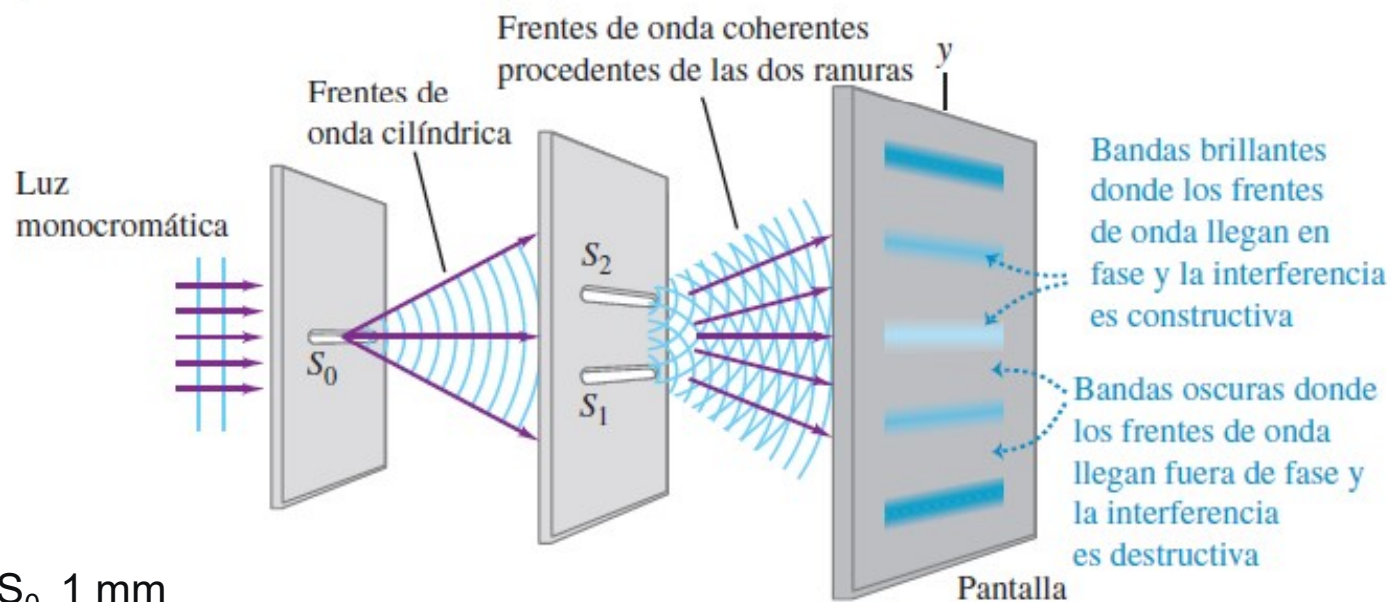
## CONDICIONES P/ OBSERVACIÓN INTERFERENCIA LUMINOSA

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

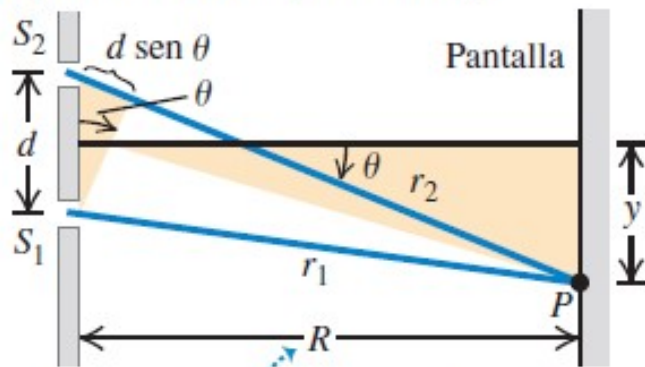
Ancho  $S_1$  y  $S_2$ :  $1\mu\text{m}$

Separación entre  $S_1$  y  $S_2$ : mm

Distancia placa  $S_1$  y  $S_2$  a pantalla: m

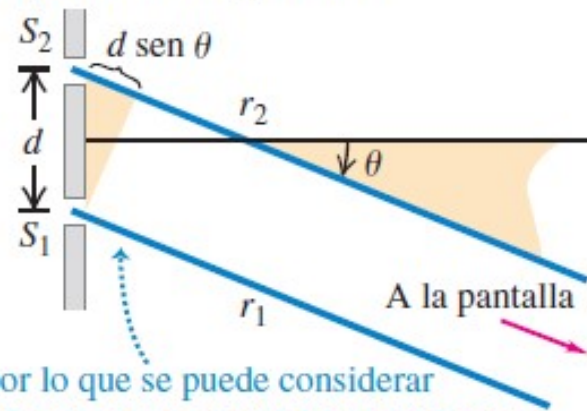
# Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

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 trayectorias 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.

