

## 24- 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 prodigo!!!

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

# Interferencia y fuentes coherentes

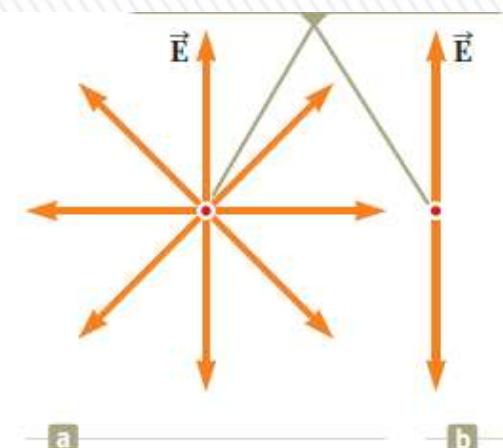
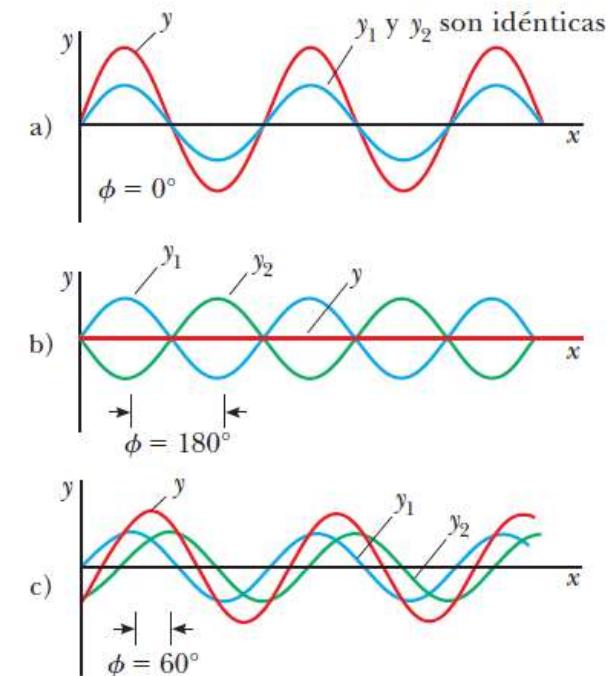
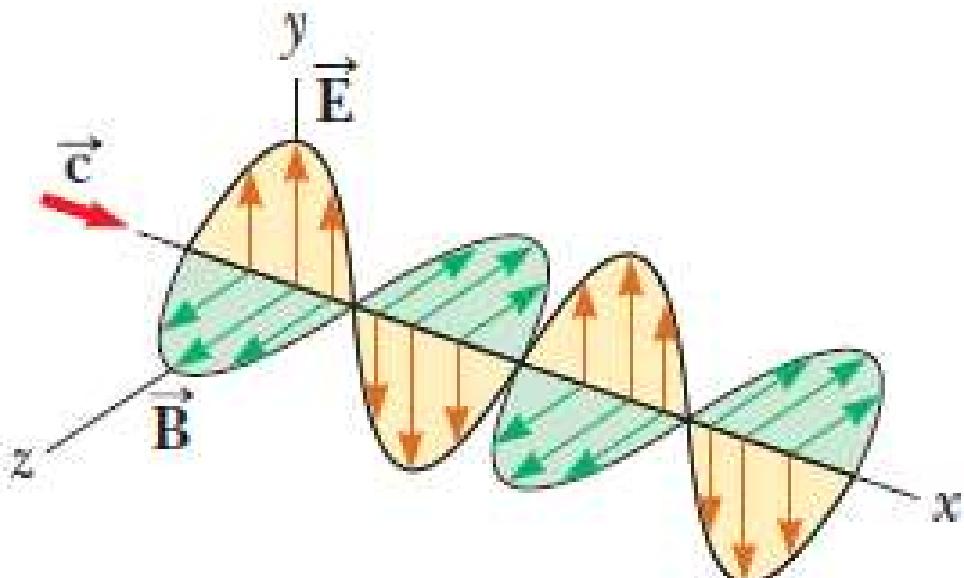
$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \quad y_2 = A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

$$y = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

## Onda electromagnética sinusoidal

$$\vec{E}(x, t) = E_{\max} \cos(kx - \omega t) \hat{j}$$

$$\vec{B}(x, t) = B_{\max} \cos(kx - \omega t) \hat{k}$$



# Interferencia y fuentes coherentes

Supondremos dos fuentes que producen ondas de la misma amplitud y la misma longitud de onda  $\lambda$  (**monocromáticas**), y que además tienen **una relación de fase constante**, es decir son **coherentes**.

Los átomos en una fuente rodian con una relación de fase no sincronizada y aleatoria, por tanto no son coherentes, sin embargo, la luz procedente de una sola fuente se puede dividir de manera que formen dos o más fuentes secundarias, de modo que no haya cambio en sus fases relativas.

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

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

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

Habrá casos en que la diferencia de recorridos  $\Delta r$  sea tal que las ondas lleguen en fase (porque recorren la misma distancia o que  $\Delta r$  es igual a un número entero de longitudes de onda) por lo que llegan los máximos juntos (**interferencia constructiva**), o también en puntos en los que puedan llegar con una **diferencia de fase de medio ciclo**, por lo que cuando llega un máximo de una onda, llega un mínimo de la otra (**interferencia destructiva**).

# Interferencia y fuentes coherentes

## CONDICIONES PARA OBSERVACIÓN DE LA INTERFERENCIA:

Las fuentes deben ser:

