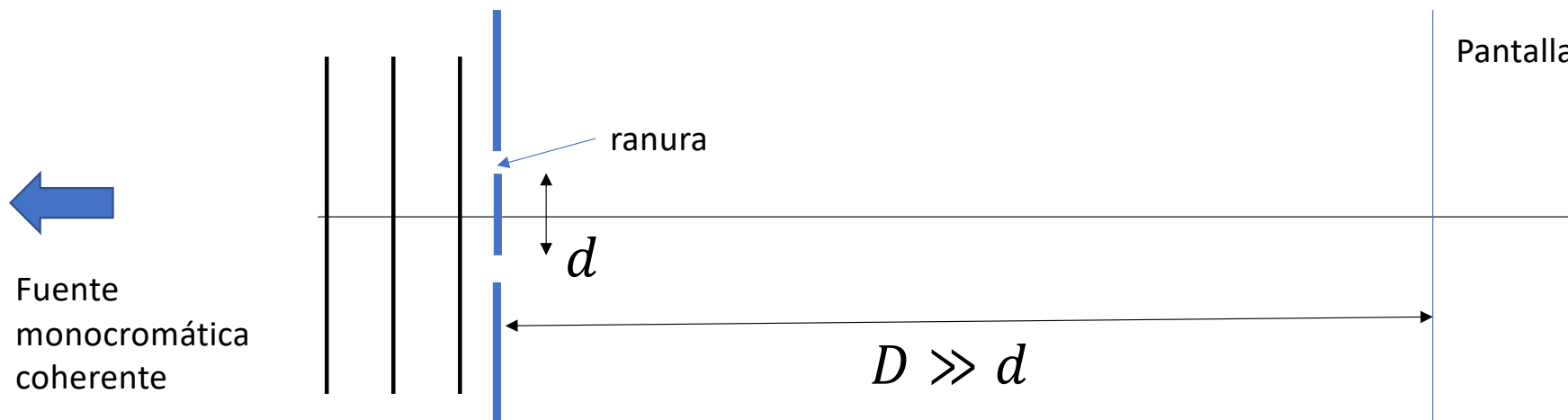


Experimento de Young

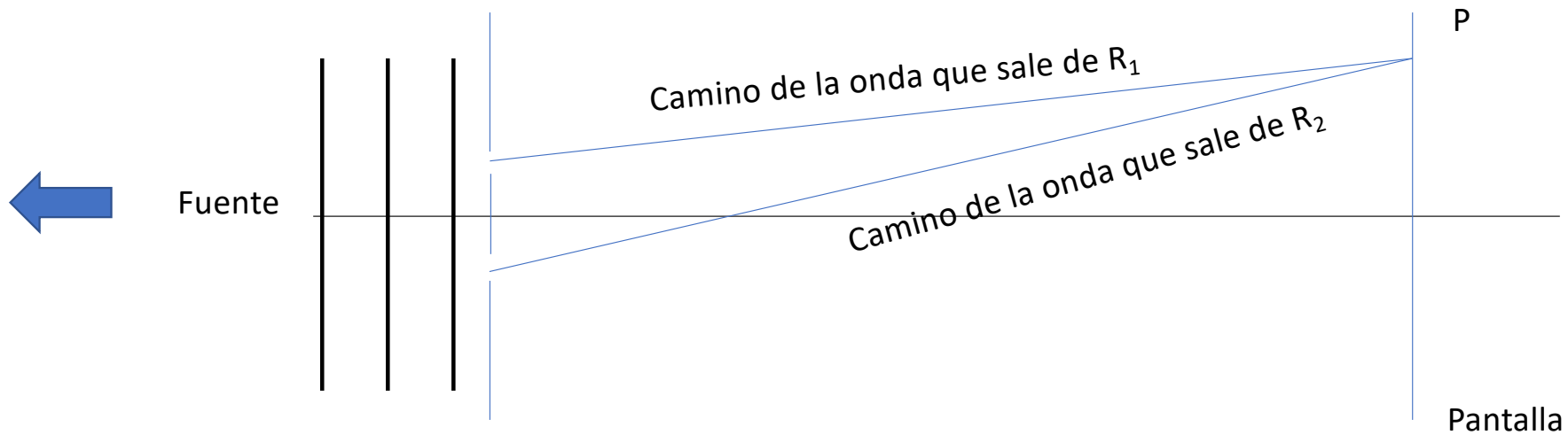
Experimento de Young (1801)

- Fuente de luz coherente con λ constante muy lejos de una pantalla con dos ranuras muy pequeñas equidistantes de un eje sobre el que está la fuente.
- Distancia d entre ranuras, distancia D desde ranura a pantalla.
- Del otro lado, también muy lejos, hay una pantalla donde vemos el efecto.
- Pantalla con ranura, y pantalla donde vemos el efecto son \perp al eje de simetría.

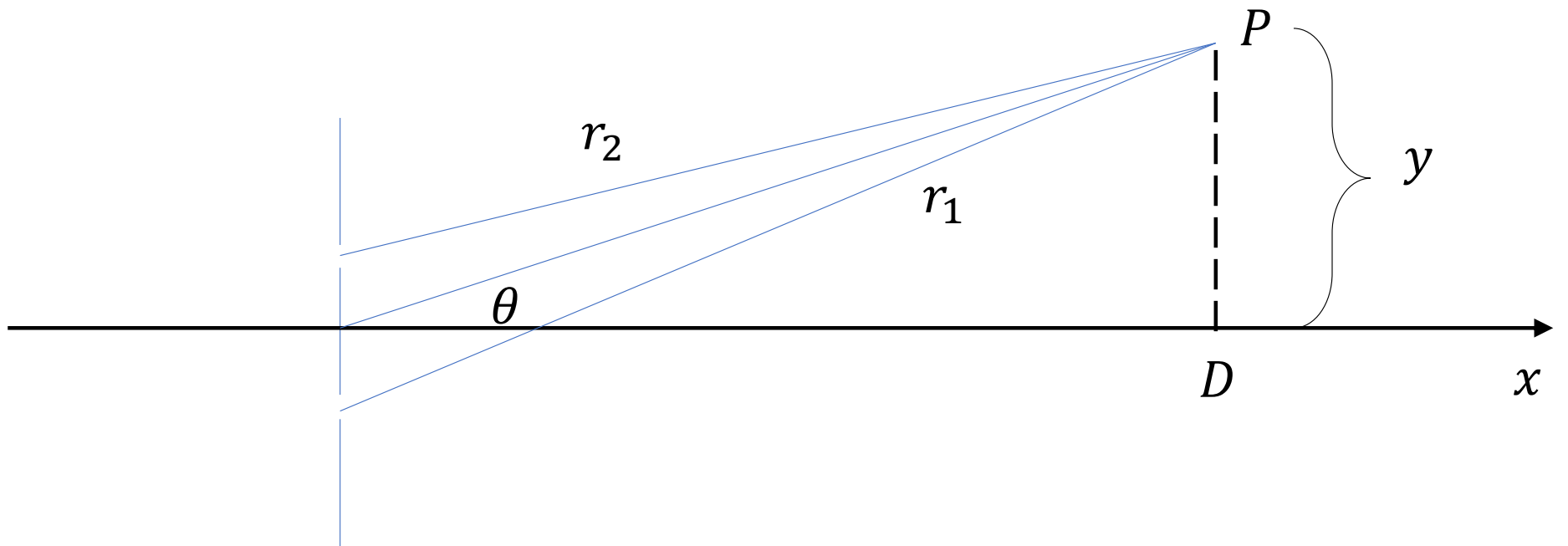


Experimento de Young (1801)

- La idea es que la diferencia de camino entre las ondas provenientes de las ranuras haga que los campos eléctricos en el punto P de la pantalla interfieran.

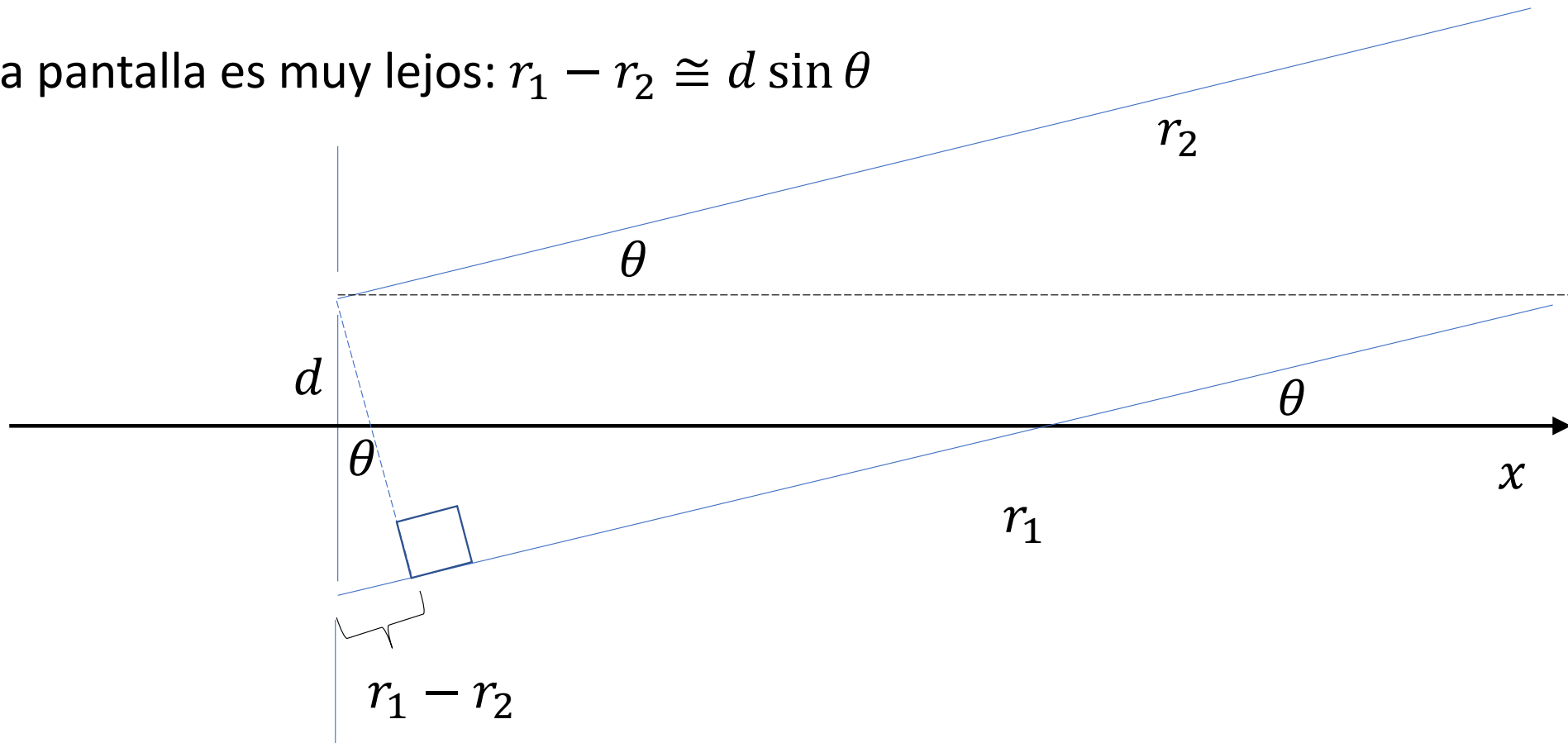


Diferencia de camino entre ondas



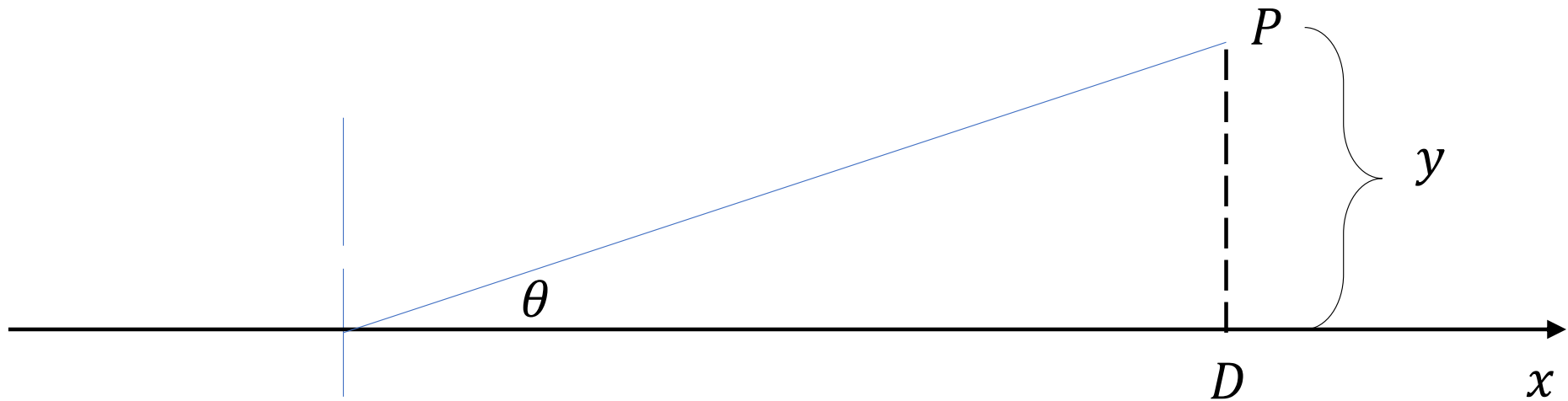
Diferencia de camino entre ondas

- Si la pantalla es muy lejos: $r_1 - r_2 \cong d \sin \theta$



Diferencia de camino entre ondas

- Si la pantalla es muy lejos:



$$r_1 - r_2 \cong d \sin \theta \cong d \tan \theta = d \frac{y}{D}$$

Diferencia de camino entre ondas

- Entonces, concluimos que la diferencia de camino entre la onda que sale de una rendija y la onda que sale de la otra al llegar a la pantalla es:

$$r_1 - r_2 \cong d \sin \theta = d \tan \theta = d \frac{y}{D}$$

- Esto implica un corrimiento de fase entre una y otra de

$$kd \sin \theta = kd \tan \theta = kd \frac{y}{D}$$

Interferencia constructiva

- Como vimos antes, la interferencia constructiva entre dos ondas ocurre cuando la diferencia de fase es:

$$\delta_{max} = kd \theta_{max} = kd \frac{y_{max}}{D} = k\lambda + 2n\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Pero también hay interferencia constructiva cuando

$$\delta = 0$$

- Entonces, reemplazando k e incluyendo 0 tenemos

$$\delta_{max} = kd \theta_{max} = kd \frac{y_{max}}{D} = 0, 2\pi, 4\pi, \dots 2n\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Interferencia constructiva