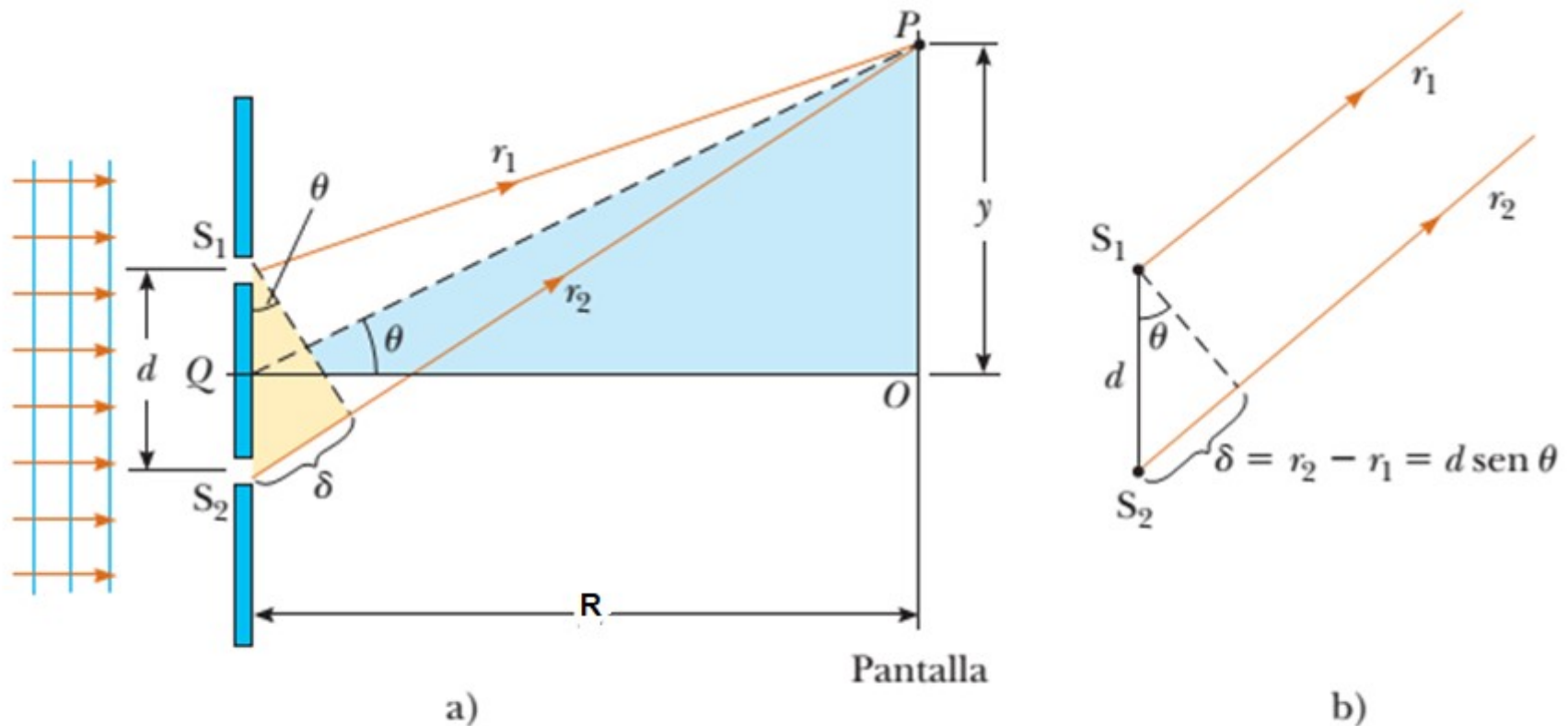
Suponemos que la distancia  $R$  (o  $L$ ) de las ranuras a la pantalla es tan grande en comparación con la distancia  $d$  entre las ranuras, que las líneas de  $S_1$  y  $S_2$  a  $P$  son casi paralelas.

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

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



# EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA DE YOUNG



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

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

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

# 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

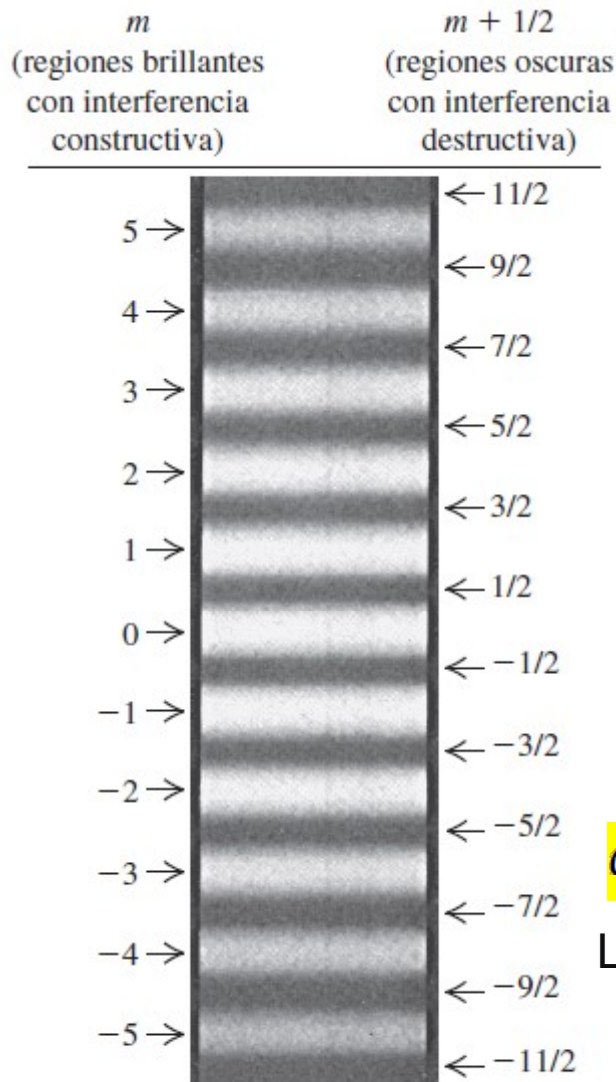
**Interferencia destructiva:** regiones oscuras en la pantalla en puntos para los que la diferencia de las trayectorias es un número semi-entero de longitudes de onda

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

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:

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

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

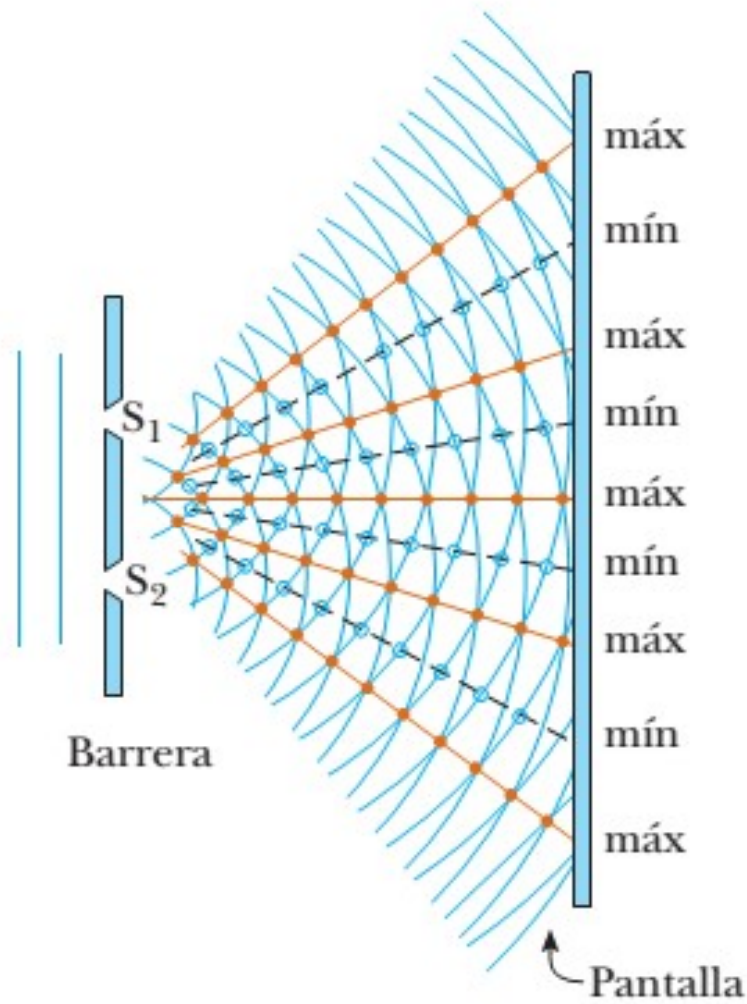
La separación entre franjas consecutivas:  $\Delta y = \frac{R}{d} \lambda$

es la misma para máximos y mínimos

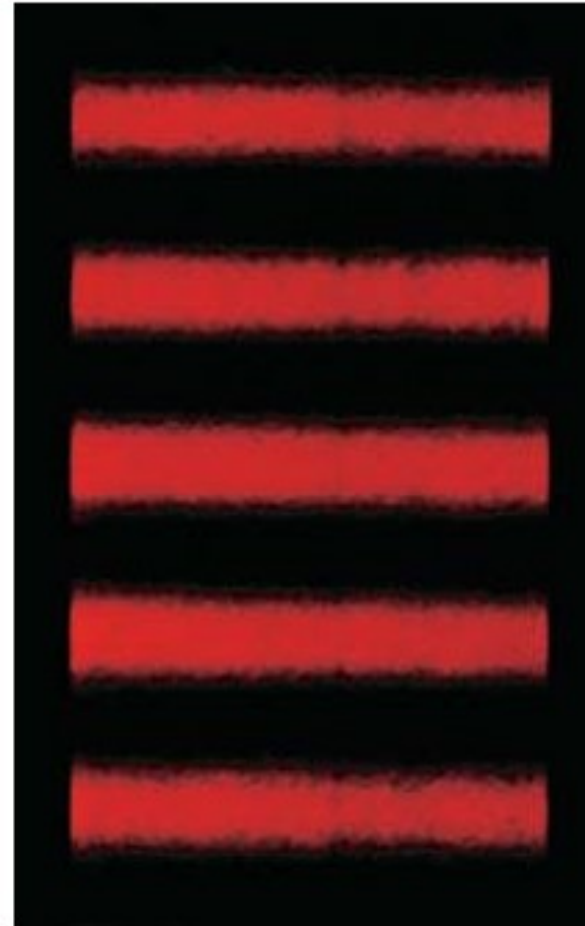
Es posible medir  $R$  y  $d$ , así como las posiciones  $y_m$  de las franjas brillantes, por lo que este experimento permite una medición directa de la longitud de onda  $\lambda$ .

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

# EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA DE YOUNG



a)



b)

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

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

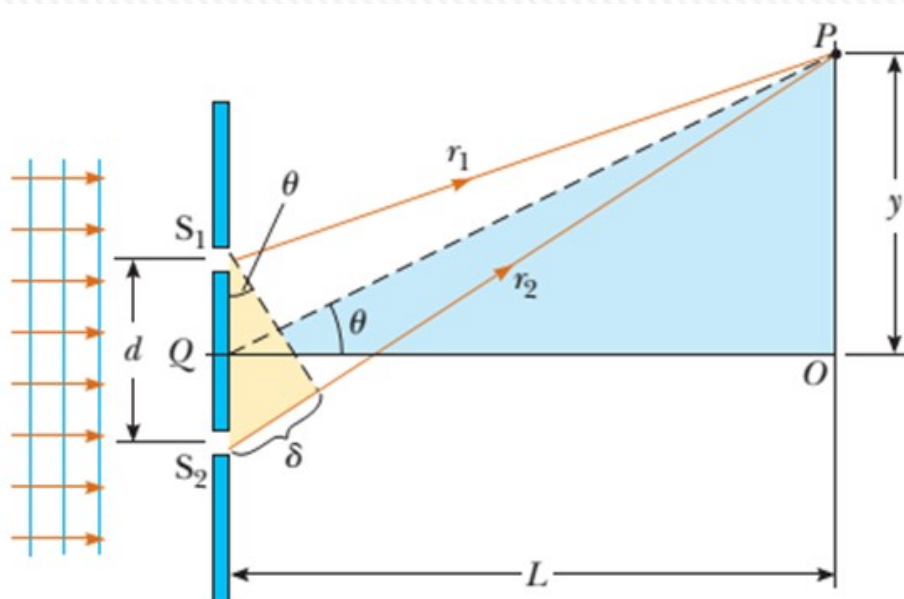
# EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA DE YOUNG