**Coherentes**- deben mantener la fase constante respecto de otra.

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

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

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

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

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

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

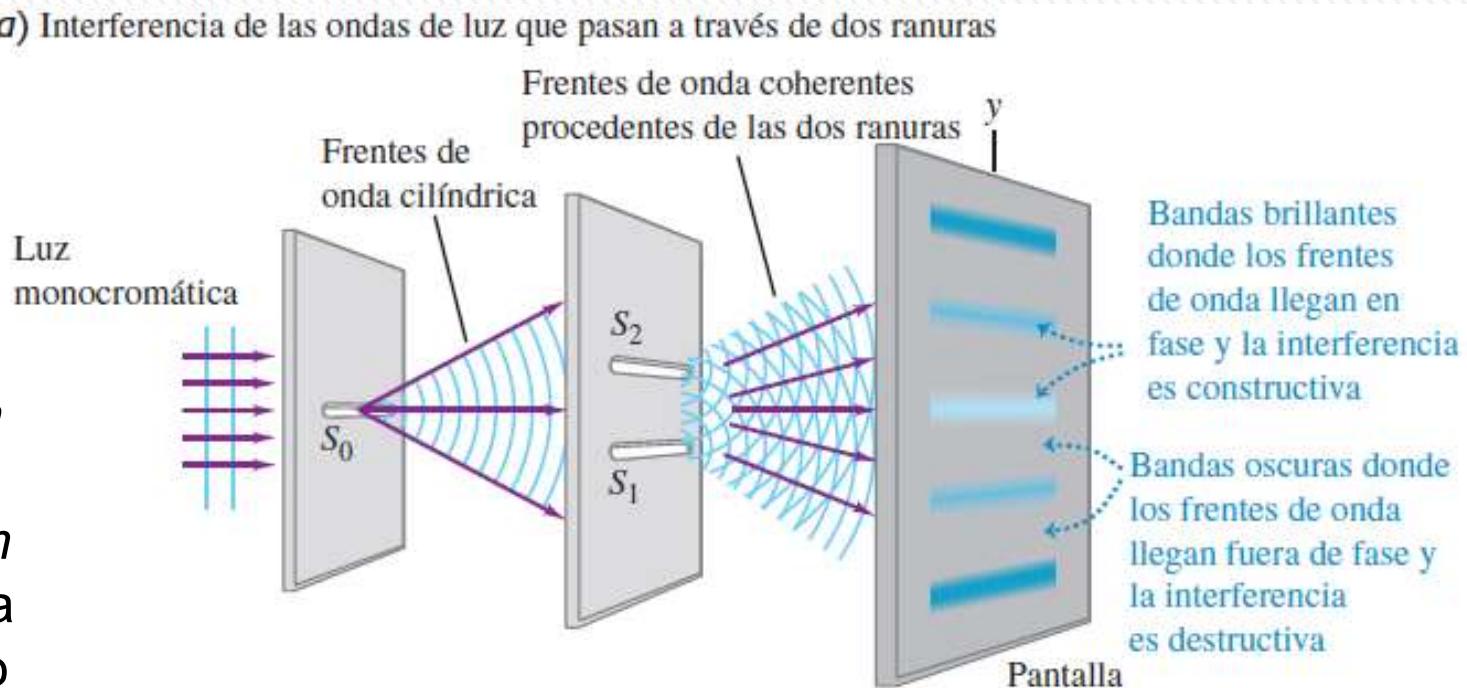
# Interferencia de luz procedente de dos fuentes

Uno de los primeros experimentos para poner de manifiesto la interferencia de la luz de dos fuentes fue realizado por Thomas Young en 1801.

Montaje de Young:

fuente emite luz

monocromática; que se dirige a pantalla que tiene ranura angosta  $S_0$ , de 1 mm aprox. ancho que ilumina otra pantalla con dos ranuras  $S_1$  y  $S_2$ , de ancho aprox. de 1  $\mu\text{m}$  separadas una distancia del orden del milímetro o menos.



A partir de  $S_0$  se propagan ondas que llegan a  $S_1$  y  $S_2$  en fase porque recorren distancias iguales desde  $S_0$ .

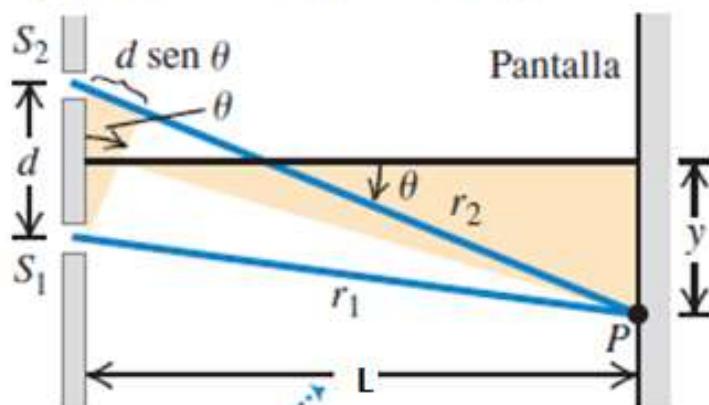
Por lo tanto, las ondas que emergen de las ranuras  $S_1$  y  $S_2$  también están en fase siempre, por lo que  $S_1$  y  $S_2$  son fuentes coherentes.

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 figuras.

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.

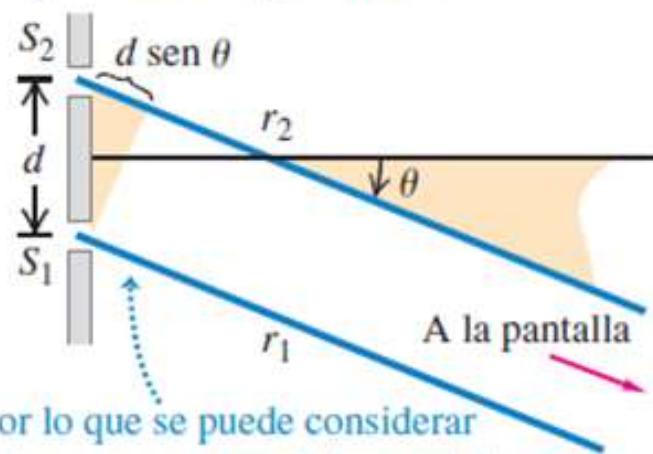
# Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

b) Geometría real (vista lateral)



En situaciones reales, la distancia 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  $r_2 - r_1 = d \sin \theta$ .