- En consecuencia, en la pantalla habrá interferencia constructiva en los siguientes valores de y_{max}

$$y_{max} = \frac{2n\pi D}{kd} = \frac{nD\lambda}{d} \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

- El problema es simétrico, respecto al eje x por lo que incluimos los y_{max} negativos

$$y_{max} = \pm \frac{nD\lambda}{d} \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Interferencia destructiva

- Como vimos antes, la **interferencia destructiva** entre dos ondas ocurre cuando la diferencia de fase es:

$$\delta_{min} = kd \theta_{min} = kd \frac{y_{min}}{D} = \frac{k\lambda}{2} + 2n\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

- Entonces, reemplazando k tenemos

$$\delta_{min} = kd \theta_{min} = kd \frac{y_{min}}{D} = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots (2n + 1)\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Interferencia destructiva

- En consecuencia, en la pantalla habrá interferencia destructiva en los siguientes valores de y_{min}

$$y_{min} = \frac{(2n + 1)\pi D}{kd} = \frac{(2n + 1)D\lambda}{2d} \quad \text{con } n = 0, 1, 2 \dots$$

- El problema es simétrico, respecto al eje x por lo que incluimos los y_{min} negativos

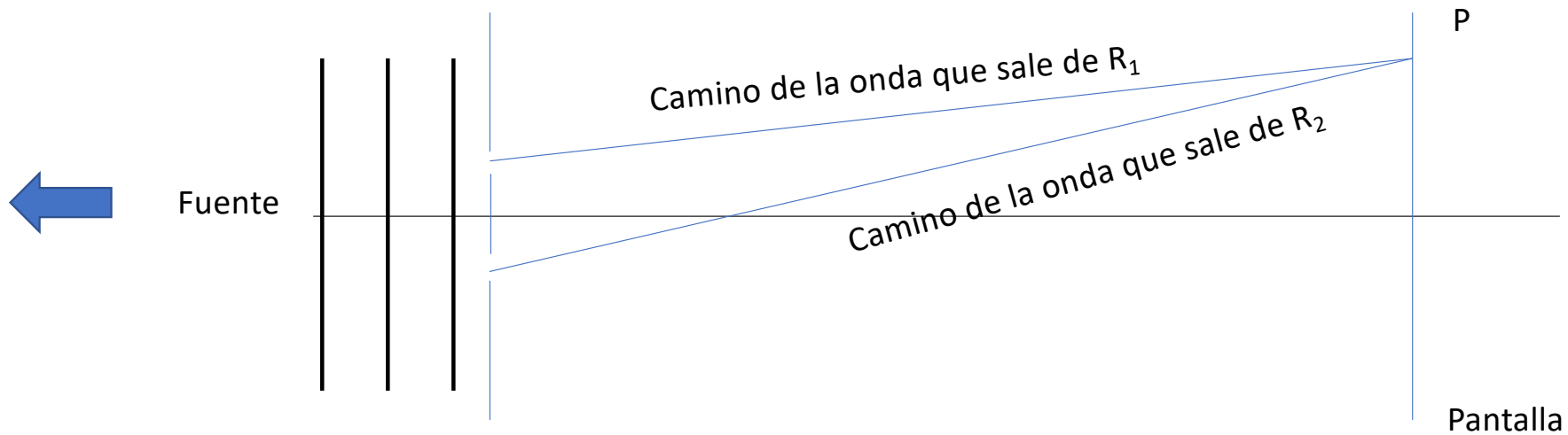
$$y_{min} = \pm \frac{(2n + 1)D\lambda}{2d} \quad \text{con } n = 0, 1, 2 \dots$$

Simulaciones PHET sobre ondas e interferencia

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html

Experimento de Young (1801)

- La idea es que la diferencia de camino entre las ondas provenientes de las ranuras haga que los campos eléctricos en el punto P de la pantalla interfieran.



Diferencia de camino entre ondas

- Entonces, concluimos que la diferencia de camino entre la onda que sale de una rendija y la onda que sale de la otra al llegar a la pantalla es:

$$r_1 - r_2 \cong d \sin \theta = d \tan \theta = d \frac{y}{D}$$

- Esto implica un corrimiento de fase entre una y otra de

$$kd \sin \theta = kd \tan \theta = kd \frac{y}{D}$$

Interferencia constructiva

- Como vimos antes, la interferencia constructiva entre dos ondas ocurre cuando la diferencia de fase es:

$$\delta_{max} = kd \theta_{max} = kd \frac{y_{max}}{D} = k\lambda + 2n\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Pero también hay interferencia constructiva cuando

$$\delta = 0$$

- Entonces, reemplazando k e incluyendo 0 tenemos

$$\delta_{max} = kd \theta_{max} = kd \frac{y_{max}}{D} = 0, 2\pi, 4\pi, \dots 2n\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Interferencia constructiva

- En consecuencia, en la pantalla habrá interferencia constructiva en los siguientes valores de y_{max}

$$y_{max} = \frac{2n\pi D}{kd} = \frac{nD\lambda}{d} \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

- El problema es simétrico, respecto al eje x por lo que incluimos los y_{max} negativos

$$y_{max} = \pm \frac{nD\lambda}{d} \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Interferencia destructiva

- Como vimos antes, la **interferencia destructiva** entre dos ondas ocurre cuando la diferencia de fase es:

$$\delta_{min} = kd \theta_{min} = kd \frac{y_{min}}{D} = \frac{k\lambda}{2} + 2n\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

- Entonces, reemplazando k tenemos

$$\delta_{min} = kd \theta_{min} = kd \frac{y_{min}}{D} = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots (2n + 1)\pi \quad \text{con } n = 0,1,2 \dots$$

Interferencia destructiva

- En consecuencia, en la pantalla habrá interferencia destructiva en los siguientes valores de y_{min}

$$y_{min} = \frac{(2n + 1)\pi D}{kd} = \frac{(2n + 1)D\lambda}{2d} \quad \text{con } n = 0, 1, 2 \dots$$

- El problema es simétrico, respecto al eje x por lo que incluimos los y_{min} negativos

$$y_{min} = \pm \frac{(2n + 1)D\lambda}{2d} \quad \text{con } n = 0, 1, 2 \dots$$

Irradiancia

- La energía eléctrica por unidad de tiempo que atraviesa una unidad de superficie venía dada por:

$$c\epsilon_0 |\vec{E}|^2$$

- Llamamos irradiancia al promedio temporal de este flujo de energía, es una medida del brillo en la pantalla P.

$$I = c\epsilon_0 \langle |\vec{E}|^2 \rangle$$

donde el promedio se toma en un período $T \gg \tau = \frac{2\pi}{\omega}$

$$\langle |\vec{E}|^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{T+t} |\vec{E}|^2 dt$$

Irradiancia

- Veamos la expresión de I cuando \vec{E} es la suma de dos ondas de igual longitud de onda y por lo tanto de igual frecuencia:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

donde

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2)$$

Irradiancia

- Tenemos entonces

$$\vec{E}^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}$$

$$\vec{E}^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$$

$$\vec{E}^2 = \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$$

Irradiancia

- Olvidándonos de las constantes multiplicativas vemos que si llamamos

$$I_1 = \langle |\vec{E}_1|^2 \rangle \quad \text{e} \quad I_2 = \langle |\vec{E}_2|^2 \rangle \quad \text{e} \quad I_{12} = 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$$

- Entonces

$$I = \langle |\vec{E}|^2 \rangle = I_1 + I_2 + I_{12}$$

- El tercer término es el término de *interferencia*.

Irradiancia

- Para calcular el término de interferencia primero debemos escribir

$$\begin{aligned}\vec{\mathbf{E}}_1 \cdot \vec{\mathbf{E}}_2 &= \vec{\mathbf{E}}_{01} \cdot \vec{\mathbf{E}}_{02} \cos(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} - \omega t + \varepsilon_1) \\ &\quad \times \cos(\vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} - \omega t + \varepsilon_2)\end{aligned}$$

- Luego separamos la parte temporal de los cos(..)

$$\vec{\mathbf{E}}_1 \cdot \vec{\mathbf{E}}_2 =$$

$$\begin{aligned}\vec{\mathbf{E}}_{01} \cdot \vec{\mathbf{E}}_{02} &[\cos(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_1) \cos \omega t + \sin(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_1) \sin \omega t] \\ &\times [\cos(\vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_2) \cos \omega t + \sin(\vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_2) \sin \omega t]\end{aligned}$$

Irradiancia

- Al aplicar propiedad distributiva y promediar en el tiempo, sólo sobreviven los términos que tienen $(\cos(\omega t))^2$ y $(\sin(\omega t))^2$ cuyo promedio es $\frac{1}{2}$, con lo cual:

$$\langle \vec{\mathbf{E}}_1 \cdot \vec{\mathbf{E}}_2 \rangle_T = \frac{1}{2} \vec{\mathbf{E}}_{01} \cdot \vec{\mathbf{E}}_{02} \cos(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_1 - \vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} - \varepsilon_2)$$

- Donde

$$(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2),$$

- Es la diferencia de fase que llamamos δ

Irradiancia

- Si agregamos la simplificación

$$\vec{E}_{01} = \vec{E}_{02} = \vec{E}_0$$

- Tenemos

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E_0^2}{2}$$

y

$$I_{12} = \frac{1}{2} E_0^2 \cos \delta$$

- Entonces

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

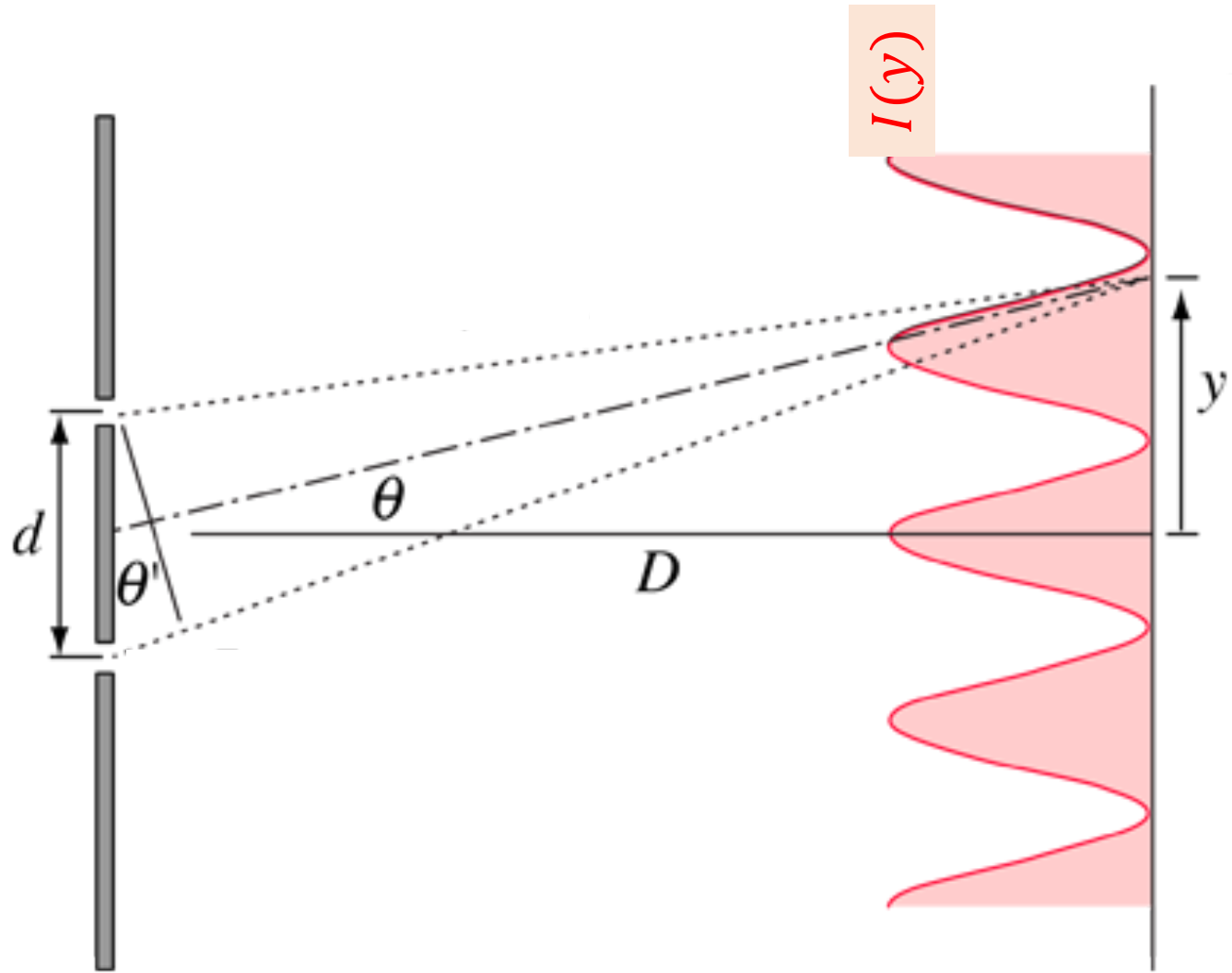
Irradiancia

- En Young, no hay diferencia de fase inicial entre las ondas y $\vec{k} = \vec{k}_1 = \vec{k}_2$ por lo que la diferencia de fase ocurre por la diferencia de distancia $r_1 - r_2$
- Entonces para $\delta_{max} = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \dots$