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

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

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

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



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



## 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.

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

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

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

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

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

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

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

# 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.



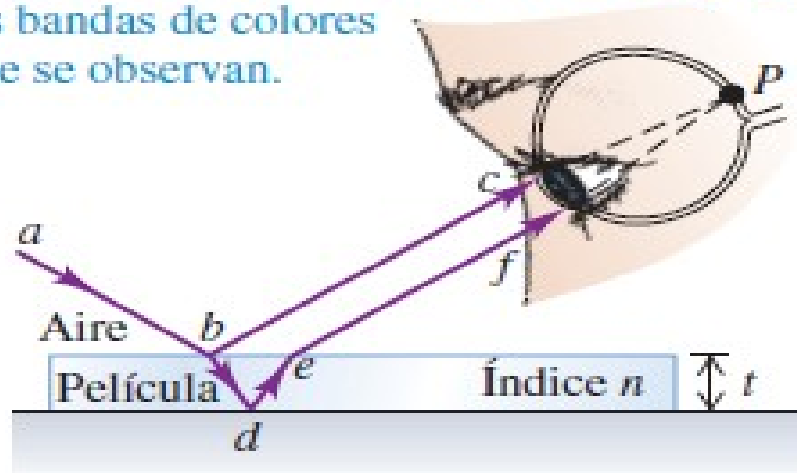
**a) Una película delgada de aceite (o algún hidrocarburo)** sobre agua muestra interferencia, como se observa en la configuración de colores cuando se hace incidir luz blanca sobre la película. Variaciones en el grosor de la película producen una interesante configuración de colores. La hoja de afeitar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

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

# Interferencia en películas delgadas

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

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



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

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

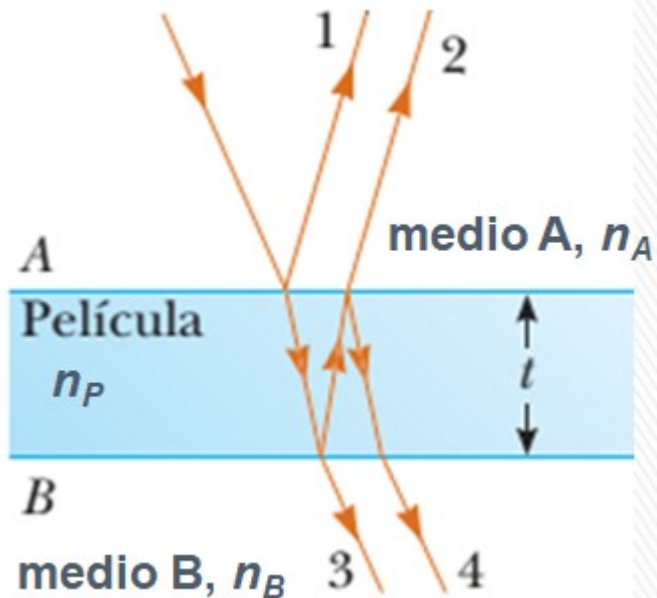
Las dos ondas reflejadas llegan juntas al punto  $P$  en la retina del ojo y dependiendo de la relación de fase, interferirán en forma constructiva o destructiva.

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

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

**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

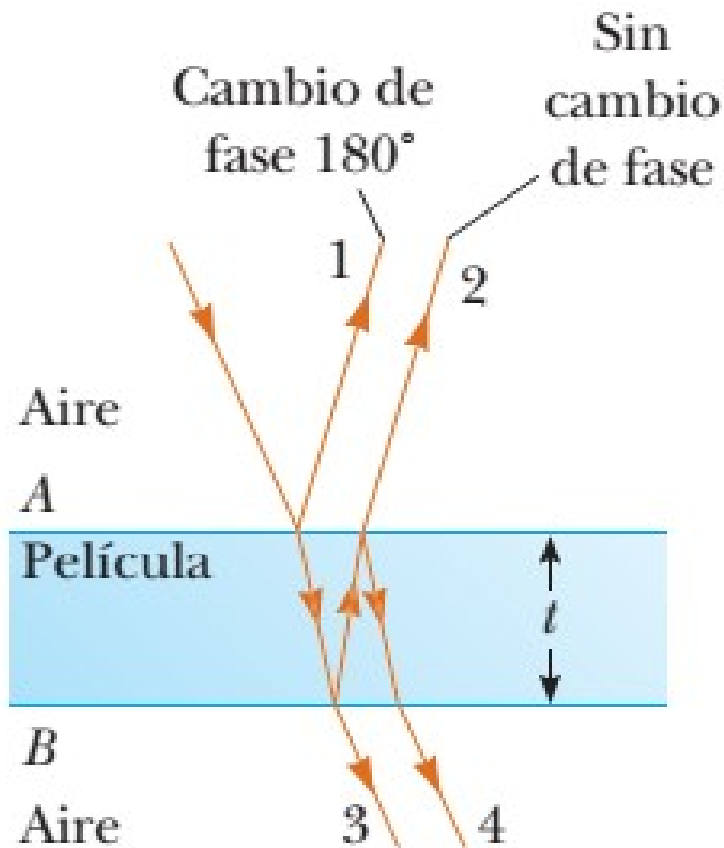
Si **una de las dos ondas tiene un desplazamiento de fase de medio ciclo por reflexión**, las condiciones para que haya interferencia constructiva y destructiva se invierten:

**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

# INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS



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

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

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

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

Cambio de fase en  $180^\circ$  en reflexión

interface aire-película

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

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

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

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

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

## 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  $180^\circ$

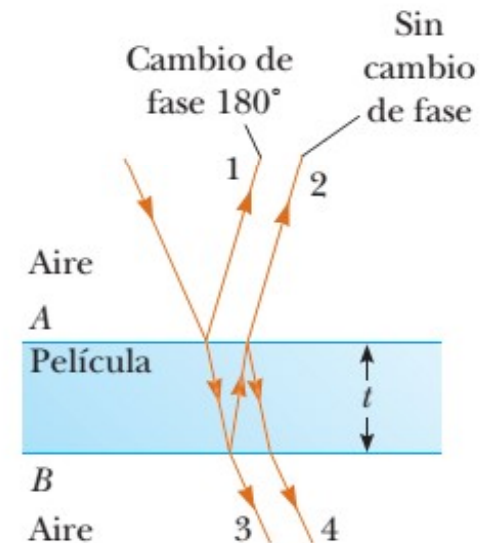
La condición de máximos es entonces:

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

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

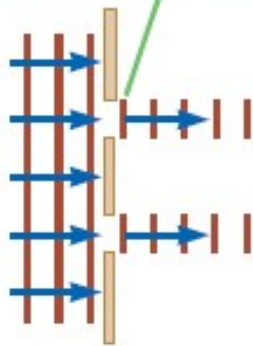
**$\lambda = 567 \text{ nm}$ : amarillo**

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



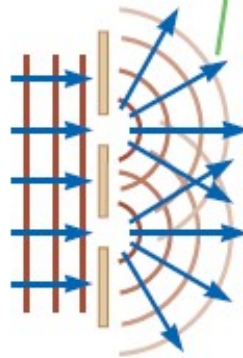
# DIFRACCIÓN

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*.