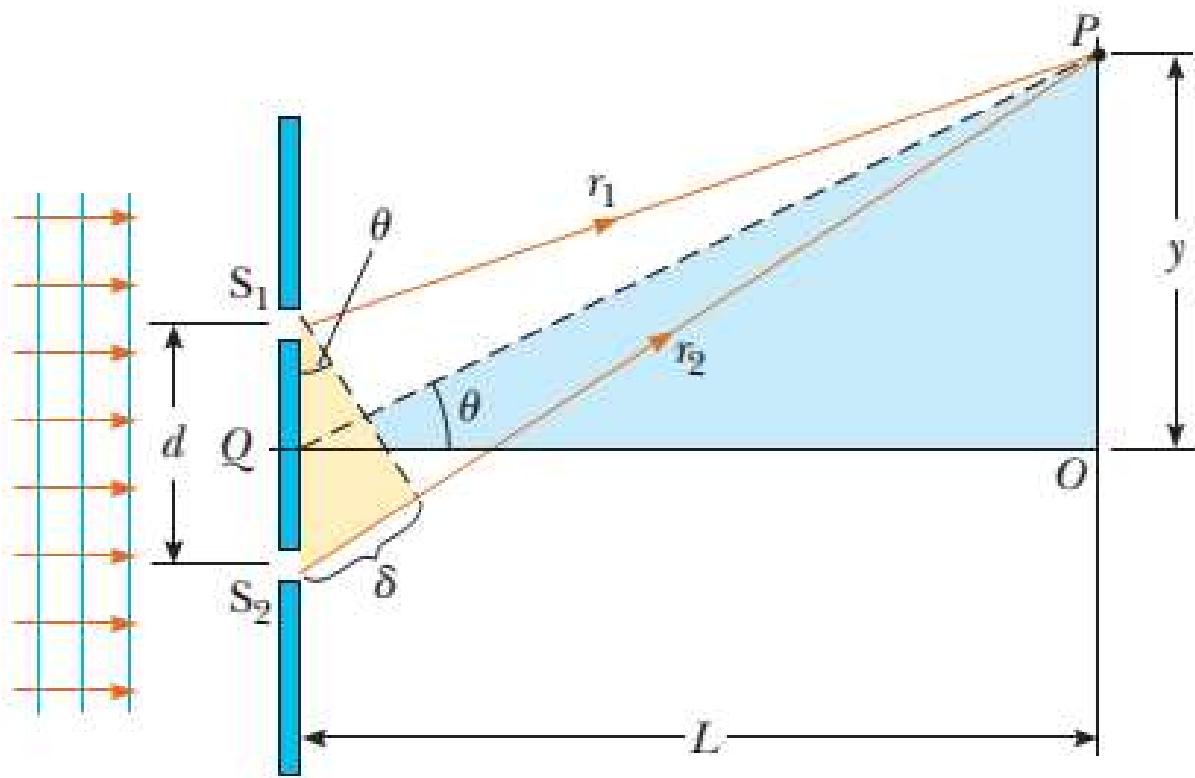
*La pantalla se ilumina con intensidad máxima en los puntos  $P$  en los que las ondas luminosas procedentes de las ranuras interfieren constructivamente, y será más oscura en los puntos donde la interferencia es destructiva.*

Suponemos que la distancia  $L$  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.

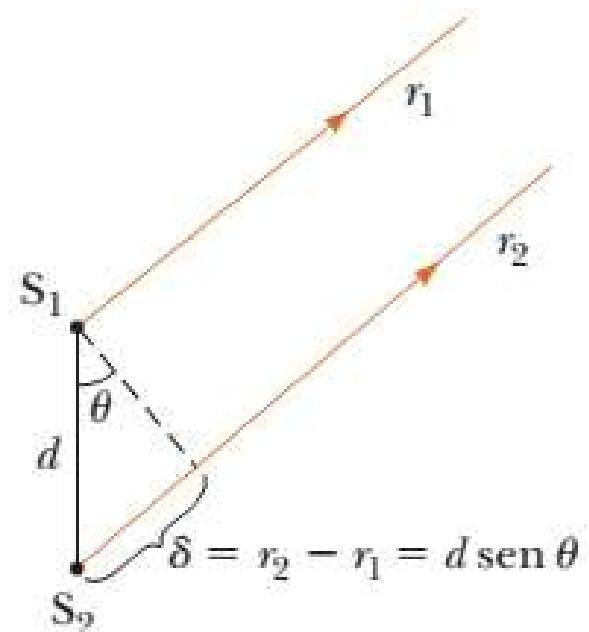
La diferencia de la longitud de las trayectorias está dada por:

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

# EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA DE YOUNG



a)



b)

- a) Construcción geométrica del experimento de doble ranura de Young (que no está a escala).
- b) Cuando supone que  $r_1$  es paralelo a  $r_2$ , la diferencia de trayectoria entre los dos rayos es  $r_2 - r_1 = d \cdot \text{sen}(\theta)$   
Para que esta aproximación sea válida, es esencial que  $L \gg d$ .

# Interferencia de la luz procedente de dos fuentes

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

θ ángulo entre una línea desde el 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

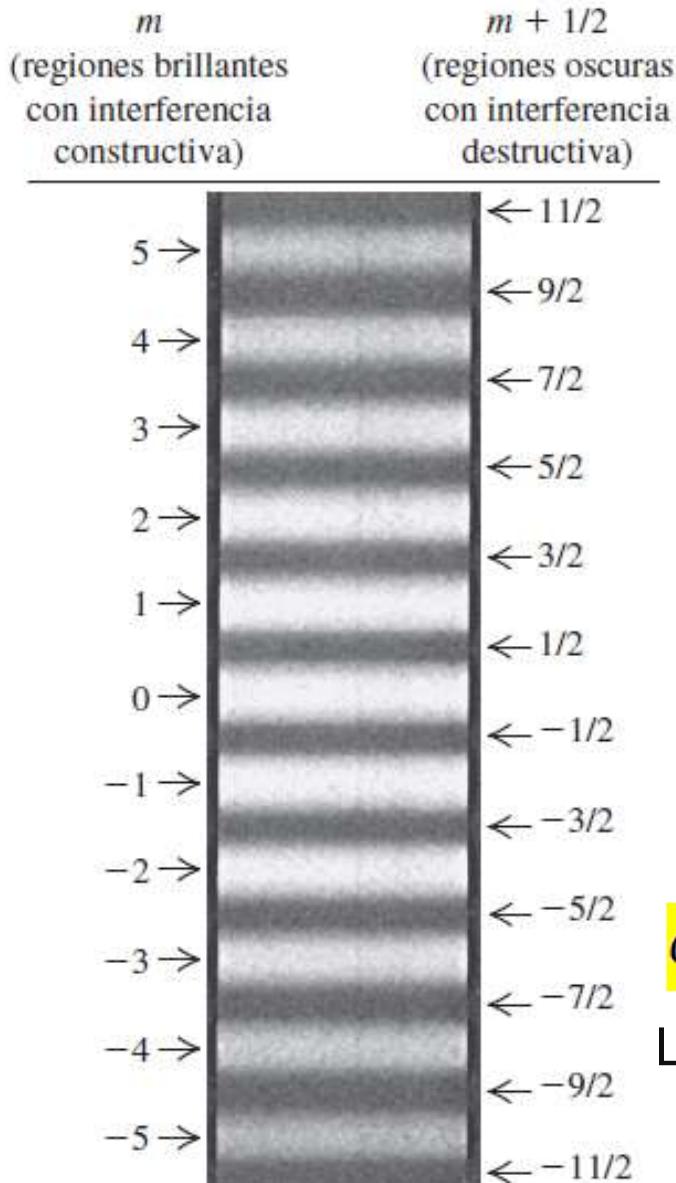
**Interferencia destructiva:** regiones oscuras en la pantalla en puntos para los que la diferencia de las trayectorias es un número semi-entero de longitudes de onda