$$I_{max} = 4I_0$$

- Mientras que para $\delta_{min} = \pm\pi, \pm 3\pi \dots$

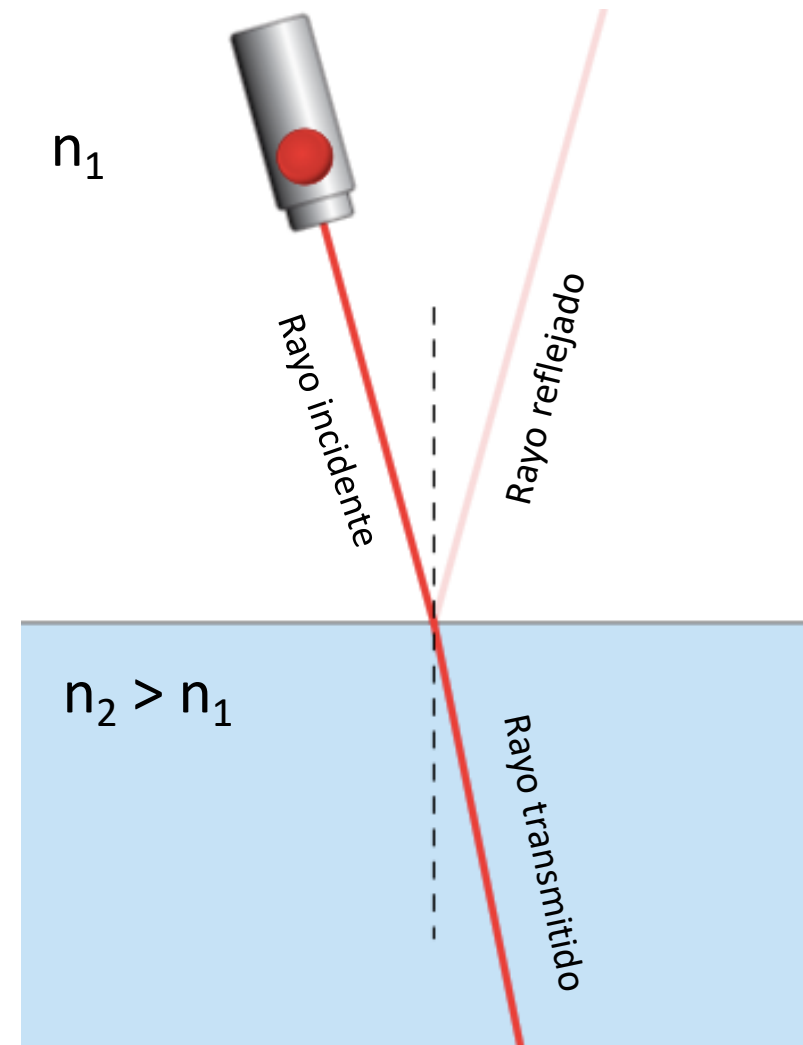
$$I_{min} = 0$$



Interferencia por
reflexión/refracción

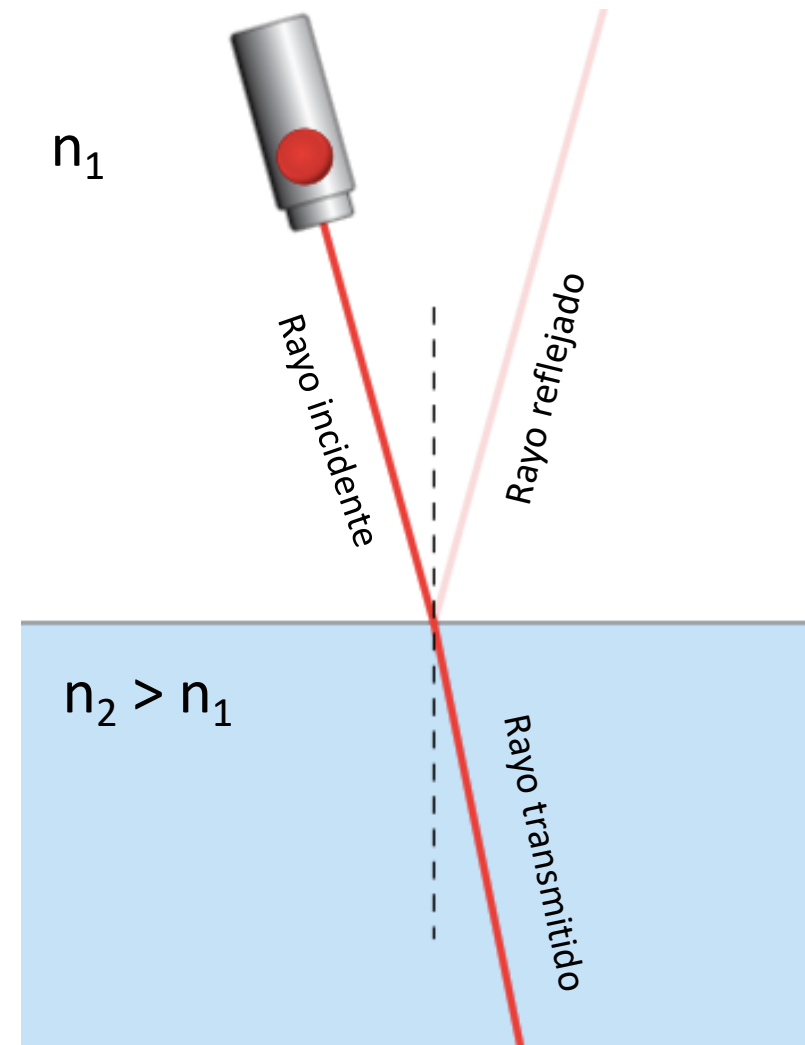
Reflexión, refracción y fase

- La experiencia muestra que en toda interfase entre dos medios n_1 y n_2 , una onda electromagnética incidente da lugar a una onda transmitida y otra reflejada.



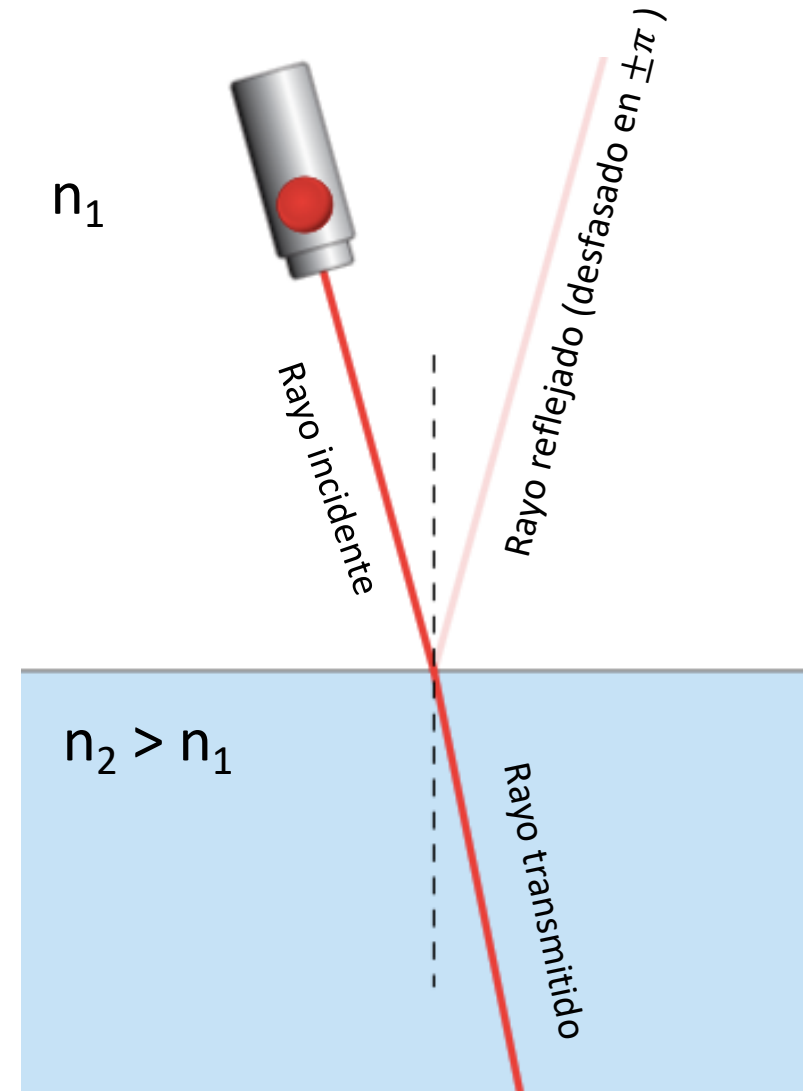
Reflexión, refracción y fase

- La experiencia muestra que en toda interfase entre dos medios n_1 y n_2 , una onda electromagnética incidente da lugar a una onda transmitida y otra reflejada.
- De la misma manera que en la cuerda con extremo fijo, el campo eléctrico de la onda reflejada se invierte respecto al campo de la incidente si $n_2 > n_1$.



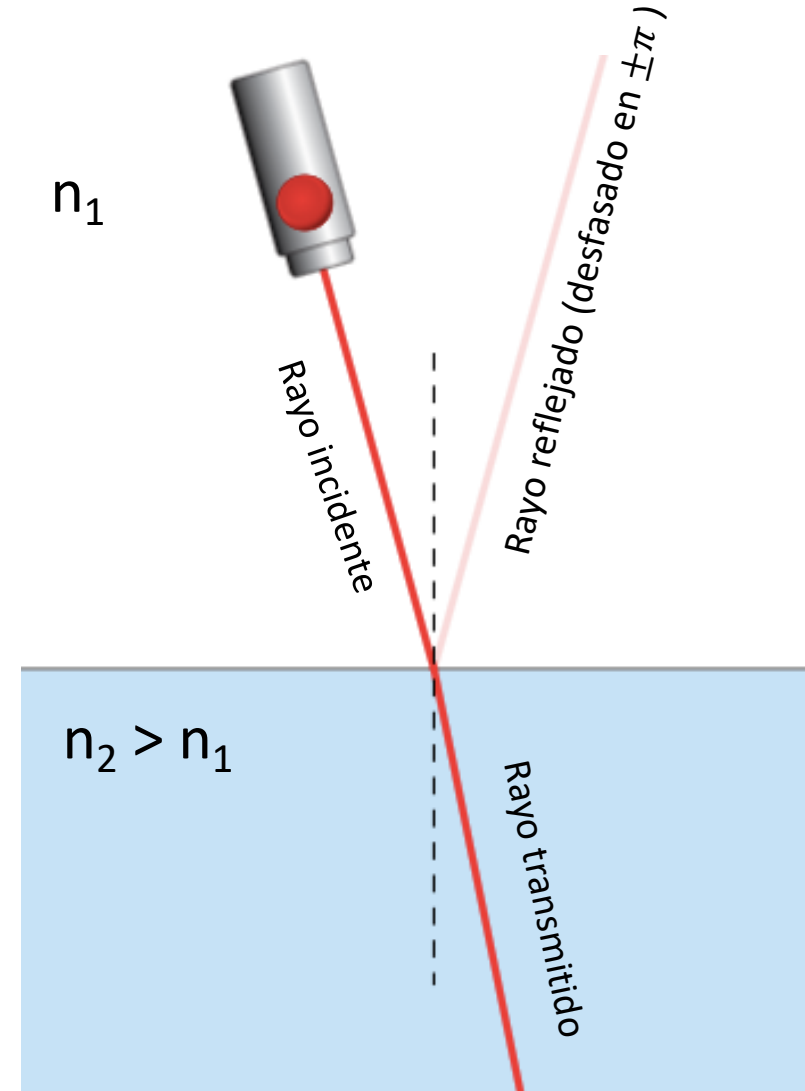
Reflexión, refracción y fase

- La experiencia muestra que en toda interfase entre dos medios n_1 y n_2 , una onda electromagnética incidente da lugar a una onda transmitida y otra reflejada.
- De la misma manera que en la cuerda con extremo fijo, el campo eléctrico de la onda reflejada se invierte respecto al campo de la incidente si $n_2 > n_1$.
- Esto significa un cambio de fase de $\pm\pi$ en la fase de la onda reflejada respecto a la incidente.



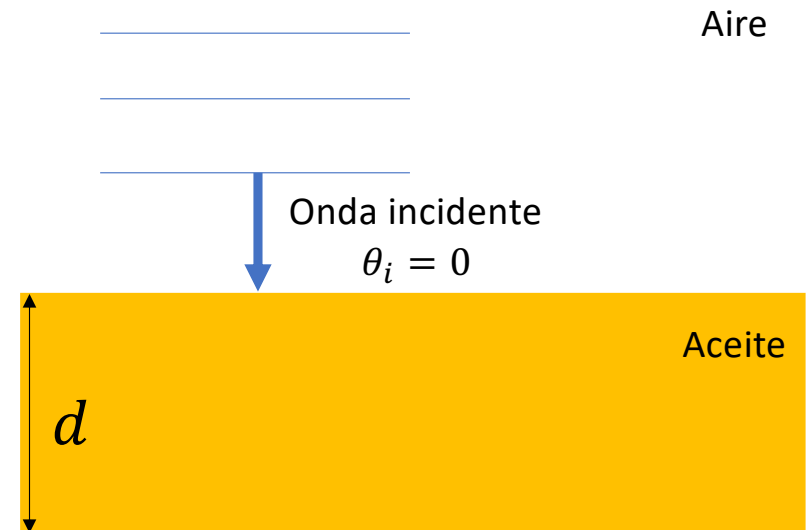
Reflexión, refracción y fase

- La experiencia muestra que en toda interfase entre dos medios n_1 y n_2 , una onda electromagnética incidente da lugar a una onda transmitida y otra reflejada.
- De la misma manera que en la cuerda con extremo fijo, el campo eléctrico de la onda reflejada se invierte respecto al campo de la incidente si $n_2 > n_1$.
- Esto significa un cambio de fase de $\pm\pi$ en la fase de la onda reflejada respecto a la incidente.
- La onda transmitida no presenta desfasaje ni tampoco hay desfasaje en la reflejada cuando $n_2 < n_1$.