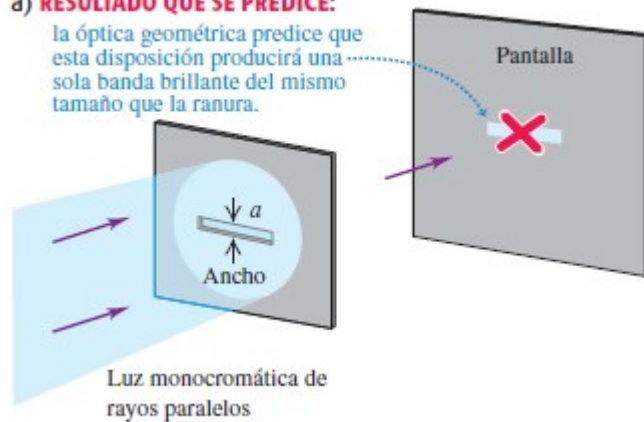


Haz de luz incide sobre dos rendijas o una...

**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.

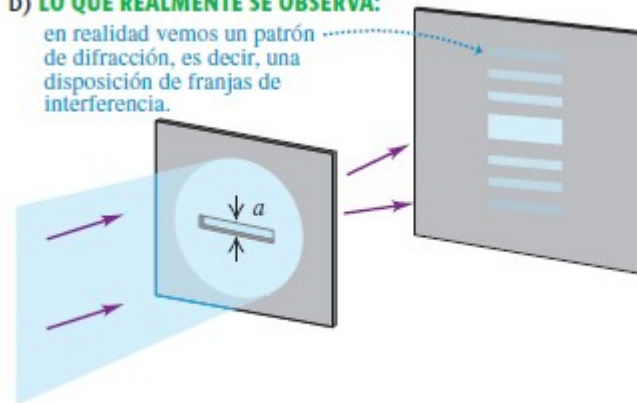
## a) RESULTADO QUE SE PREDICE:

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

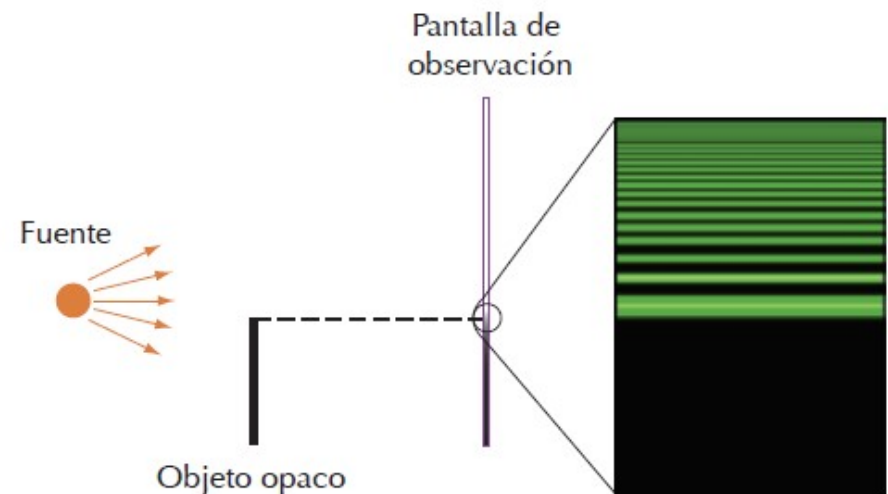
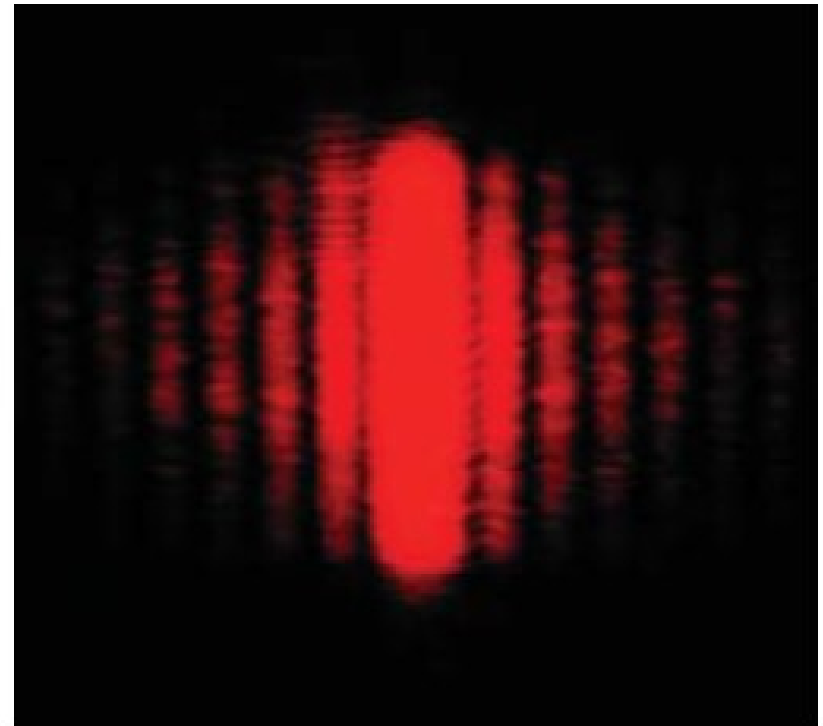
Por ejemplo, cuando una sola rendija estrecha se coloca entre una fuente de luz distante (o un haz láser) y una pantalla, la luz produce un **patrón de difracción** como el de la figura.