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

interferencia destructiva,  
dos ranuras

Los resultados del experimento 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:*

$$y_m = L \tan \theta_m$$

Como  $y_m \ll L$ , y  $\theta_m$  es muy pequeño,

$$\tan \theta_m \approx \sin \theta_m,$$

Entonces para ángulos pequeños:

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

$$\frac{dy_m}{L} = m\lambda$$

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

La separación entre franjas consecutivas:

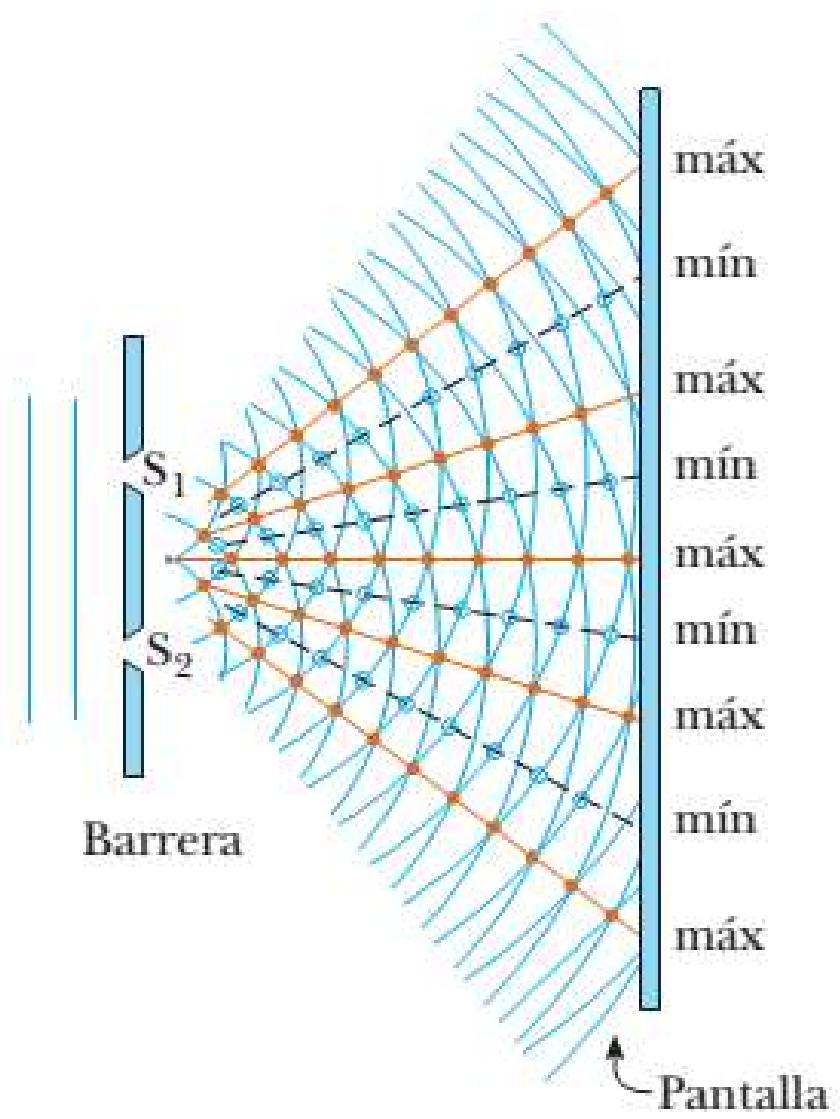
$$\Delta y = \frac{L}{d} \lambda$$

es la misma para máximos y mínimos

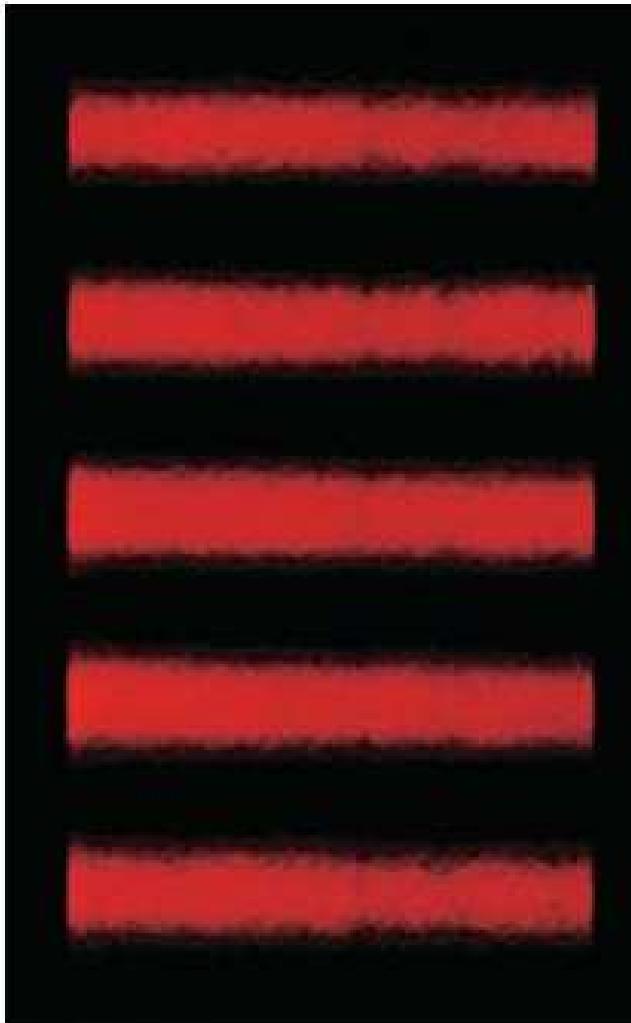
Es posible medir  $L$  y  $d$ , así como las posiciones  $y_m$  de las franjas brillantes, por lo que este experimento permite una medición directa de la longitud de onda  $\lambda$ .