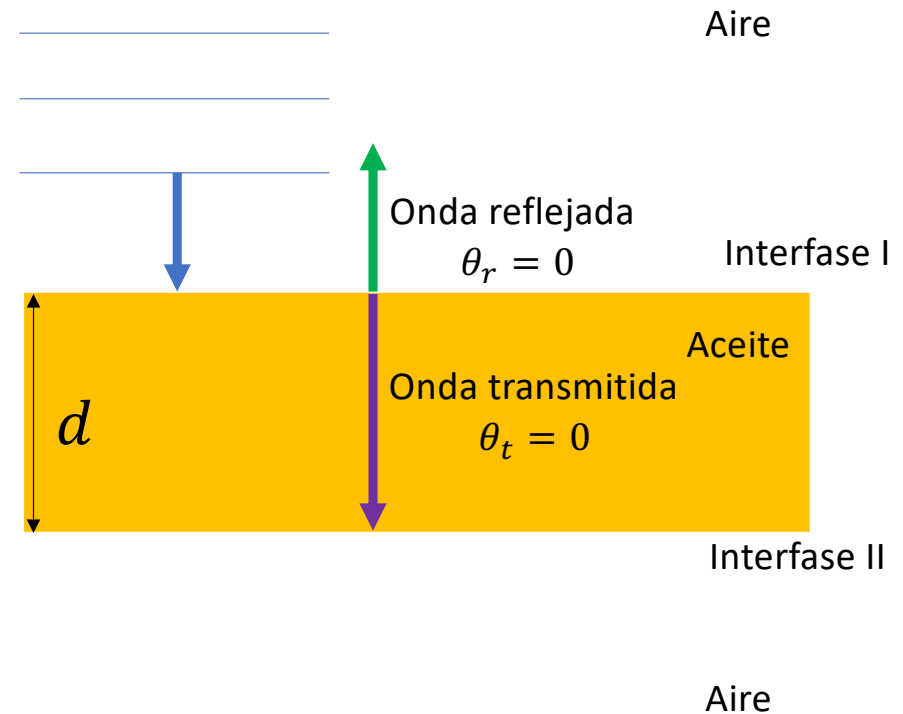
Interferencia de láminas delgadas

- Imaginemos una lámina fina de aceite ($n = 1,45$) rodeada de aire.
- La lámina es delgada (la onda no debe perder coherencia) de espesor d .
- Una onda plana, coherente, de longitud de onda λ incide **normalmente** desde el aire.



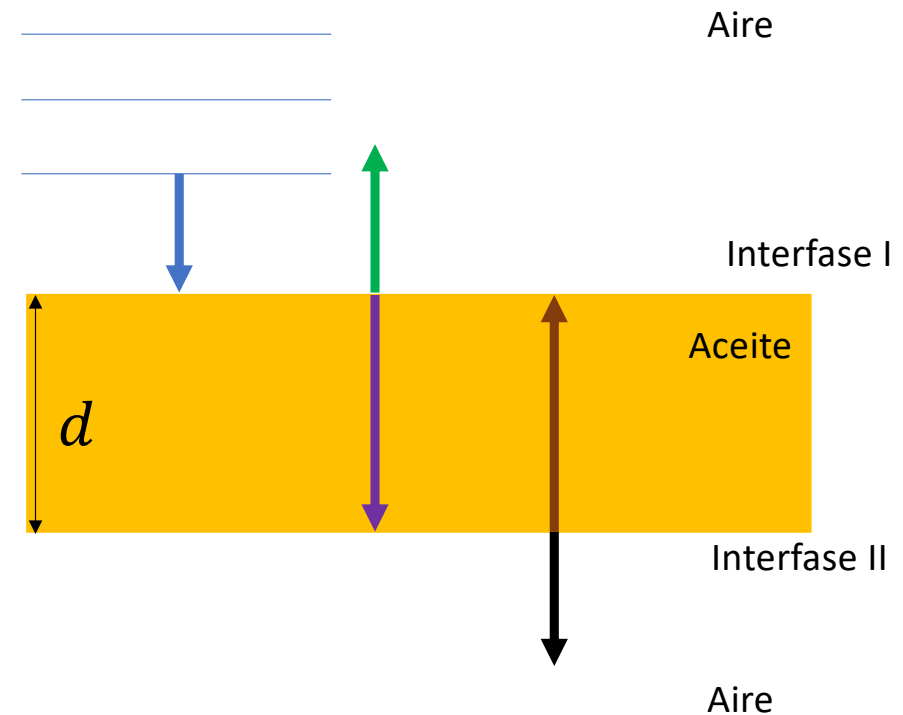
Interferencia de láminas delgadas

- Producto de la reflexión y la refracción, el rayo incidente en la interfase I se separa en dos partes: Una minoritaria que se refleja (verde) y otra mayoritaria que entra en el aceite (violeta).



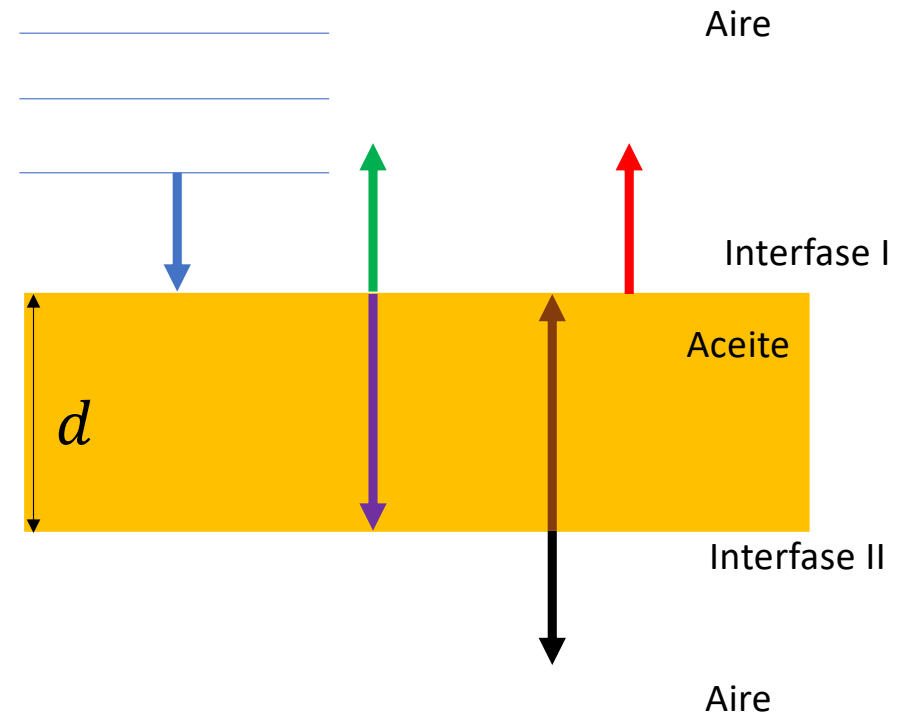
Interferencia de láminas delgadas

- Producto de la reflexión y la refracción, el rayo incidente en la interfase I se separa en dos partes: Una minoritaria que se refleja (verde) y otra mayoritaria que entra en el aceite (violeta).
- El rayo violeta incide normalmente en la interfase II y da lugar a un rayo reflejado (marrón) y otro (negro) que pasa del otro lado



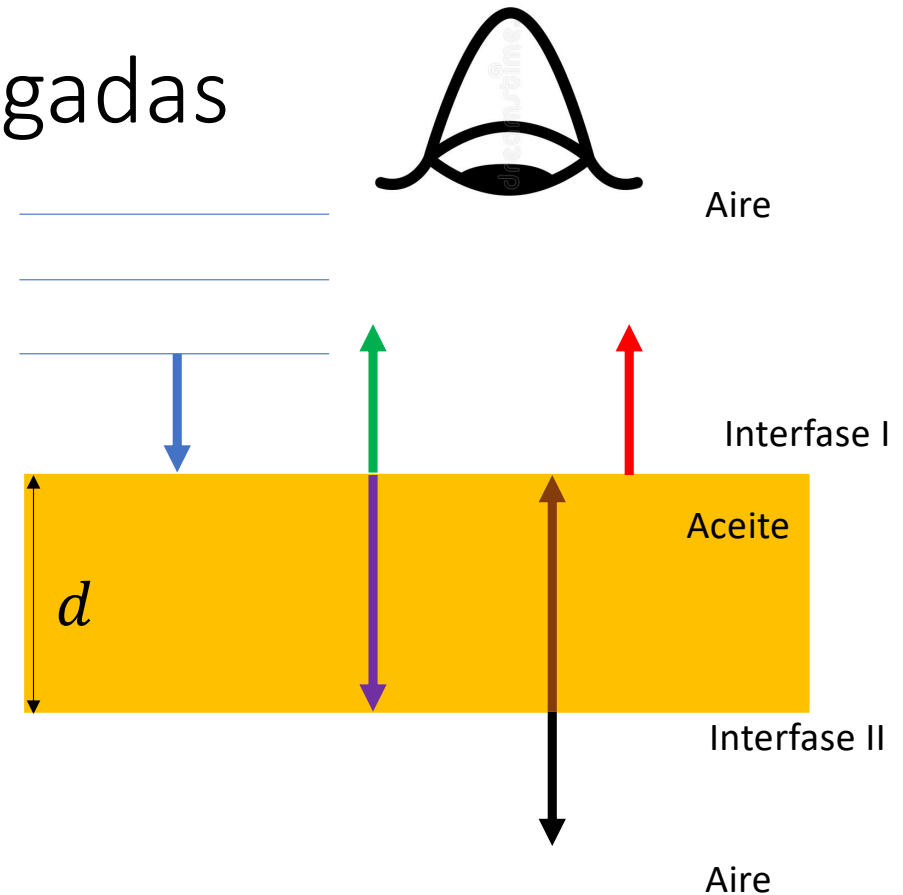
Interferencia de láminas delgadas

- El rayo marrón, reflejado en la interfase II se refracta volviendo a la capa superior de aire (color rojo).



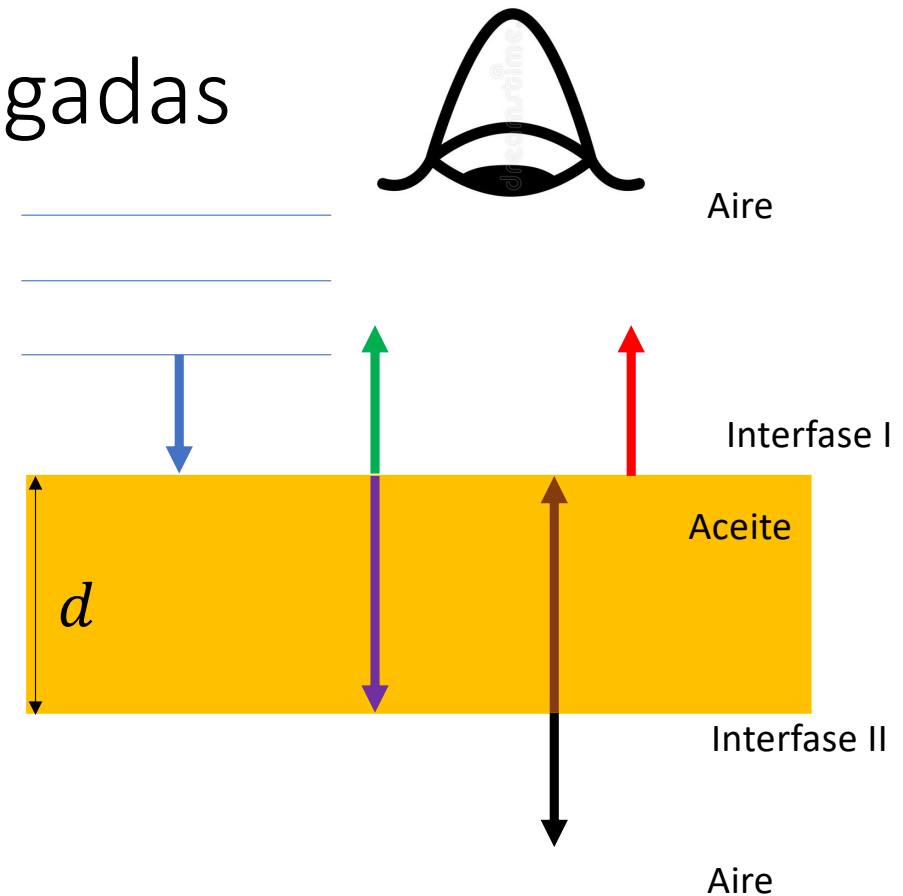
Interferencia de láminas delgadas

- El rayo marrón, reflejado en la interfase II se refracta volviendo a la capa superior de aire (color rojo).
- Una persona que ve desde arriba (por reflexión) va a ver una interferencia entre los rayos verde y rojo.