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.

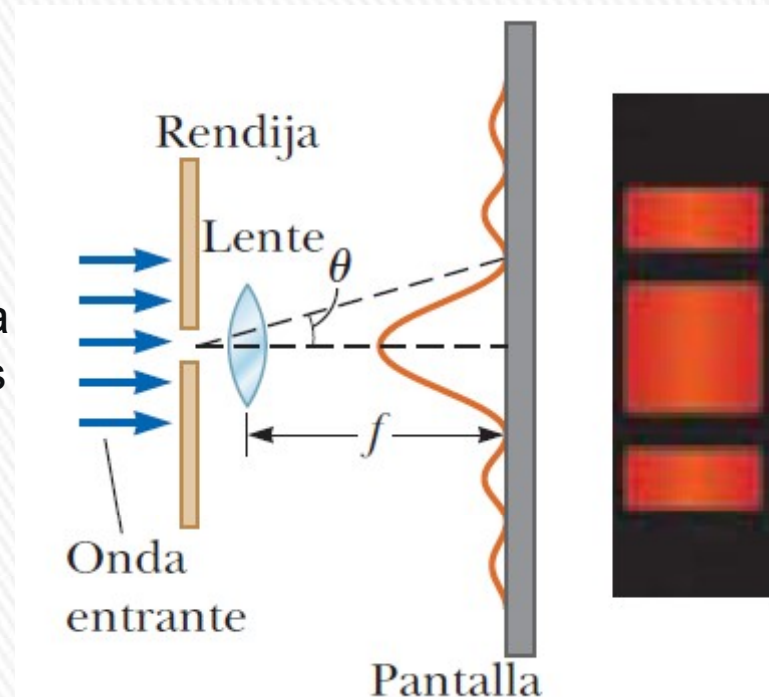




# DIFRACCIÓN

**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.



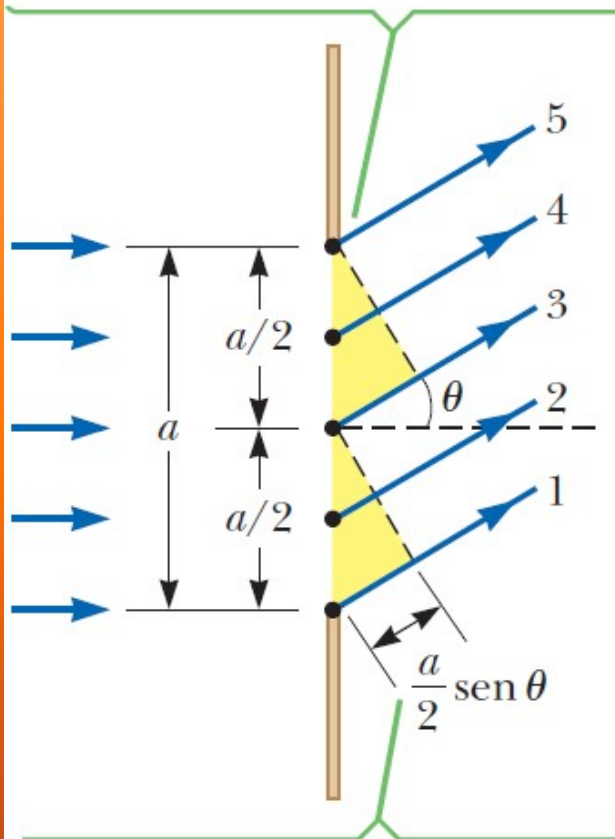
No existe una distinción fundamental entre *interferencia* y *difracción*.

*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.

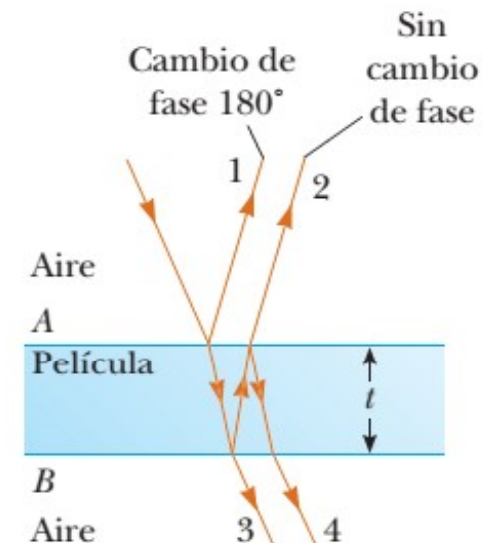
## EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.7

La luz blanca que incide en una pompa de jabón tiene en el espectro visible un solo máximo de interferencia para  $\lambda = 600\text{nm}$  y un solo mínimo en el extremo violeta del espectro. Si el índice de refracción de la pompa es 1,33, calcular su espesor.

$$n = 1,33 \quad \lambda_{\text{máximo}} = 600 \text{ nm} \quad \lambda_{\text{mínimo}} = 380 \text{ a } 430 \text{ nm}$$

$$\text{Condición de máximo: } 2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad t = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda}{2n}$$

$$\text{Condición de mínimo: } 2nt = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad t = \frac{m\lambda}{2n}$$