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 rendija de Young. Las rendijas  $S_1$  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

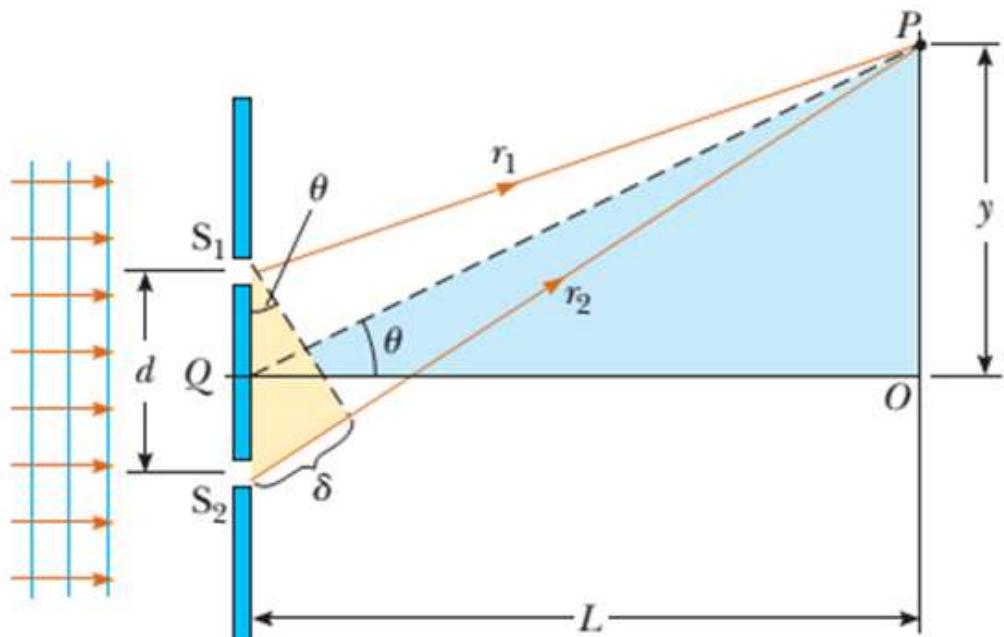
Diferencia de recorrido:  $\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$

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

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

Condición de mínimos:  $d \sin \theta_{oscuro} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$

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



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



## 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,

- a) determinar la longitud de onda de la luz
- b) 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

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

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

## EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.4

Un par de rendijas, separadas 0,150 mm, se ilumina con luz que tiene una longitud de onda  $\lambda = 643$  nm. Sobre una pantalla a 140 cm de las rendijas se observa un patrón de interferencia. Considere un punto sobre la pantalla ubicado en  $y = 1,80$  cm del máximo central de este patrón.

- ¿Cuál es la diferencia de trayectoria  $\delta$  para las dos rendijas en la posición  $y$ ?
- Exprese esta diferencia de trayectoria en términos de la longitud de onda.
- ¿La interferencia corresponderá a un máximo, un mínimo o una condición intermedia?

$$d = 0,150 \text{ mm} = 1,50 \times 10^{-4} \text{ m} \quad \lambda = 643 \text{ nm} = 6,43 \times 10^{-7} \text{ m} \quad L = 1,40 \text{ m}$$

$$y = 1,80 \text{ cm} = 1,80 \times 10^{-2} \text{ m}$$

La desviación angular de una línea ubicada en la posición  $y$  del máximo central está dado por:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y}{L} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{1,80}{140} \right) = 0,736619^\circ$$

- diferencia de trayectoria  $\delta$  para las dos rendijas en la posición  $y$ :

$$\delta = d \sin \theta = 0,150 \sin(0,736619^\circ) = 1,928 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad \delta = 1,93 \text{ } \mu\text{m} = 1,93 \times 10^{-6} \text{ m}$$

- Diferencia de trayectoria  $\delta$  en términos de  $\lambda$

$$\delta = (1,93 \times 10^{-6} \text{ m}) \times \frac{\lambda}{643 \times 10^{-9} \text{ m}} = 2,999 \lambda$$

$$\delta = 3,00 \lambda$$

- Como la diferencia de caminos es un número entero de longitudes de onda, hay interferencia constructiva y se produce un máximo.

# 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.



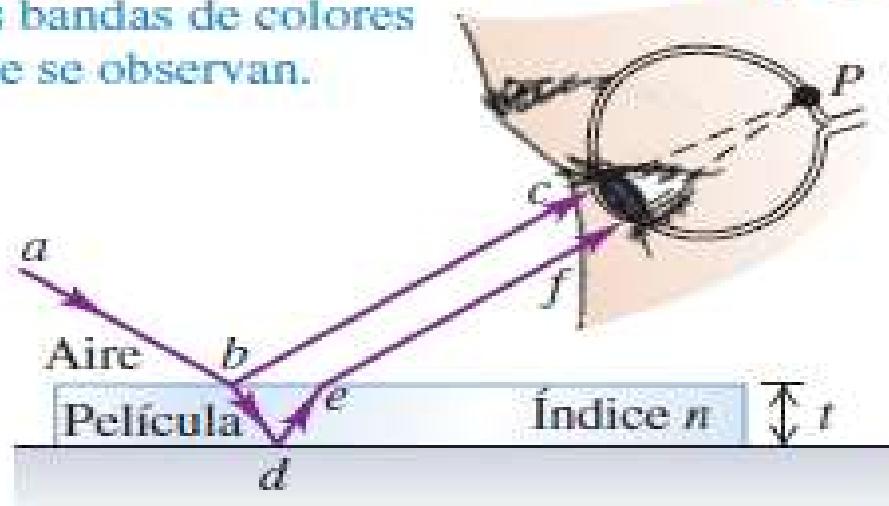
**a) Una película delgada de aceite (o algún hidrocarburo)** sobre agua muestra interferencia, como se observa en la configuración de colores cuando se hace incidir luz blanca sobre la película. Variaciones en el grosor de la película producen una interesante configuración de colores. La hoja de afeitar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

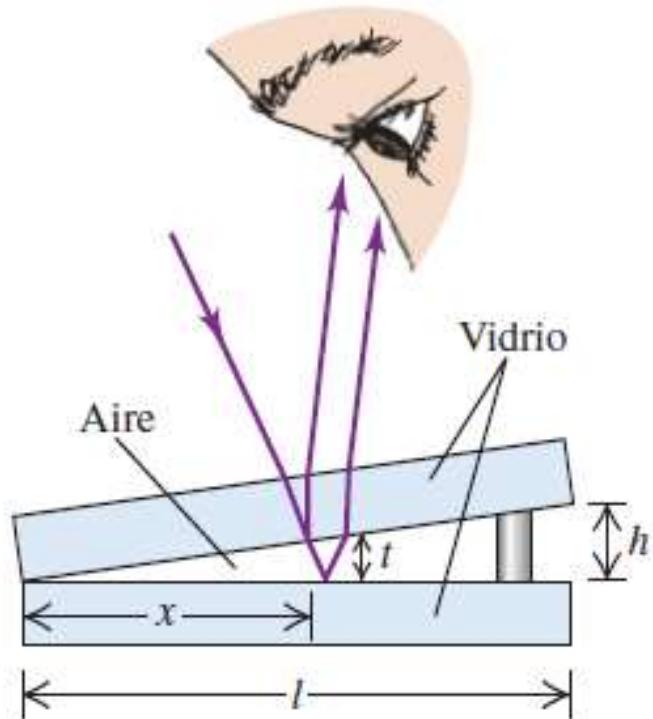
Dependiendo de la relación de fase, interferirán en forma constructiva o destructiva.

