Coherencia e incoherencia

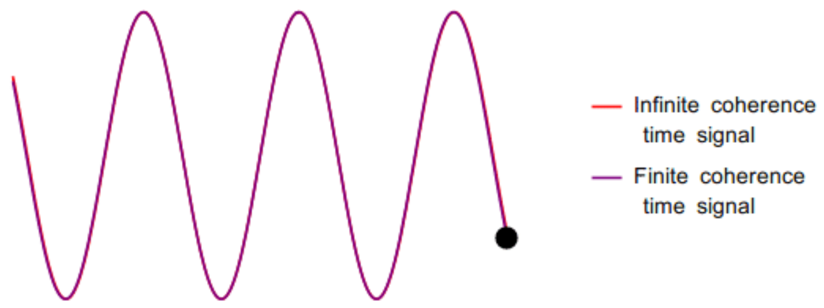
- La **coherencia** es una propiedad sobre la **fase** de una onda.

Dos ondas son coherentes si la diferencia de fase entre ellas se mantiene constante

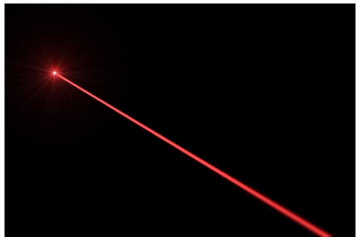
- Llamamos **incoherencia** a la **ausencia de coherencia**.

Coherencia e incoherencia temporal

- Para fuentes puntuales, la pérdida de coherencia temporal ocurre cuando la diferencia de fase entre ondas es variable.

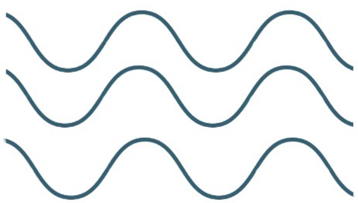


- Ejemplos:
    - **Incoherente**: En la luz solar o artificial común, los trenes emitidos mantienen su fase por alrededor de 10 períodos, y luego cambian aleatoriamente.
    - **Coherente**: Los lasers son fuentes de ondas con tiempo de coherencia más largos.

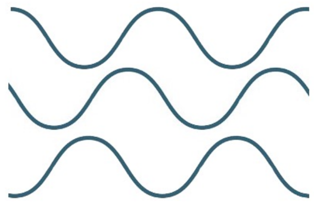


Coherencia e incoherencia espacial

- Coherencia espacial: cuando la fuente no es puntual sino extendida, es la propiedad de que todas las fuentes que la componen emitan con la misma fase inicial.



Fuentes coherentes



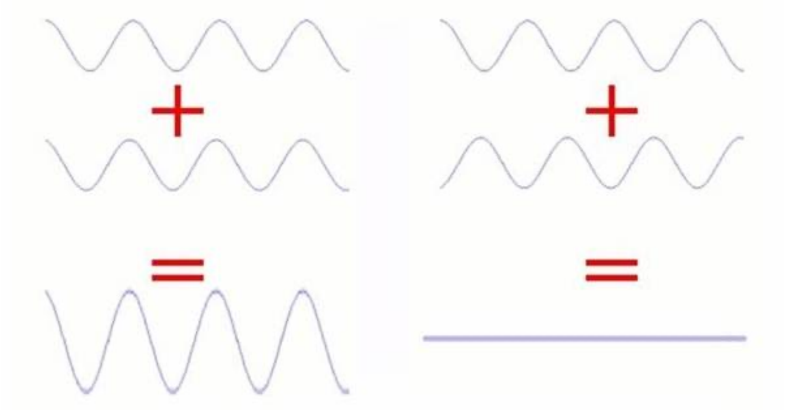
Fuentes incoherentes

- Un ejemplo de incoherencia espacial es nuevamente el Sol. Cada punto de su superficie emite con una fase aleatoriamente distinta.