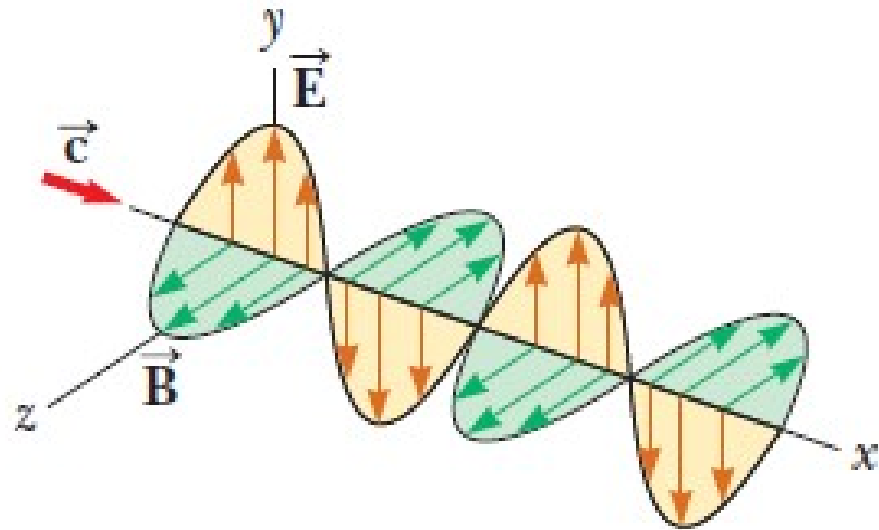
m	Máximo	Mínimo	
	$\lambda = 600 \text{ nm}$	$\lambda = 380 \text{ nm}$	$\lambda = 430 \text{ nm}$
0	113	0	0
1	338	143	162
2	564	286	323
3	789	429	485
4	1015	571	647
5	1241	714	808

$$t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2n} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{600}{2(1,33)} = 225,56 \left(m + \frac{1}{2}\right)$$

$$t = 789 \text{ nm} = 7,89 \times 10^{-7} \text{ m} = 0,789 \text{ nm}$$

# 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.

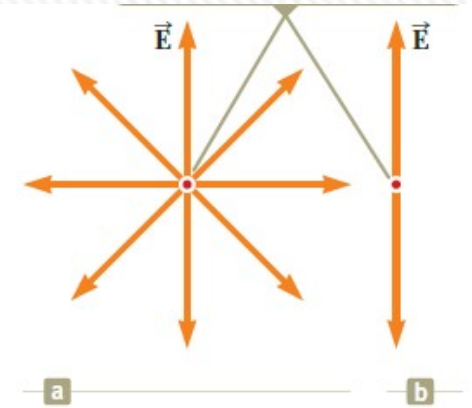
Cada átomo produce una onda con su propia orientación de  $\vec{E}$ , que corresponde a la dirección de vibración atómica.

**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.*

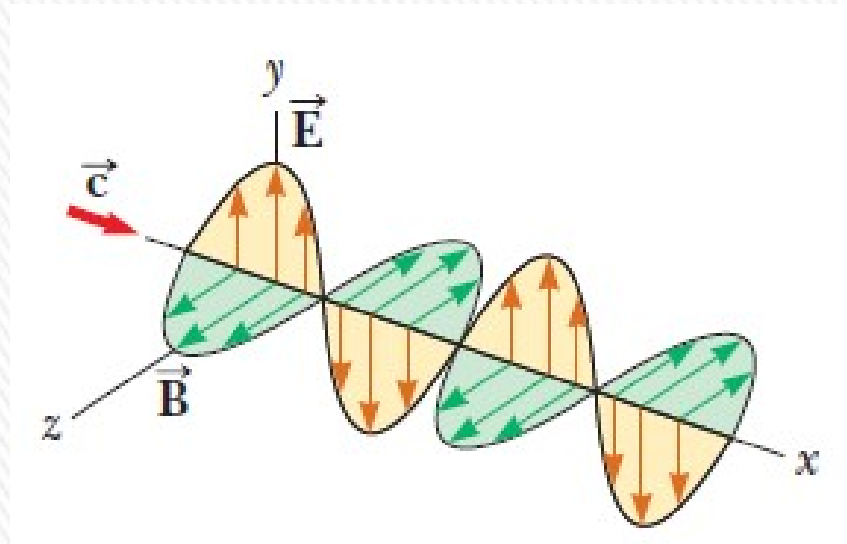


Una onda está **linealmente polarizada** si el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  vibra en la misma dirección *en todo momento en un punto particular*, figura b.

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 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*.

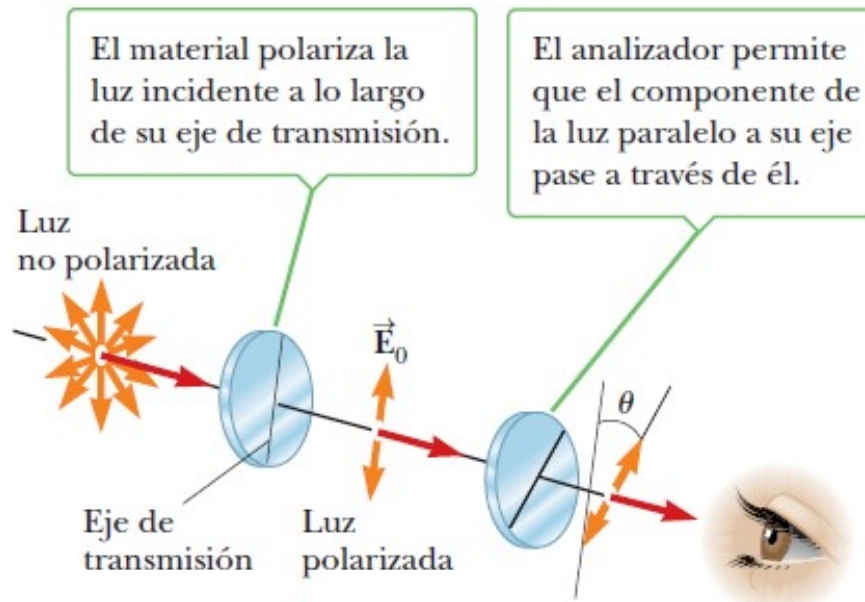
La dirección perpendicular a las cadenas moleculares es el **eje de transmisión**.

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  $\theta$  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  $\theta$  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 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.