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

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

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

## Interferencia en película delgada y cambios de fase durante la reflexión



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

Queremos considerar la interferencia entre las dos ondas de luz reflejadas en las superficies adyacentes a la cuña de aire, como se muestra. También ocurren reflexiones en la cara superior de la placa de arriba y en la superficie inferior de la placa de abajo; para no complicar nuestro análisis, no las incluiremos.

La situación es la misma que en la situación anterior, excepto que el espesor de la película (cuña) no es uniforme. La diferencia de las trayectorias entre las dos ondas es exactamente el doble del espesor  $t$  de la cuña de aire en cada punto.

En los puntos en que  $2t$  es un número entero de longitudes de onda, se espera que haya interferencia constructiva y una zona brillante; ahí donde hay un valor equivalente a un número semientero de longitudes de onda, es de esperar que la interferencia sea destructiva y que haya un área oscura.

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

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

# Interferencia en película delgada y cambios de fase durante la reflexión

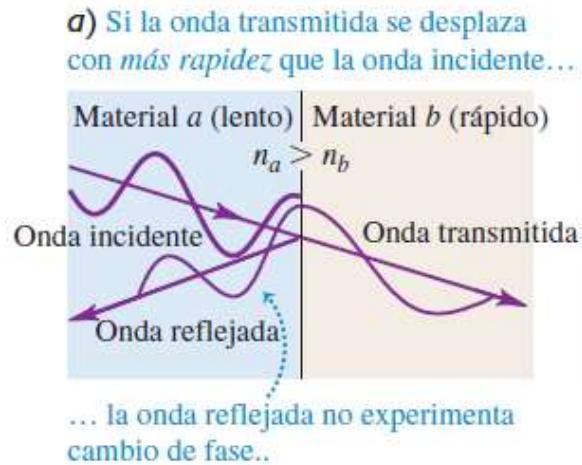
A lo largo de la línea donde las placas están en contacto se halla una franja oscura, *no una brillante*. **Esto sugiere que una u otra de las ondas reflejadas ha experimentado un cambio de fase de medio ciclo durante su reflexión.**

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

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

Este resultado demuestra que las amplitudes incidente y reflejada tienen el mismo signo cuando  $n_a$  es *más grande que  $n_b$* , y *signo contrario cuando  $n_b$  es mayor que  $n_a$* . Se distinguen los siguientes tres casos:

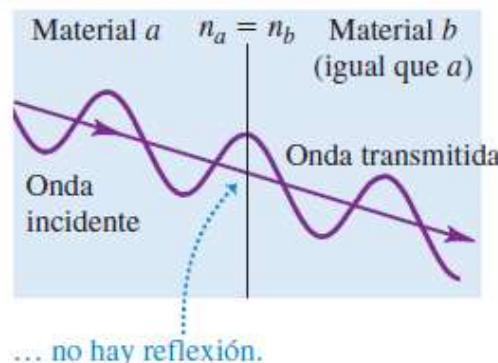
Ondas electromagnéticas que se propagan en materiales ópticos



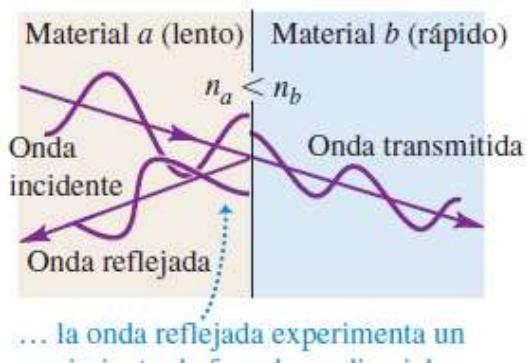
a) Si la onda transmitida se desplaza con *más rapidez* que la onda incidente...

b) Si las ondas incidente y transmitida tienen la misma rapidez...

c) Si la onda transmitida se desplaza con *más lentitud* que la onda incidente...



... no hay reflexión.



... la onda reflejada experimenta un corrimiento de fase de medio ciclo..

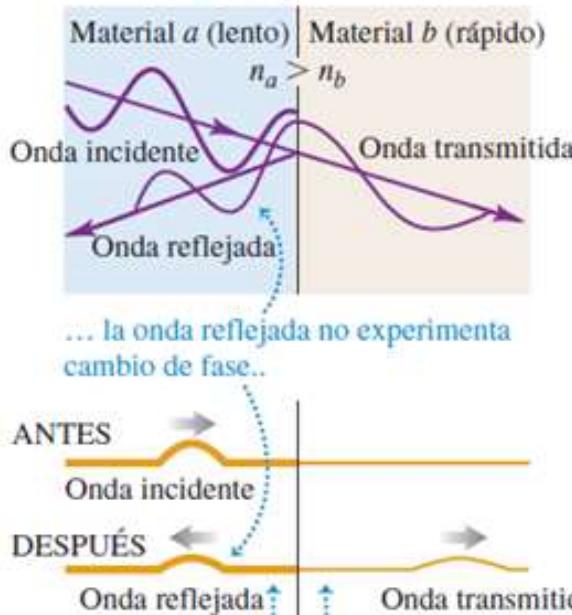
Ondas mecánicas que se propagan en cuerdas



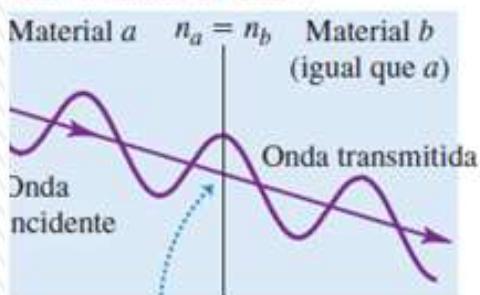
Las ondas viajan con *más lentitud* en cuerdas gruesas que en cuerdas delgadas.

# Interferencia en película delgada y cambios de fase durante la reflexión

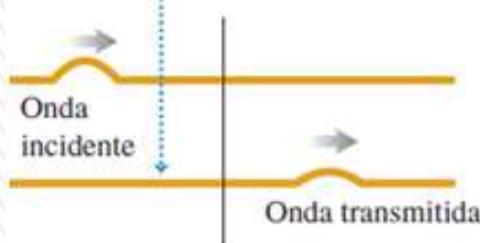
a) Si la onda transmitida se desplaza con más rapidez que la onda incidente...



Si las ondas incidente y transmitida tienen la misma rapidez...



... no hay reflexión.