Interferencia

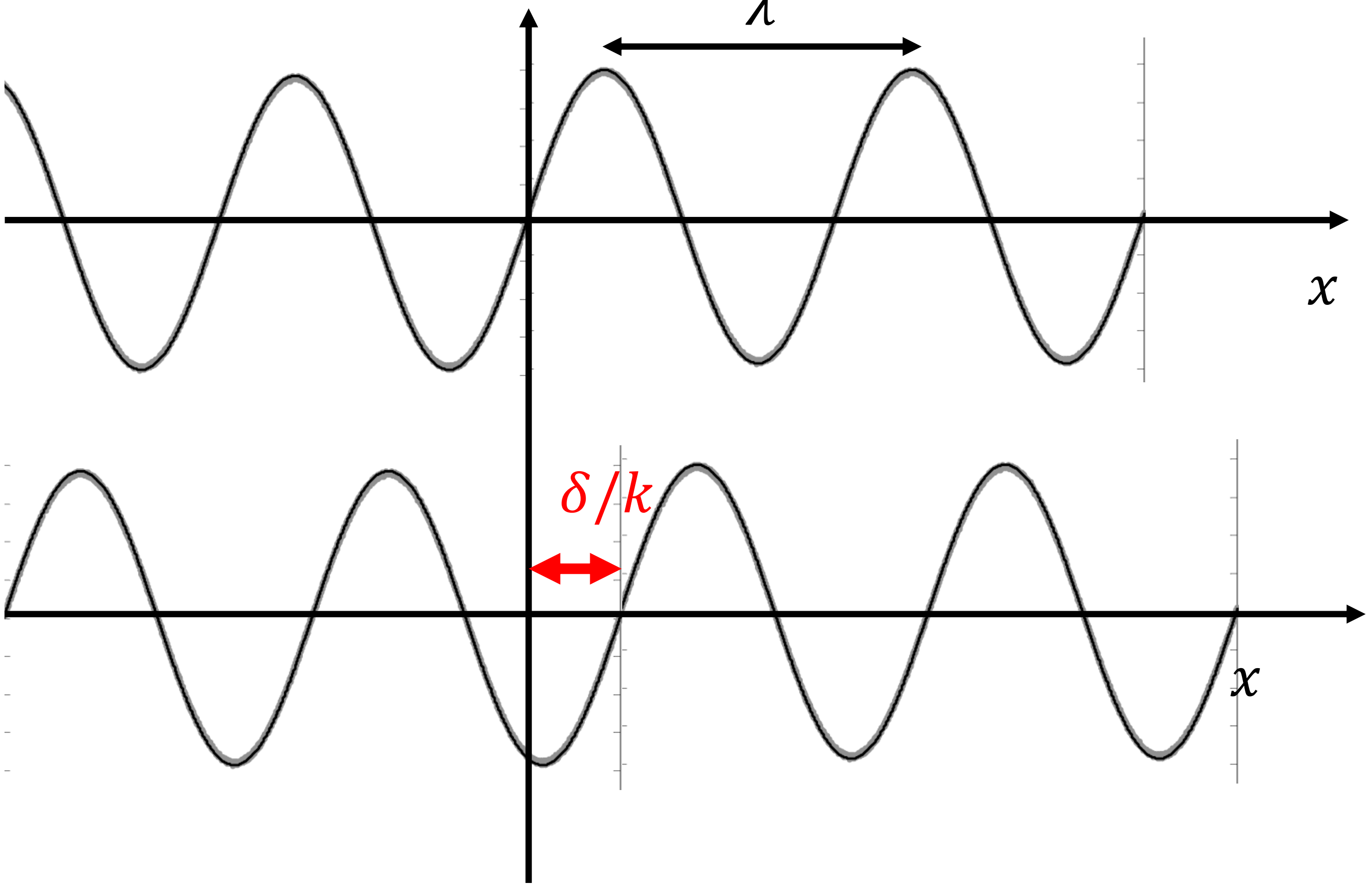
La interferencia

- La **coherencia** entre dos ondas permite fenómenos como la **interferencia**.
- La **suma** de dos ondas de igual longitud de onda y coherentes da lugar a **resultados diferentes** dependiendo de la **diferencia de fase**. Entre ellos:



Interferencia constructiva | Interferencia destructiva

Suma de ondas de igual longitud de onda λ

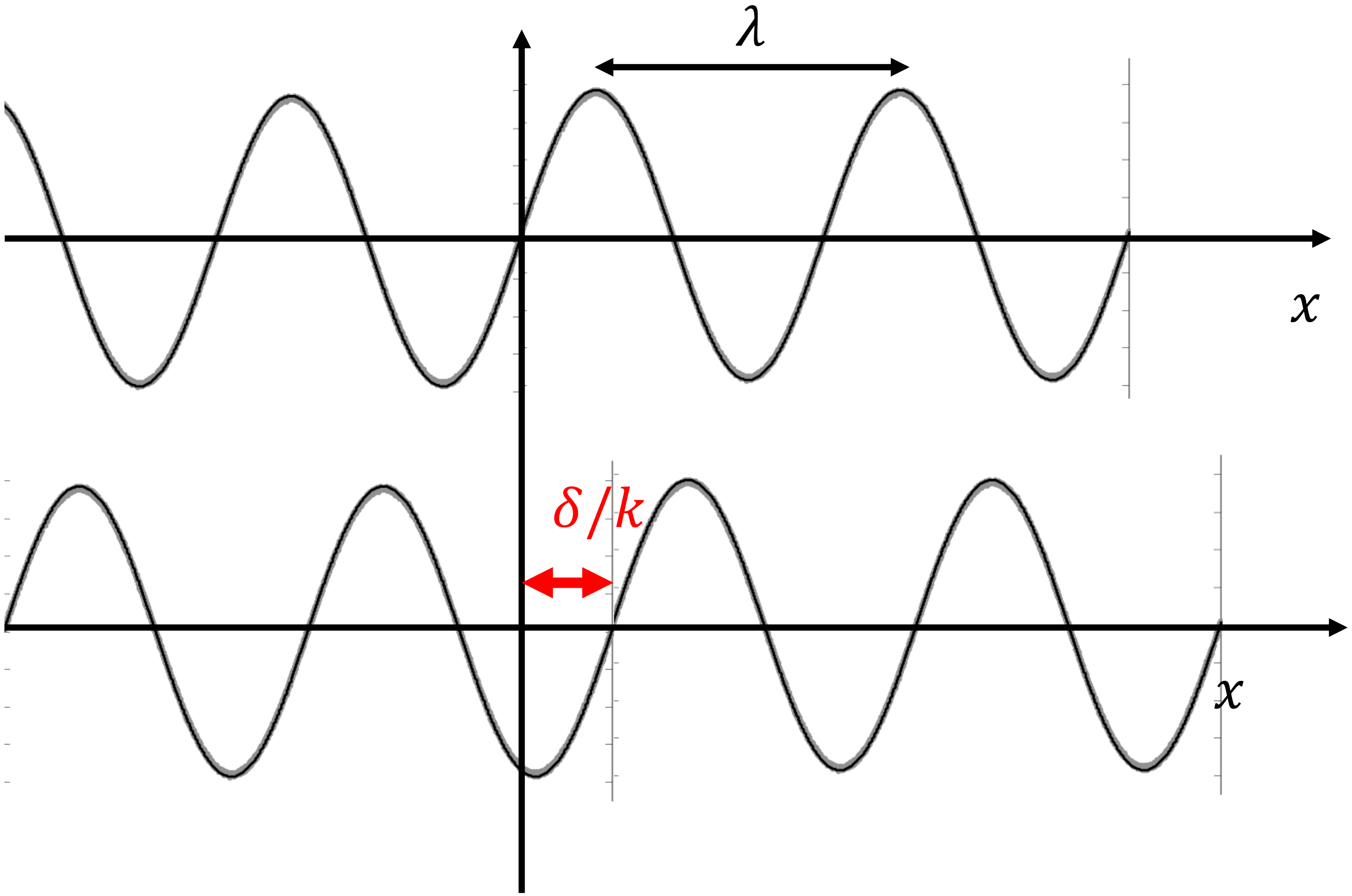


$A\sin(kx-\omega t)$

$+$

$A\sin(kx-\omega t-\delta)$

Suma de ondas de igual longitud de onda λ

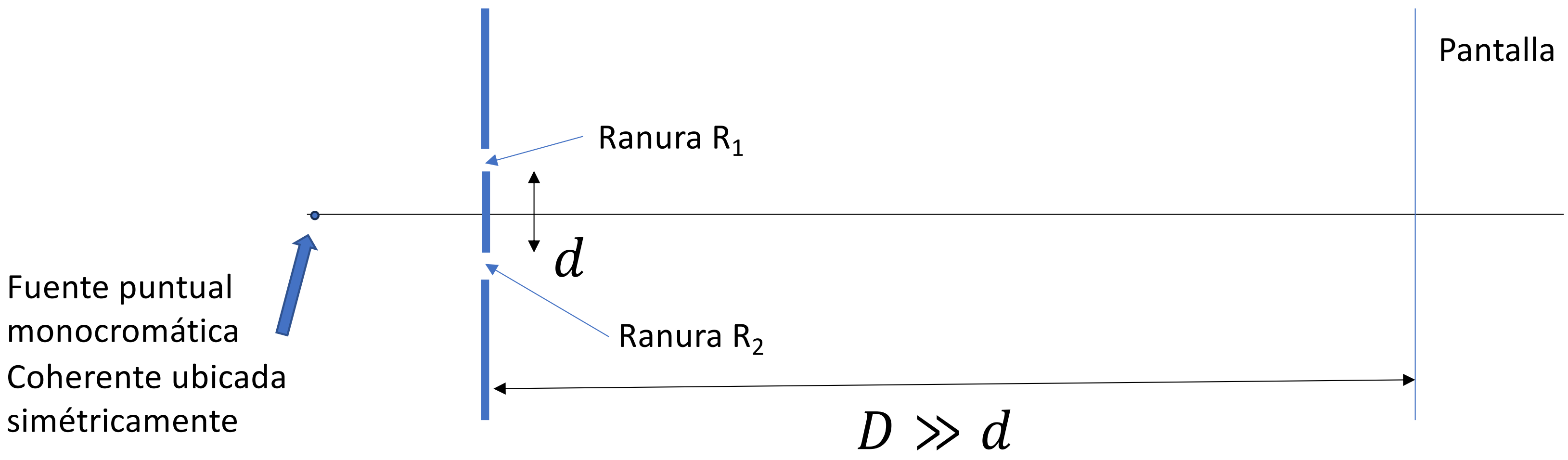