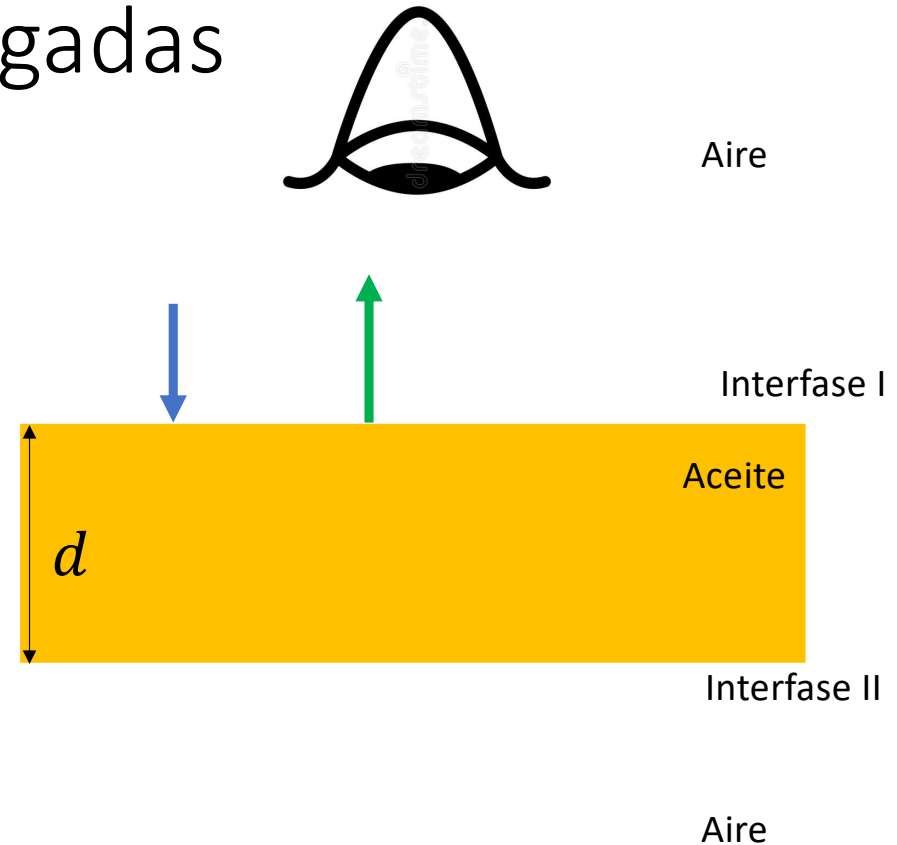
Interferencia de láminas delgadas

- El rayo marrón, reflejado en la interfase II se refracta volviendo a la capa superior de aire (color rojo).
- Una persona que ve desde arriba (por reflexión) va a ver una interferencia entre los rayos verde y rojo.
- ¿Cómo será la interferencia entre estos dos rayos?



Interferencia de láminas delgadas

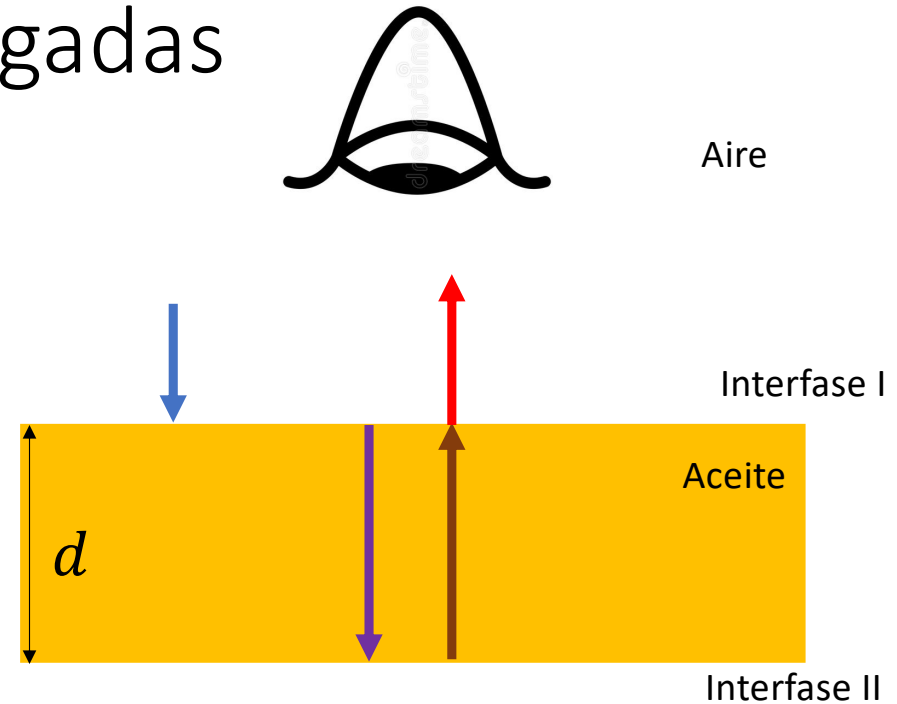
- Veamos la diferencia de fase entre ambos cuando emergen del aceite
- Por **reflejarse** en una interfase desde un n mayor (aceite) de vuelta a un n menor (aire) el rayo verde se desfasa π respecto al incidente.
- El rayo verde no acumula diferencia de fase adicional pues no viaja dentro del aceite.



Diferencia de fase total
del rayo verde: π

Interferencia de láminas delgadas

- El rayo rojo tiene origen en la refracción del rayo azul en la interfase I, la reflexión en la interfase II y por último la refracción en la interfase I.
- En la reflexión en la interfase II no suma diferencia de fase como el rayo verde pues lo hace desde un n menor (aire) de vuelta a un n menor (aceite).
- Por viajar una distancia igual a $2d$ dentro del aceite, la diferencia de fase respecto al rayo azul es: $k_{ac}2d$



Diferencia de fase total
del rayo rojo: $2k_{ac}d = \frac{4\pi d}{\lambda_{ac}}$

Interferencia de láminas delgadas

- Recordemos que la cantidad crucial en la interferencia de dos ondas es la diferencia de sus fases

δ

$$= (\textit{fase acumulada por rayo verde} - \textit{fase acumulada por rayo rojo})$$

- Fase acumulada por rayo verde

0 por camino recorrido ; π por reflexión

- Fase acumulada por el rayo rojo

$\frac{4\pi d}{\lambda_{ac}}$ por camino recorrido + 0 de reflexiones

Interferencia de láminas delgadas

- La diferencia de fase entre los rayos verde y rojo es entonces

$$\delta = \pi - \frac{4\pi d}{\lambda_{ac}} = \pi - \frac{4\pi d n_{ac}}{\lambda_{vacio}}$$

- Para que haya **interferencia constructiva**:

$$\delta = \delta_{max} = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \pm 6\pi \dots$$

- Para que haya **interferencia destructiva**:

$$\delta = \delta_{min} = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \dots$$

Valores de d para interferencia constructiva

- Si fijo λ modificando d vamos a tener aumento en la intensidad en los rayos reflejados si

$$d = d_{max} = -\frac{(\delta_{max} - \pi)\lambda}{4\pi n_{ac}}$$

- Recordar que d_{max} debe ser positivo. Probemos valores de δ_{max} .

δ_{max}	d_{max}
$2\pi, 4\pi, 6\pi\dots$	Negativo (no sirve)
0	$\frac{\lambda}{4n_{ac}}$
-2π	$\frac{3\lambda}{4n_{ac}}$
-4π	$\frac{5\lambda}{4n_{ac}}$

Valores de d para interferencia constructiva

- El valor más pequeño de d_{max} para tener interferencia constructiva es
$$\frac{\lambda}{4n_{ac}}$$

- Supongamos $\lambda = 550 \text{ nm}$ (amarillo verdoso) entonces, el espesor mínimo vale:

$$\frac{\lambda}{4n_{ac}} = 94,8 \text{ nm}$$

- Otros espesores válidos serán

$$3 \times 94,8 \text{ nm}, 5 \times 94,8 \text{ nm}, 7 \times 9,8 \text{ nm} \text{ etc}$$

Valores de d para interferencia destructiva

- Si fijamos λ modificando d vamos a poder tener disminución en la intensidad en los rayos reflejados si

$$d = d_{min} = -\frac{(\delta_{min} - \pi)\lambda}{4\pi n_{ac}}$$

- Nuevamente, d_{min} debe ser positivo. Probemos valores de δ_{min} .

δ_{min}	d_{min}
$3\pi, 5\pi\dots$	Negativo (no sirve)
π	0 (lámina hiperdelgada)
$-\pi$	$\frac{\lambda}{2n_{ac}}$
-3π	$\frac{\lambda}{n_{ac}}$

Valores de d para interferencia destructiva

- El valor más pequeño de d_{min} para tener interferencia destructiva es

Valores de d para interferencia destructiva

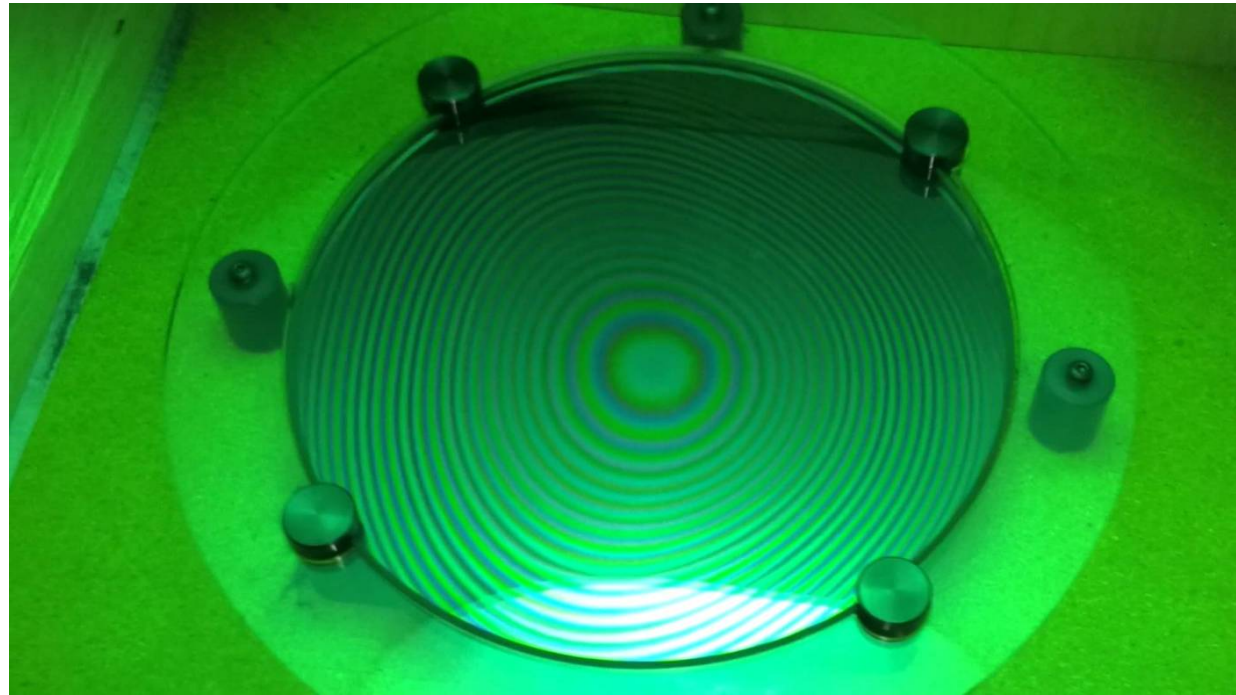
- El valor más pequeño de d_{min} para tener interferencia destructiva es

0

- Esto vale para todo λ
- Otros espesores válidos serán dependientes de λ . Para $\lambda = 400 \text{ nm}$ (azul)
 $137,9 \text{ nm}, 2 \times 137,9 \text{ nm}, 3 \times 137,9,7 \text{ nm}$ etc

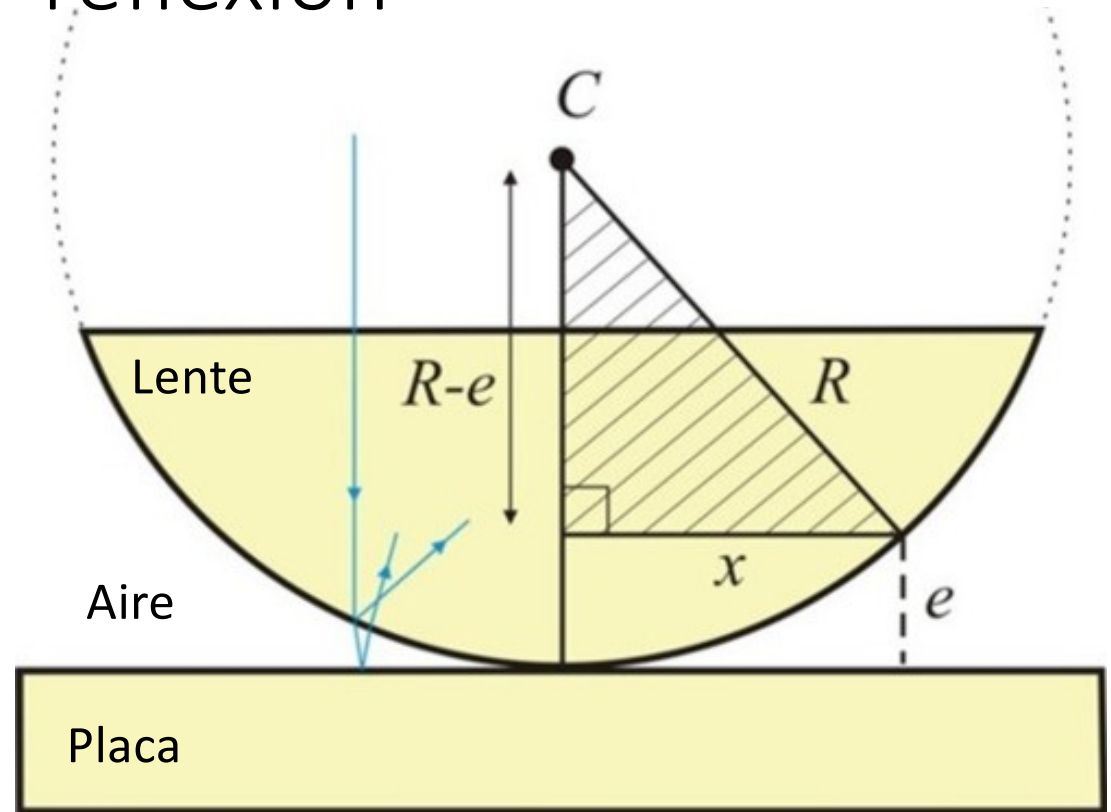
Anillos de Newton

- Patrones de interferencia generados por rayos que viajan entre dos superficies de simetría axial extremadamente próximas que se tocan en un punto central.
- Efecto investigado por Newton en 1704 en su libro *Opticks*