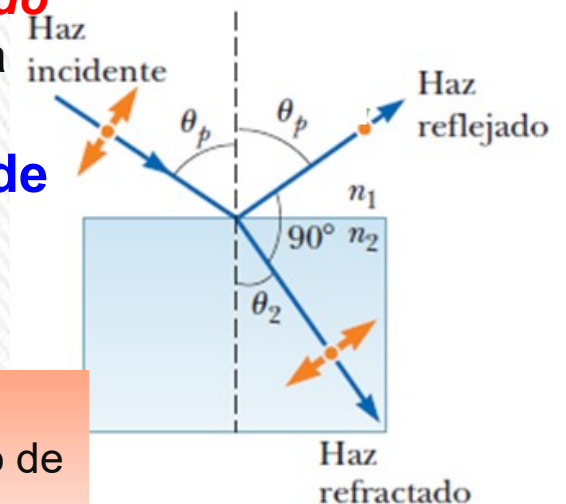
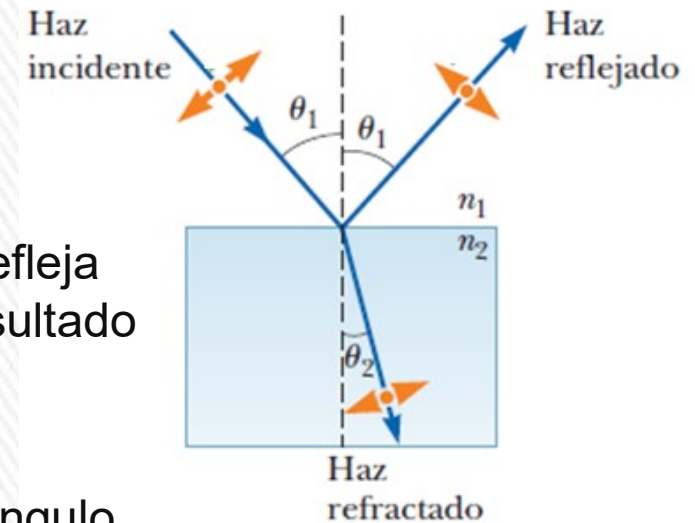
El haz refractado también se polariza parcialmente.

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  $n_2 = n_{\text{zafiro}}$ :

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

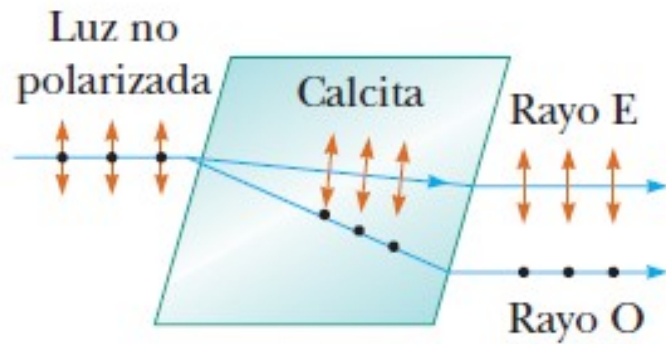
Ley de Brewster:  $\tan \theta_P = \frac{n_2}{n_1}$

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

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



## 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 que tienen la misma rapidez.

Si la luz entra a un material birrefringente en un ángulo 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 ( $\text{CaCO}_3$ )	1.658	1.486	1.116
Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ )	1.544	1.553	0.994
Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ )	1.587	1.336	1.188
Sulfito de sodio ( $\text{NaSO}_3$ )	1.565	1.515	1.033
Cloruro de zinc ( $\text{ZnCl}_2$ )	1.687	1.713	0.985
Sulfuro de zinc ( $\text{ZnS}$ )	2.356	2.378	0.991



# Polarización por dispersión (esparcimiento)

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

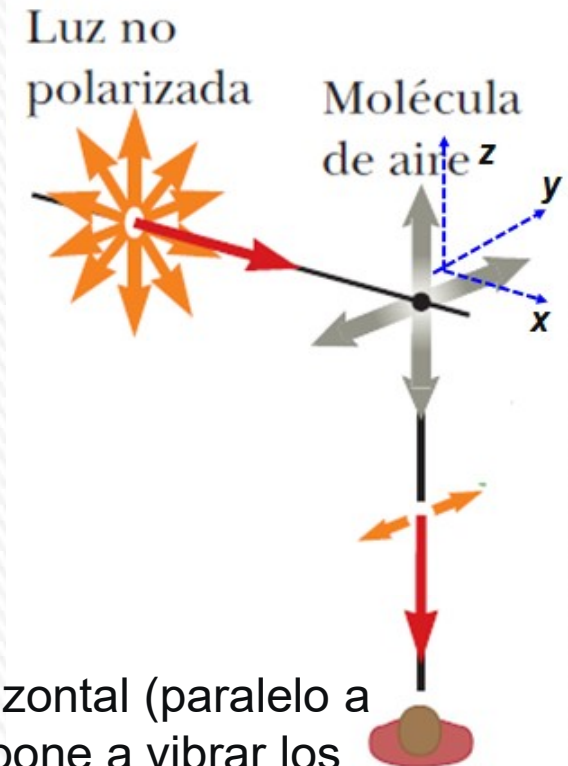
La absorción y re-radiación de la luz por el medio, llamada **dispersión** (más exactamente se debería hablar esparcimiento o **scattering**), es lo que hace que se polarice la luz solar.

Esto se puede ver al mirar directamente hacia arriba a través de un par de lentes polarizado.

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

Un haz de luz solar no polarizado que viaja en dirección horizontal (paralelo a la tierra) incide sobre una molécula del aire. Cuando el haz pone a vibrar los electrones de las moléculas, estas cargas actúan como las de una antena que vibran en un patrón complicado.

La parte horizontal del vector de campo eléctrico en la onda incidente hace que las cargas vibren en forma horizontal y la parte vertical del vector simultáneamente las hace vibrar verticalmente. Como resultado de su movimiento horizontal, los electrones emiten una onda horizontalmente polarizada y, como resultado de su movimiento vertical, se emite una onda verticalmente polarizada paralela a la Tierra.



# Polarización por dispersión (esparcimiento)

Si el observador de la figura mira directo hacia arriba (perpendicularmente a la dirección original de propagación de la luz), verá una luz totalmente polarizada en la dirección horizontal (según  $y$ ), como lo indican las flechas cafés.

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

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 y algunas tarántulas.

La sensibilidad a la polarización también ha sido observada en especies de pulpo, calamar, sepia y mantis.

La mantis religiosa y algunos escarabajos tienen 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.