- Si δ es 0 ó **múltiplos pares de π**, la diferencia en distancia son múltiplos de λ y tenemos **interferencia constructiva.**
- Si δ son **múltiplos impares de π** la diferencia en distancia son múltiplos impares de $\lambda/2$ y tenemos **interferencia destructiva.**

Experimento de Young

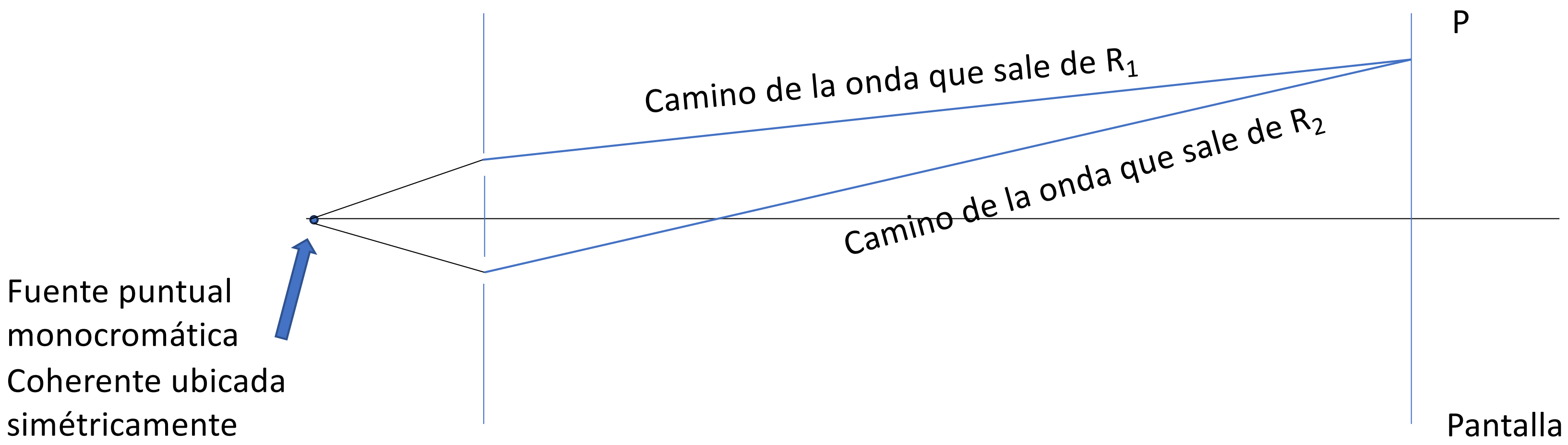
Experimento de Young (1801)