Anillos de Newton por reflexión

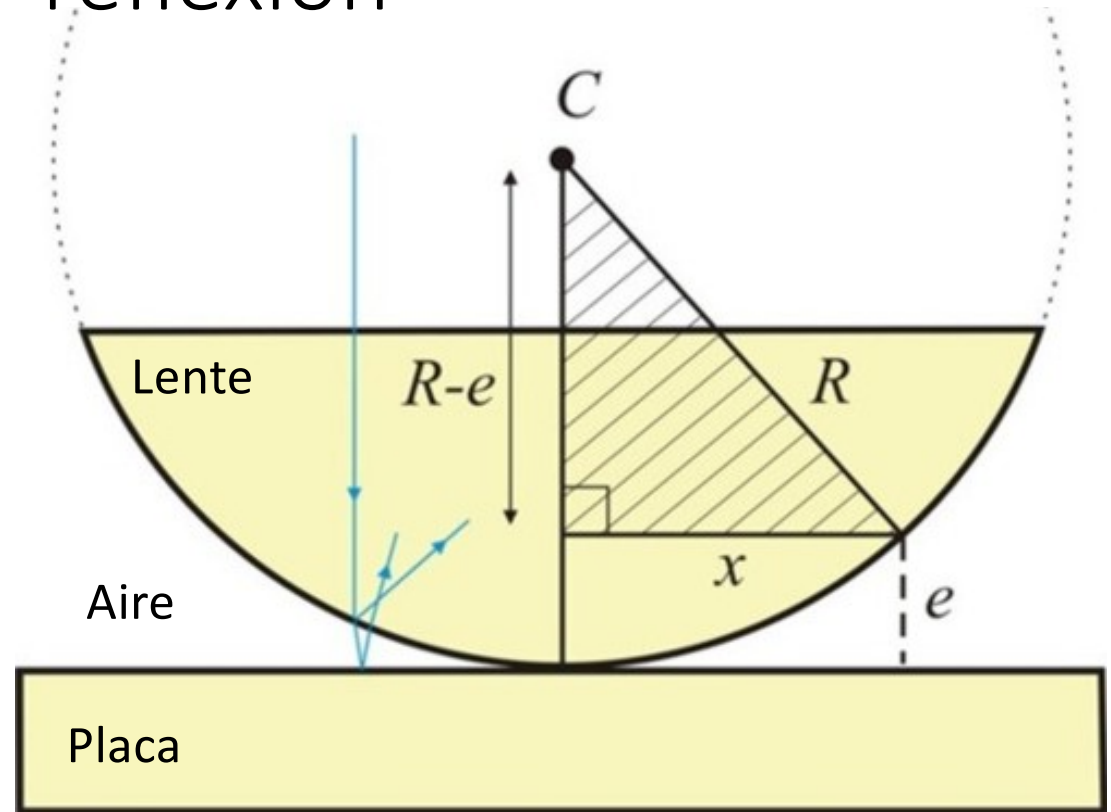
- Supongamos una lente planoconvexa de radio de curvatura R apoyada en su vértice sobre una placa de caras plano paralelas.
- Ambas piezas son de vidrio ($n = 1,5$) y el espacio entre ellas está ocupado por aire.



Anillos de Newton por reflexión

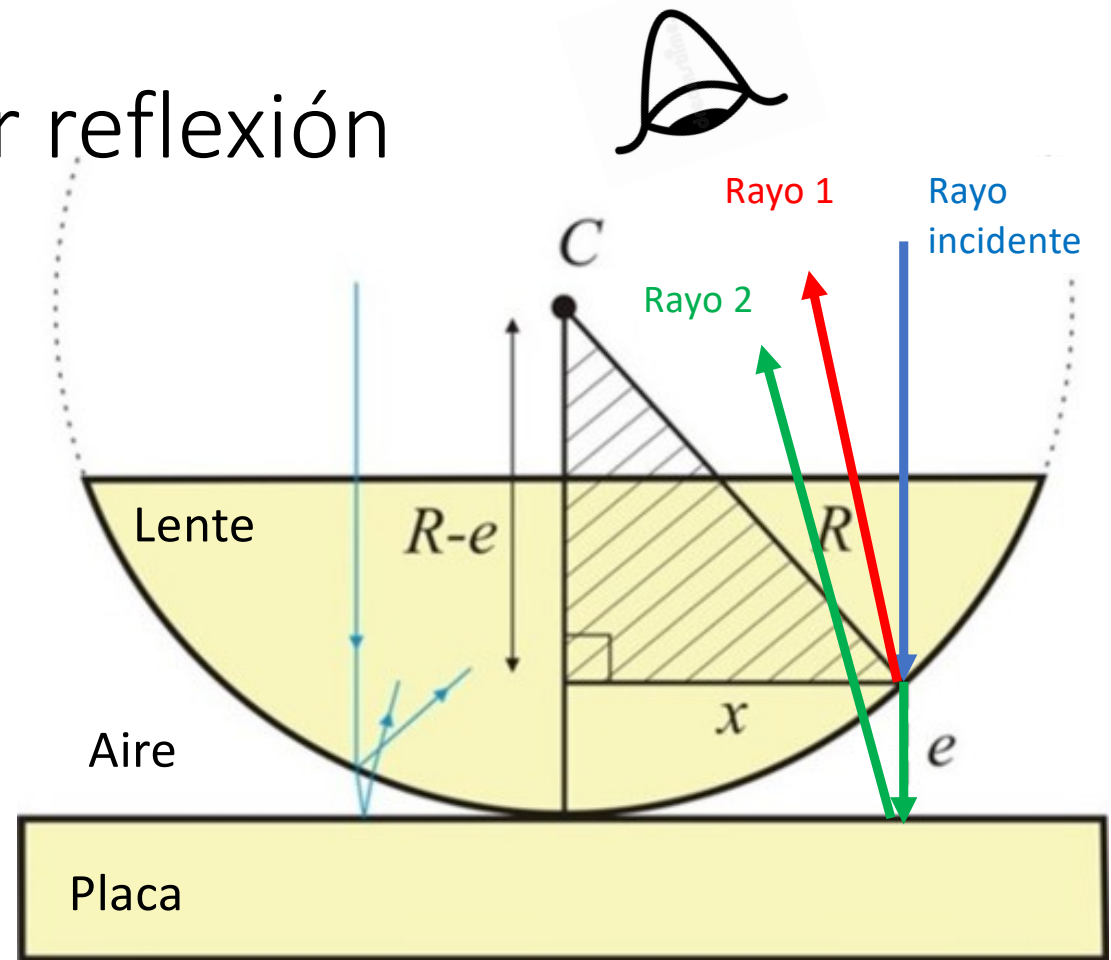
- Se hace incidir un haz de luz monocromática de manera normal a la placa.
- Se estudia la interferencia por reflexión en una región próxima al punto de contacto donde el espesor de la capa de aire

$$e \ll R$$



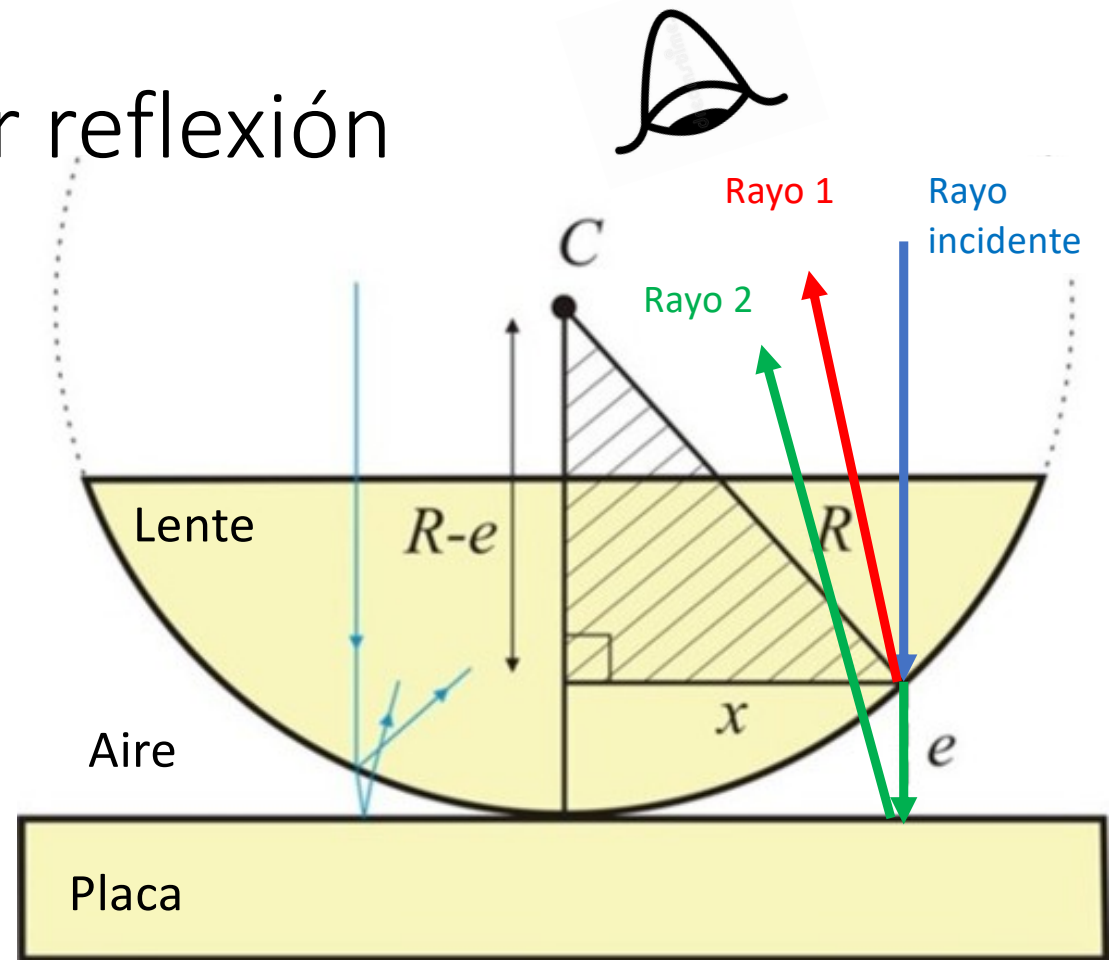
Anillos de Newton por reflexión

- En virtud de la aproximación anterior, la incidencia de todos los rayos del experimento pueden asumirse normal a las interfaces.
- El rayo 1 surge de la reflexión en la interfase lente/aire
- El rayo 2 es producto de la refracción en la interfase lente/aire, reflexión en la interfase aire/placa y refracción en la interfase lente/aire



Anillos de Newton por reflexión

- Expresemos la distancia e en términos del radio x en la aproximación $e \ll R$.
- Apliquemos Pitágoras al triángulo rectángulo sombreado:
$$R^2 = x^2 + (R - e)^2$$
$$R^2 = x^2 + R^2 - 2Re + e^2$$
- Consideramos que el término e^2 es muy pequeño en comparación a los otros