**Cuando  $n_a > n_b$ , la luz viaja con más lentitud en el primer material que en el segundo (por ejemplo del vidrio al aire)** En este caso,  $E_r$  y  $E_i$  tienen el mismo signo, y el **corrimiento de fase de la onda reflejada en relación con la onda incidente es de cero**.

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

**Cuando  $n_a = n_b$ , la amplitud  $E_r$  de la onda reflejada es cero.** La onda luminosa incidente no puede "ver" la interfase y **no hay una onda reflejada**.

# Interferencia en película delgada y cambios de fase durante la reflexión

c) Si la onda transmitida se desplaza con más lentitud que la onda incidente...

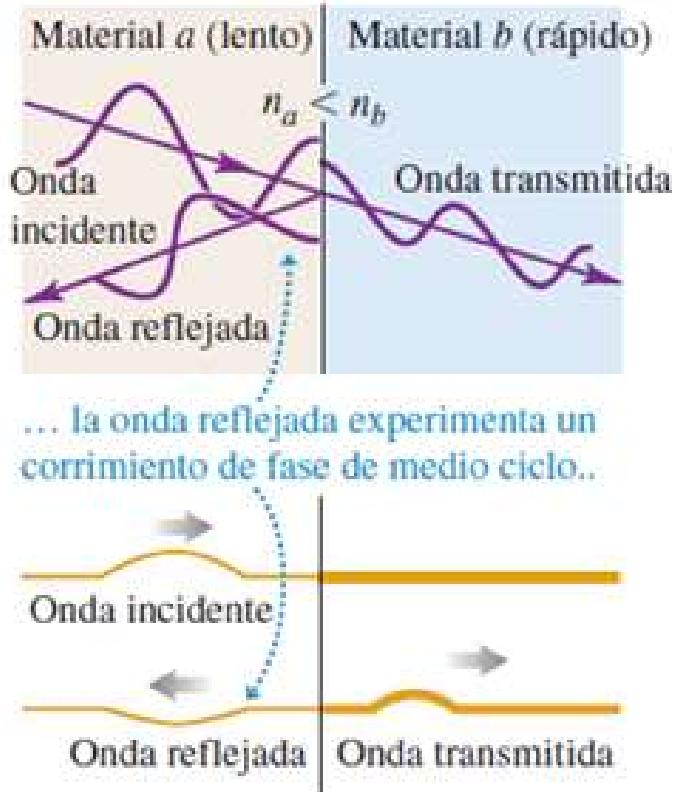


Figura c: **Cuando  $n_a < n_b$** , la luz viaja con más lentitud en el segundo material que en el primero (por ejemplo del aire al vidrio).

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

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

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

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

# INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS

Cuando hay una reflexión en una interfase donde  $n_1 < n_2$  (por ejemplo del aire al vidrio) se produce un cambio de fase de  $180^\circ$  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  $180^\circ$  en la onda reflejada, lo que equivale a media longitud de onda.

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:

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

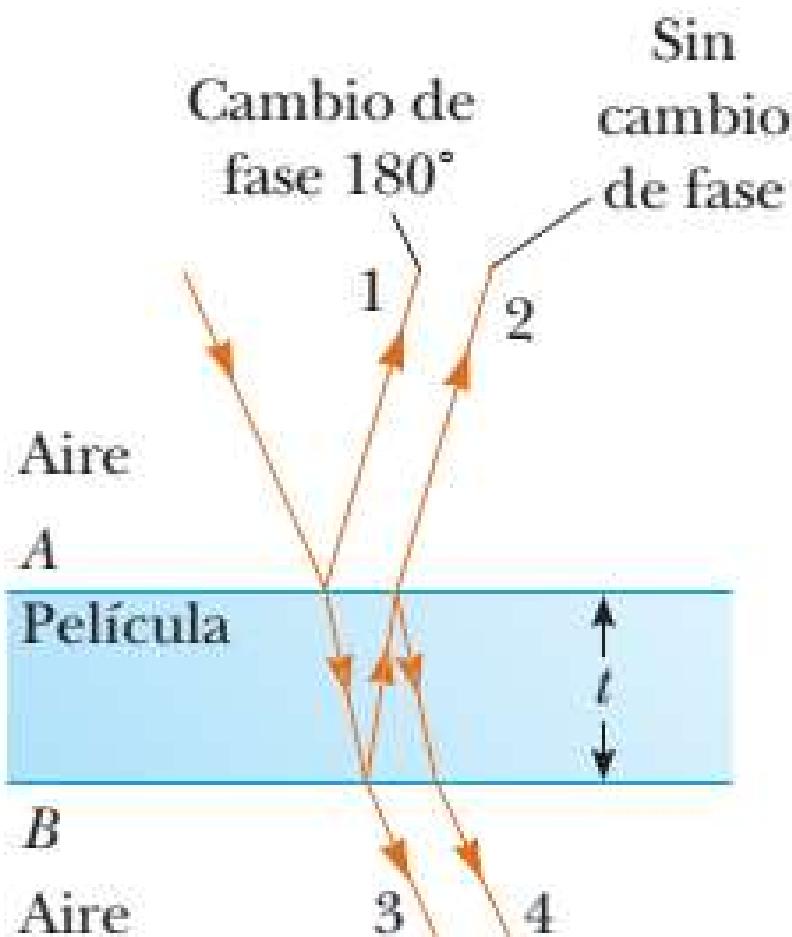
**Reflexión destructiva:**  $2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$

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

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

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

# INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS



## Condición para la interferencia constructiva en películas delgadas

incidencia casi normal desde 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° en reflexión interface aire-película

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

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

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

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

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

## 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:

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

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

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

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

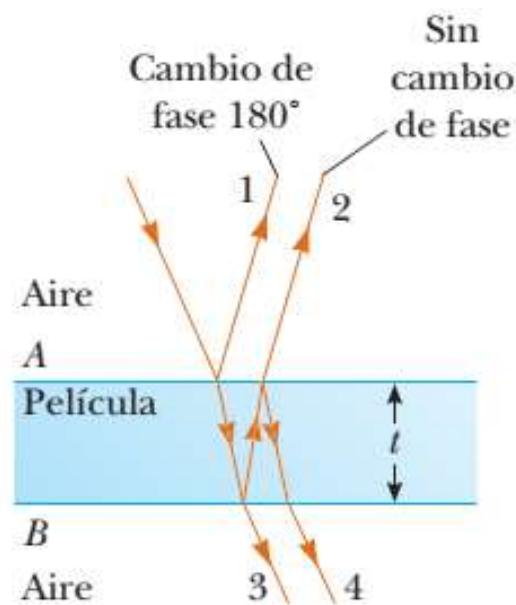
La condición de máximos es entonces:

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

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

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

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



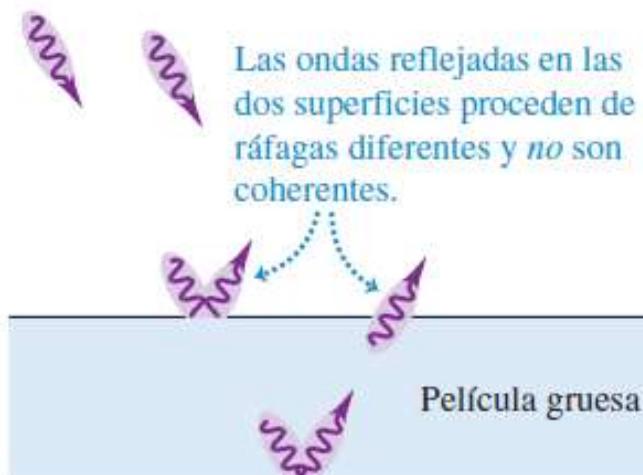
# Interferencia en películas delgadas

## Películas delgadas v gruesas

a) Luz reflejada en una película delgada



b) Luz reflejada en una película gruesa



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

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

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

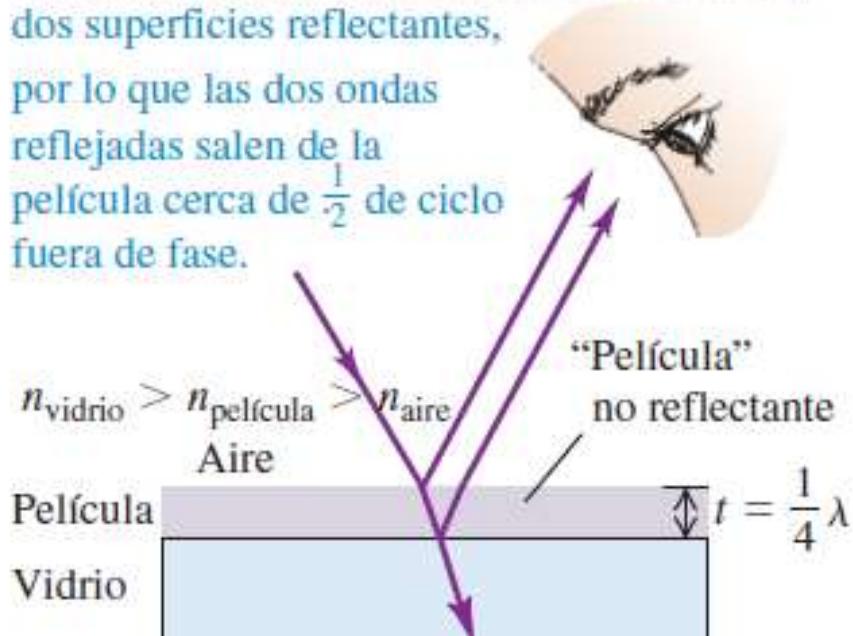
Por eso vemos los colores de interferencia en la luz reflejada en la superficie resbalosa de una película de aceite con espesor de unos cuantos micrómetros, pero no vemos esos colores en la luz reflejada en el cristal de una ventana de vidrio que tiene unos cuantos milímetros de grueso (miles de veces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

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

# Recubrimientos reflectantes y no reflectantes

La interferencia destructiva ocurre cuando

- la película tiene un espesor de  $\frac{1}{4}\lambda$  y
- la luz experimenta un cambio de fase en las dos superficies reflectantes, por lo que las dos ondas reflejadas salen de la película cerca de  $\frac{1}{2}$  de ciclo fuera de fase.



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

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

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

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

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

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

# Recubrimientos reflectantes y no reflectantes



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

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

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

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

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



## 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.

$$n = 1,33 \quad \lambda_{\text{máximo}} = 600 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{mínimo}} = 380 \text{ a } 430 \text{ nm}$$

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

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

Hay 1 solo cambio de fase en  $180^\circ$ , por tanto:

La condición de máximos es entonces:

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

La condición de mínimos

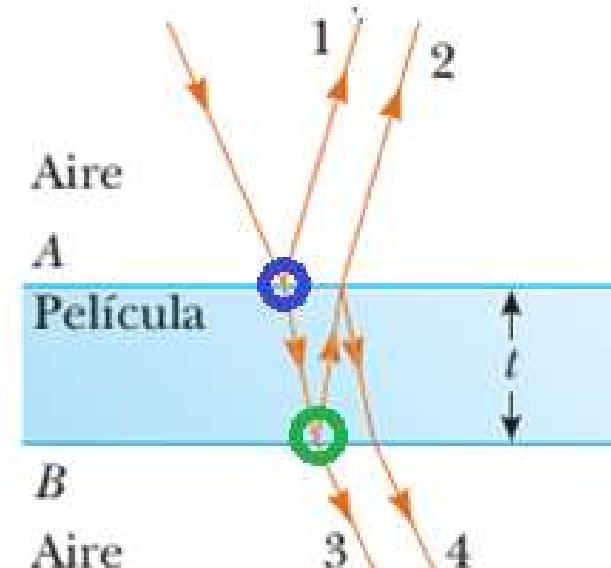
$$2nt = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

es:

Voy a calcular los posibles espesores de la película (para diferentes valores de  $m$ ) en los cuales hay un máximo para  $\lambda = 600\text{nm}$

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

$m$	0	1	2	3	4	5
$\lambda = 600 \text{ nm}$	113	338	564	789	1015	1241



## 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.

$m$	0	1	2	3	4	5
$\lambda = 600\text{ nm}$	113	338	564	789	1015	1241

Ahora dado el rango de longitudes de onda del extremo violeta:  $\lambda_1 = 380\text{ nm}$  y  $\lambda_2 = 430\text{ nm}$  calculo los rangos de espesores (mínimo y máximo) para diferentes valores de  $m$ :

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

$$t_1 = m \frac{\lambda_1}{2n} = m \frac{380}{2(1,33)} = 142,86\text{ m} \quad t_2 = m \frac{\lambda_2}{2n} = m \frac{430}{2(1,33)} = 161,65\text{ m}$$

$m$	0	1	2	3	4	5	6
$t_1$ -mínimo (nm)	0	143	286	429	571	714	857
$t_2$ máximo (nm)	0	162	323	485	647	808	970

Ahora busco un espesor que obtuve con el  $\lambda=600\text{ nm}$  que esté entre un  $t$  mínimo y un  $t$  máximo que calculé para el rango ultravioleta.

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

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