Anillos de Newton por reflexión

- Entonces

$$R^2 \cong x^2 + R^2 - 2Re$$

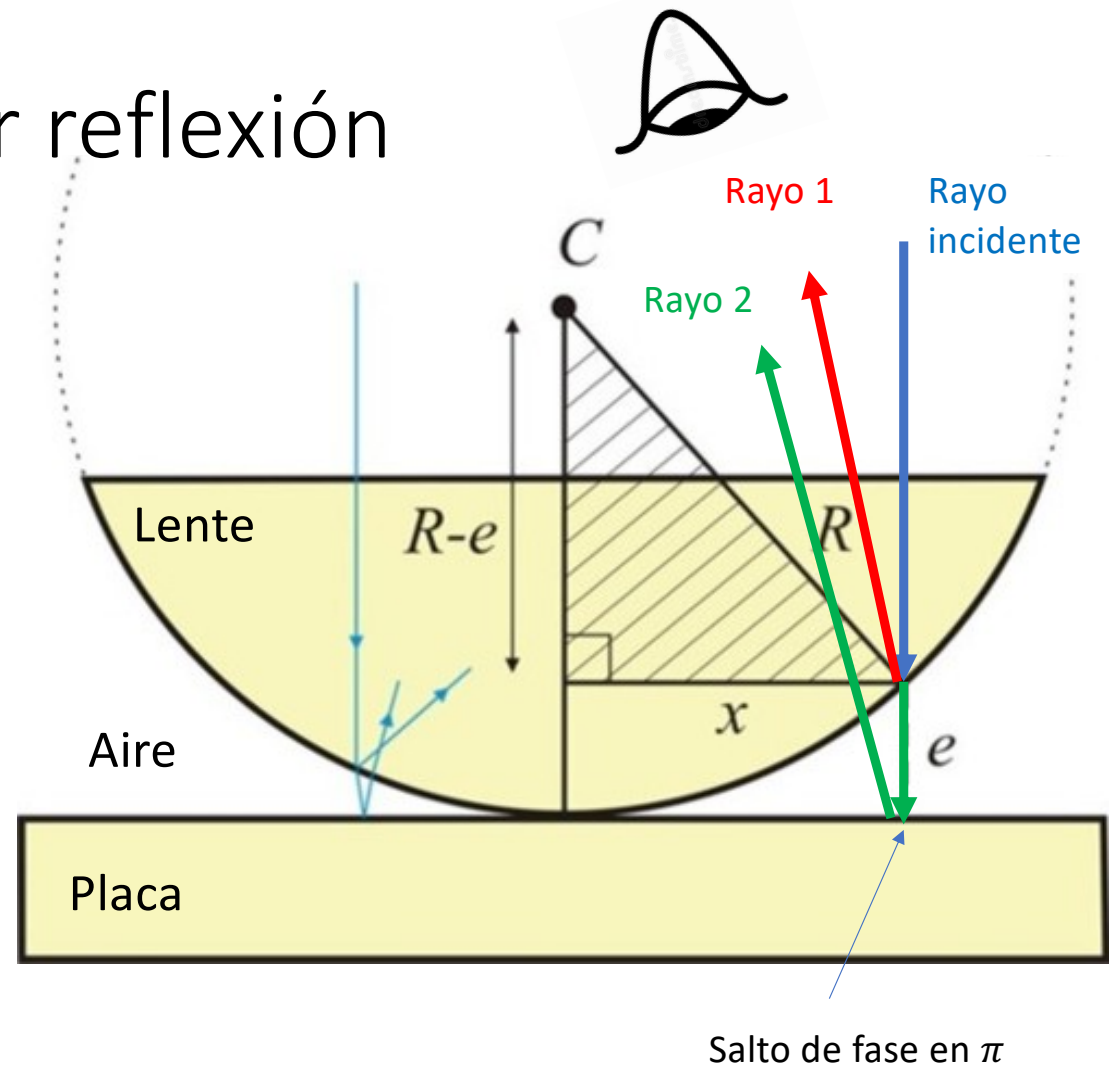
$$2Re \cong x^2$$

$$e \cong \frac{x^2}{2R}$$

- La diferencia de fase entre el rayo 1 y el 2 es:

$$\delta = 2ke + \pi$$

$$\delta = k \frac{x^2}{R} + \pi$$



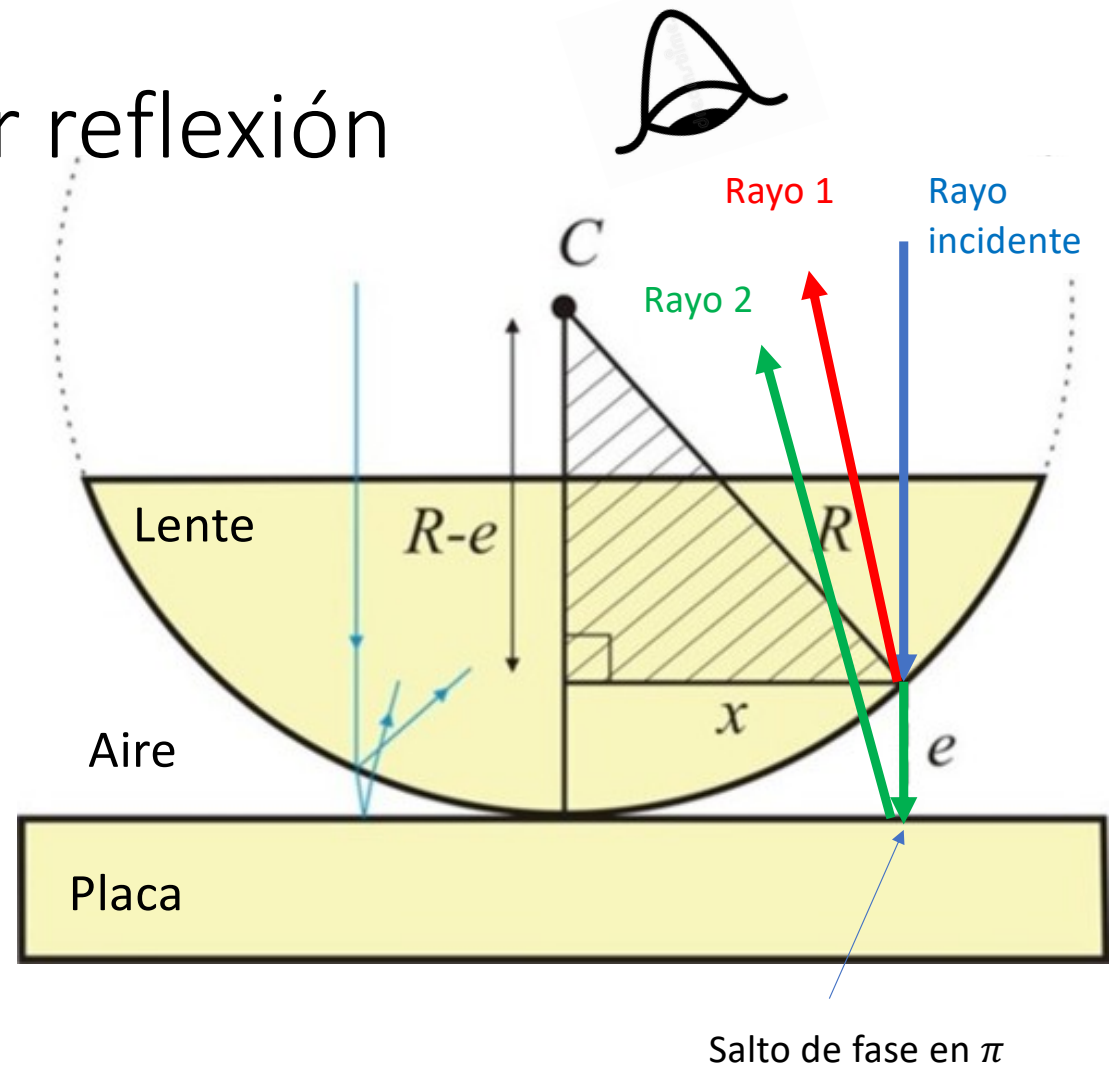
Anillos de Newton por reflexión

- Los rayos interferirán constructivamente cuando:

$$\delta_{max} = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$$

- Esto implica determinados valores de x_{max} tales que:

$$k \frac{x_{max}^2}{R} + \pi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$$

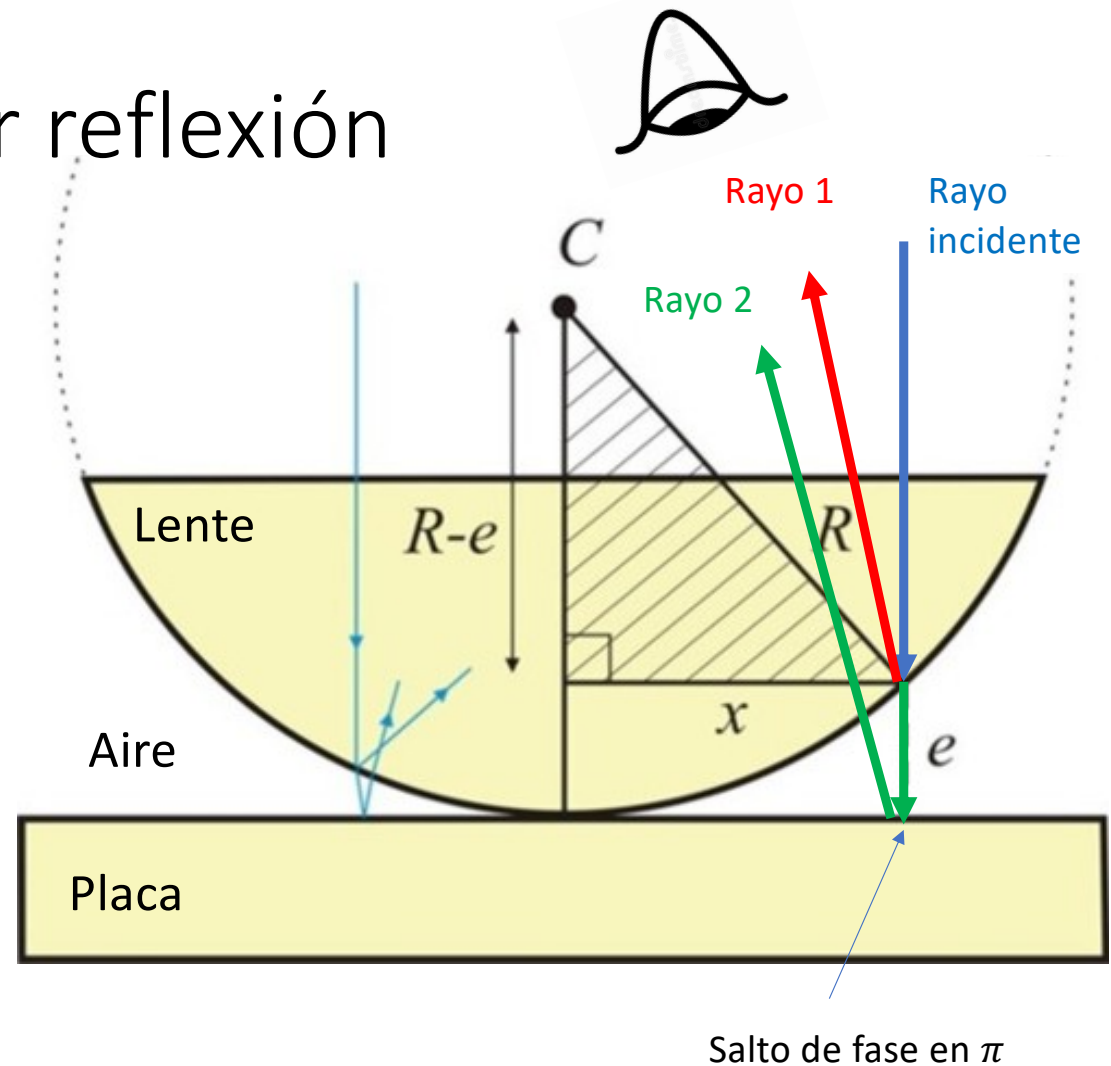


Anillos de Newton por reflexión

- Estos valores corresponden a ANILLOS brillantes del color de λ .
- Como x_{max} es real nos quedamos con los valores de δ_{max} que cumplen con ese requerimiento.

$$\frac{2\pi x_{max}^2}{\lambda R} = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$$

$$x_{max}^2 = \frac{\lambda R}{2} \times (1, 3, 5 \dots)$$



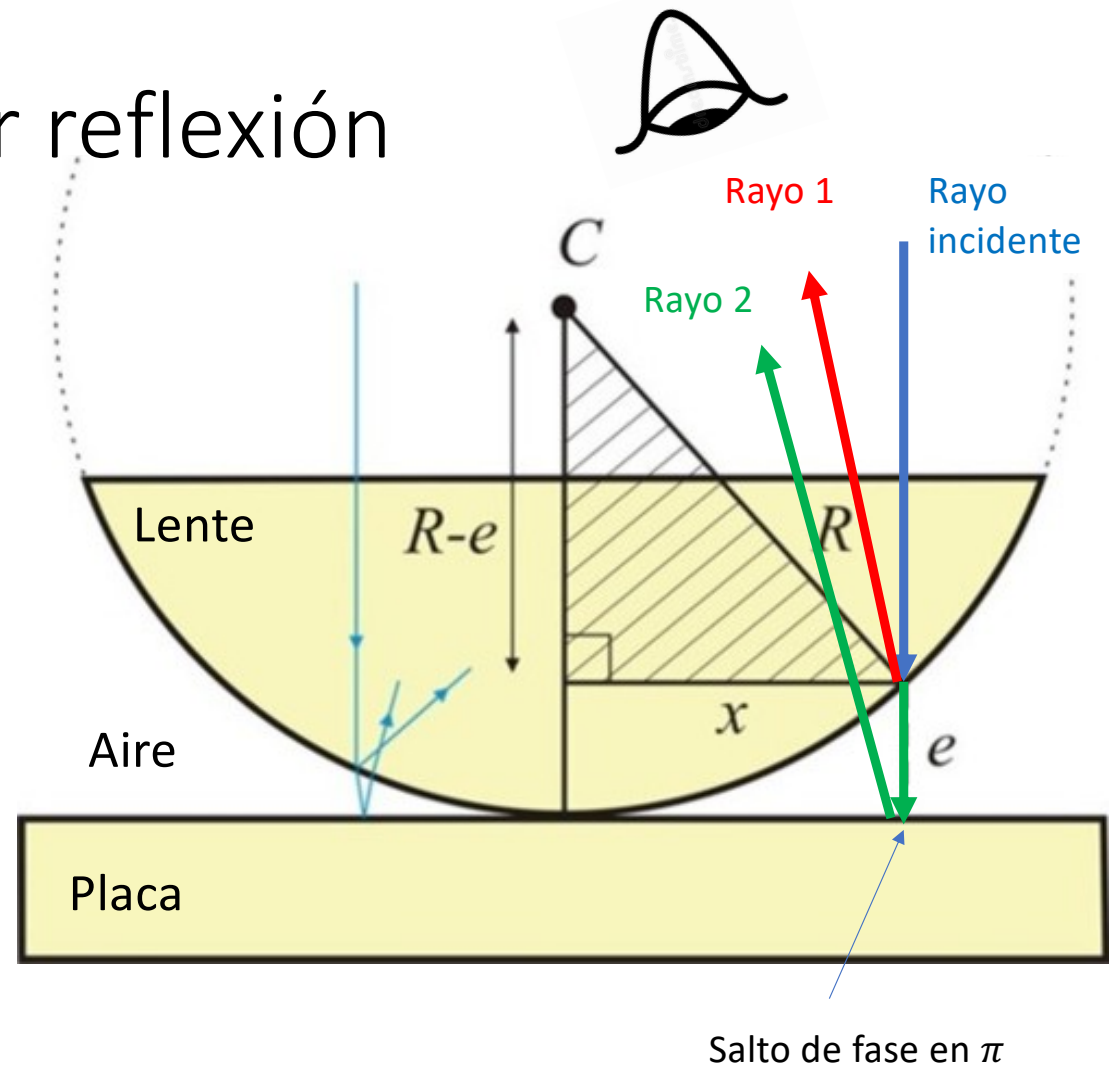
Anillos de Newton por reflexión

- Los rayos interferirán destructivamente cuando:

$$\delta_{min} = \pm\pi, \pm3\pi, \dots$$

- Esto implica determinados valores de x_{min} tales que:

$$k \frac{x_{min}^2}{R} + \pi = \pm\pi, \pm3\pi, \dots$$

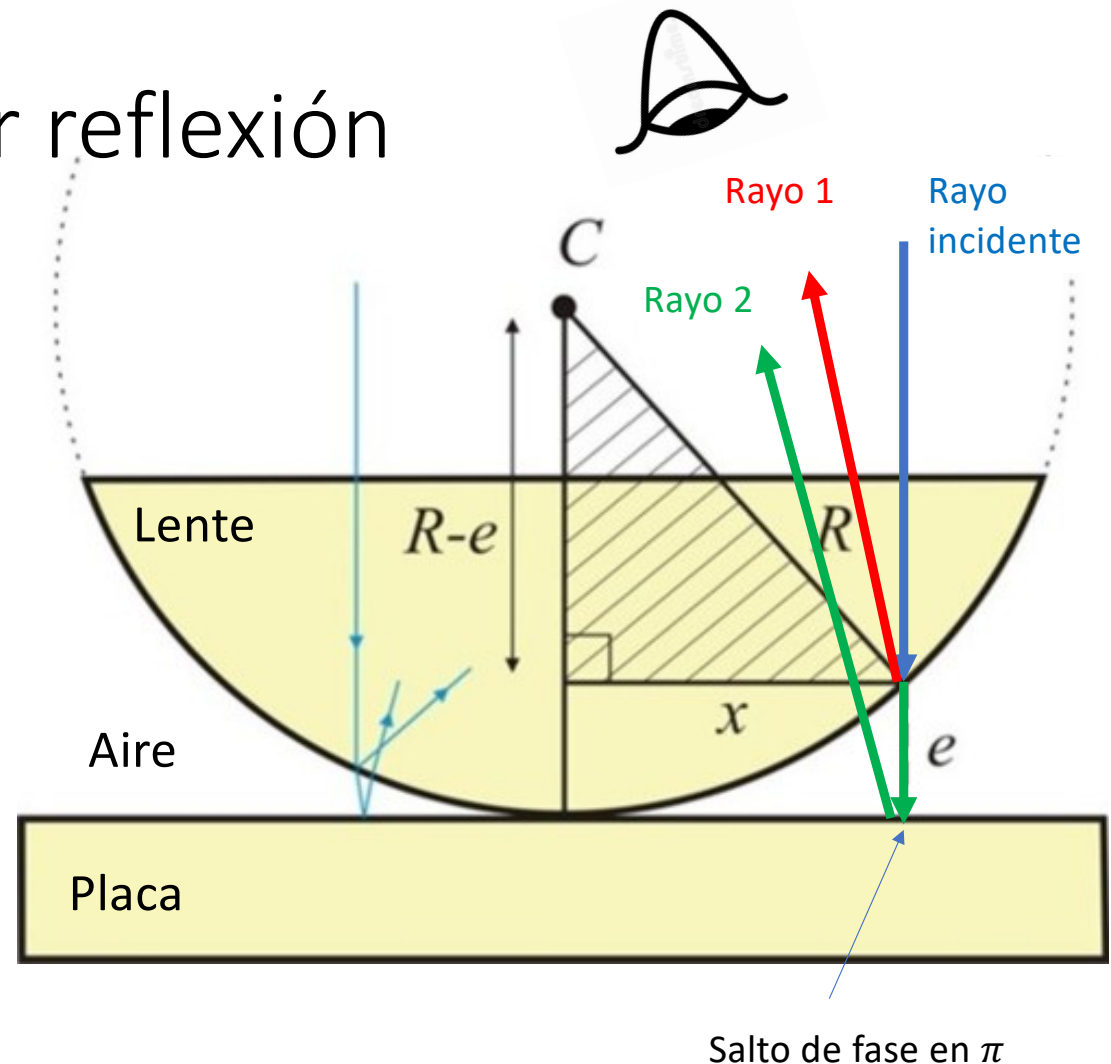


Anillos de Newton por reflexión

- Estos valores corresponden a ANILLOS oscuros.
- Como x_{min} es real nos quedamos con los valores de δ_{min} que cumplen con ese requerimiento.

$$\frac{2\pi x_{min}^2}{\lambda R} = 0, 2\pi, 4\pi \dots$$

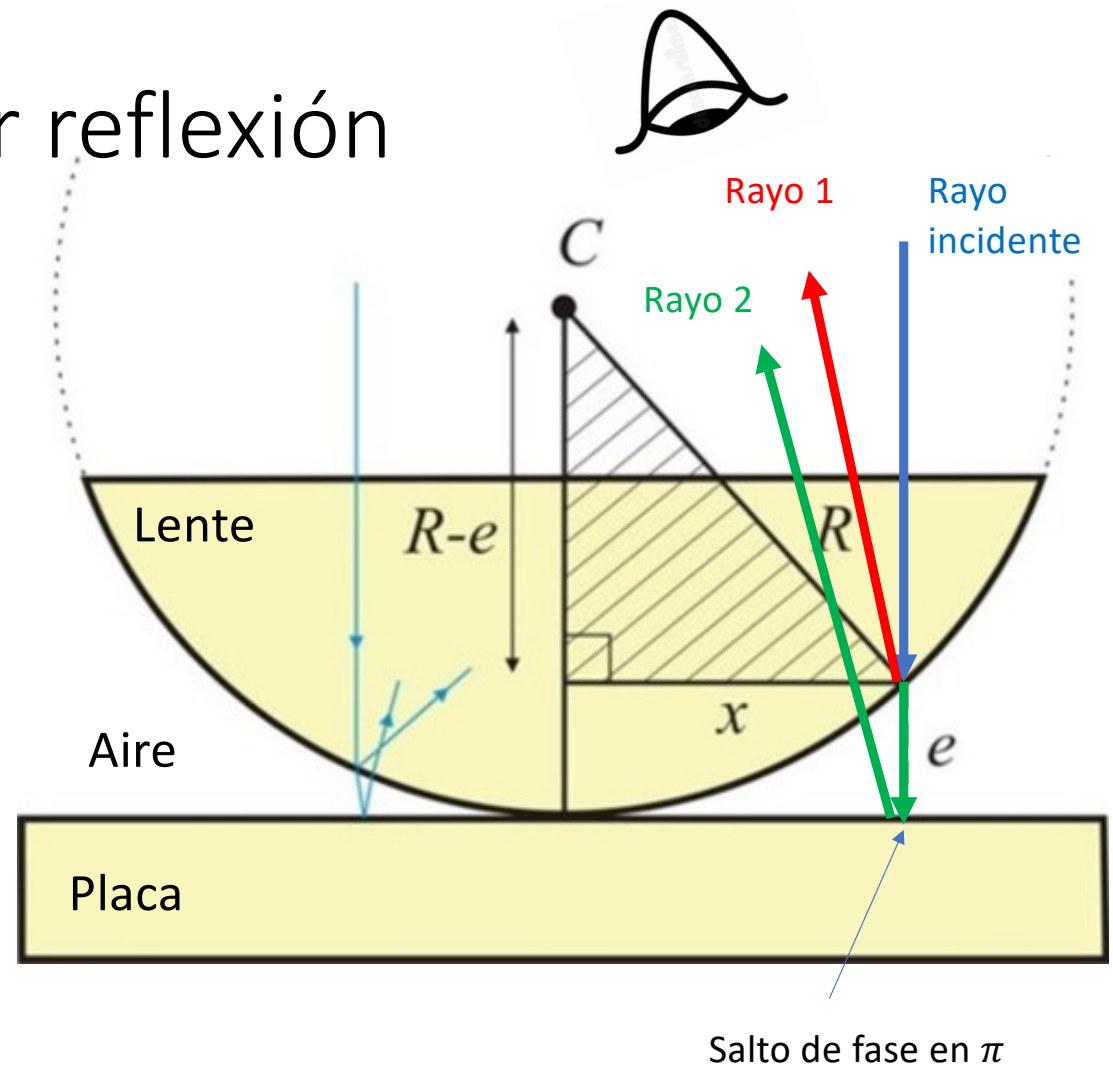
- En el punto de contacto hay un mínimo !



Anillos de Newton por reflexión

- Los mínimos ocurrirán para los radios.

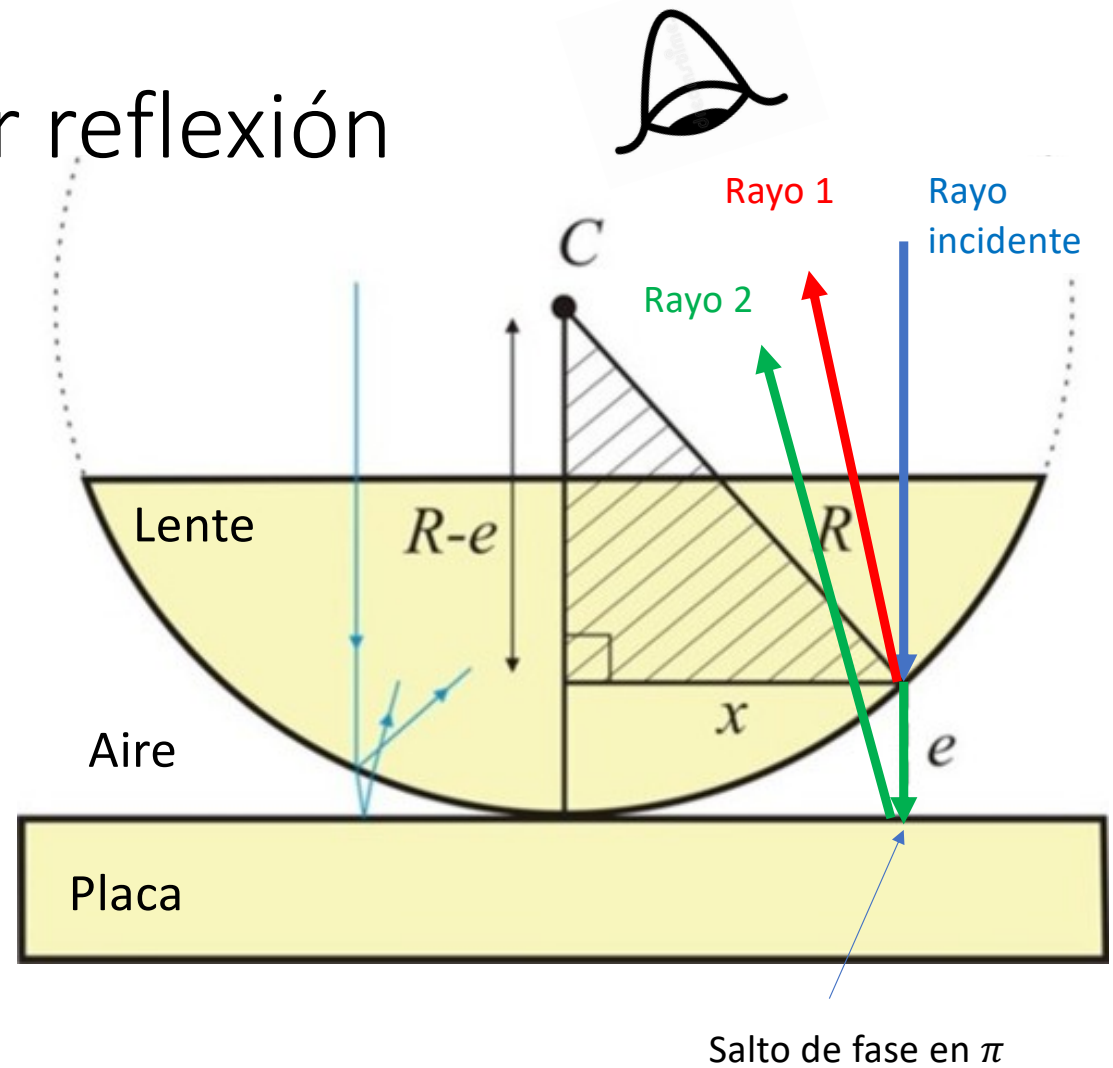
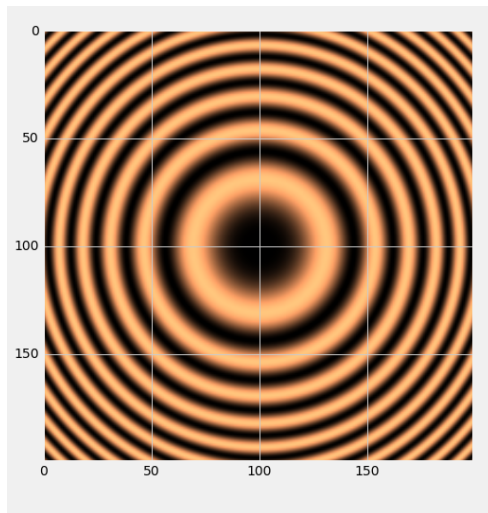
$$x_{min}^2 = 0, \lambda R, 2\lambda R, 3\lambda R \dots$$



Anillos de Newton por reflexión

- Los mínimos ocurrirán para los radios.

$$x_{min}^2 = 0, \lambda R, 2\lambda R, 3\lambda R \dots$$



Anillos de Newton por transmisión

- ¿Qué tipo de patrón espera ver una persona que mira desde abajo?