- Fuente de luz monocromática y coherente, 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, muy lejos, hay una pantalla donde vemos el efecto.
- Pantalla con ranura, y pantalla donde vemos el efecto son $\perp$ al eje de simetría.



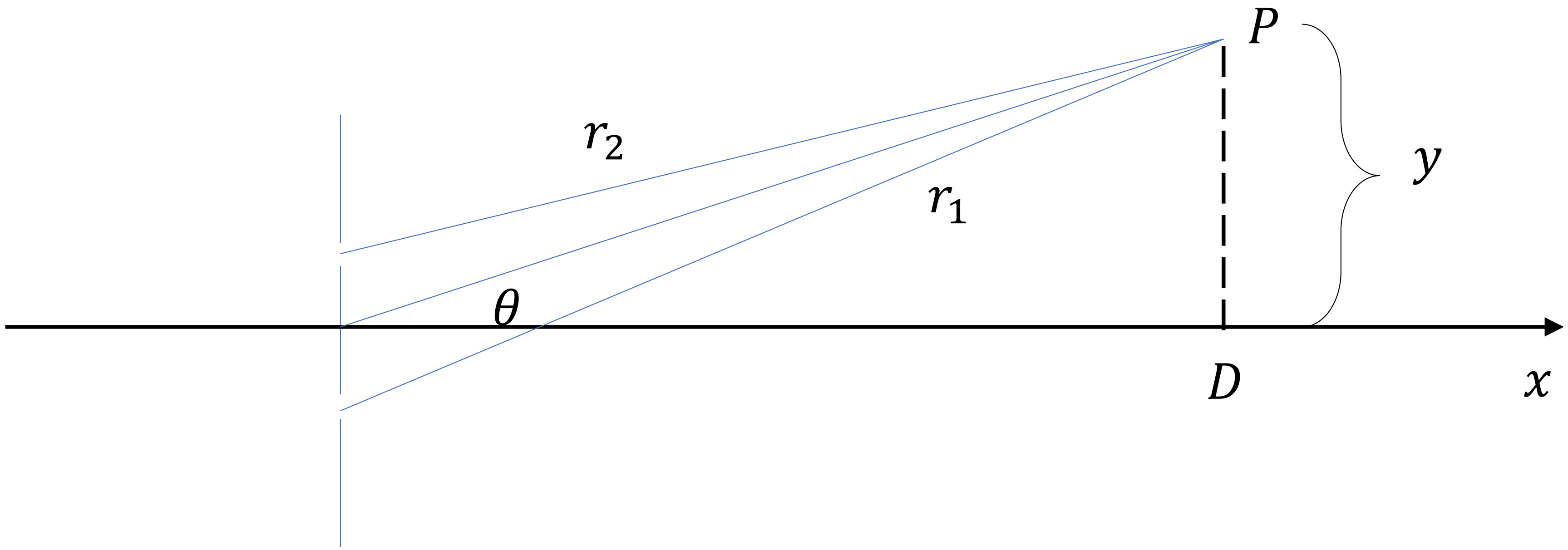
Experimento de Young (1801)

- 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.
- Por simetría, el camino entre la fuente y las dos ranuras son iguales.



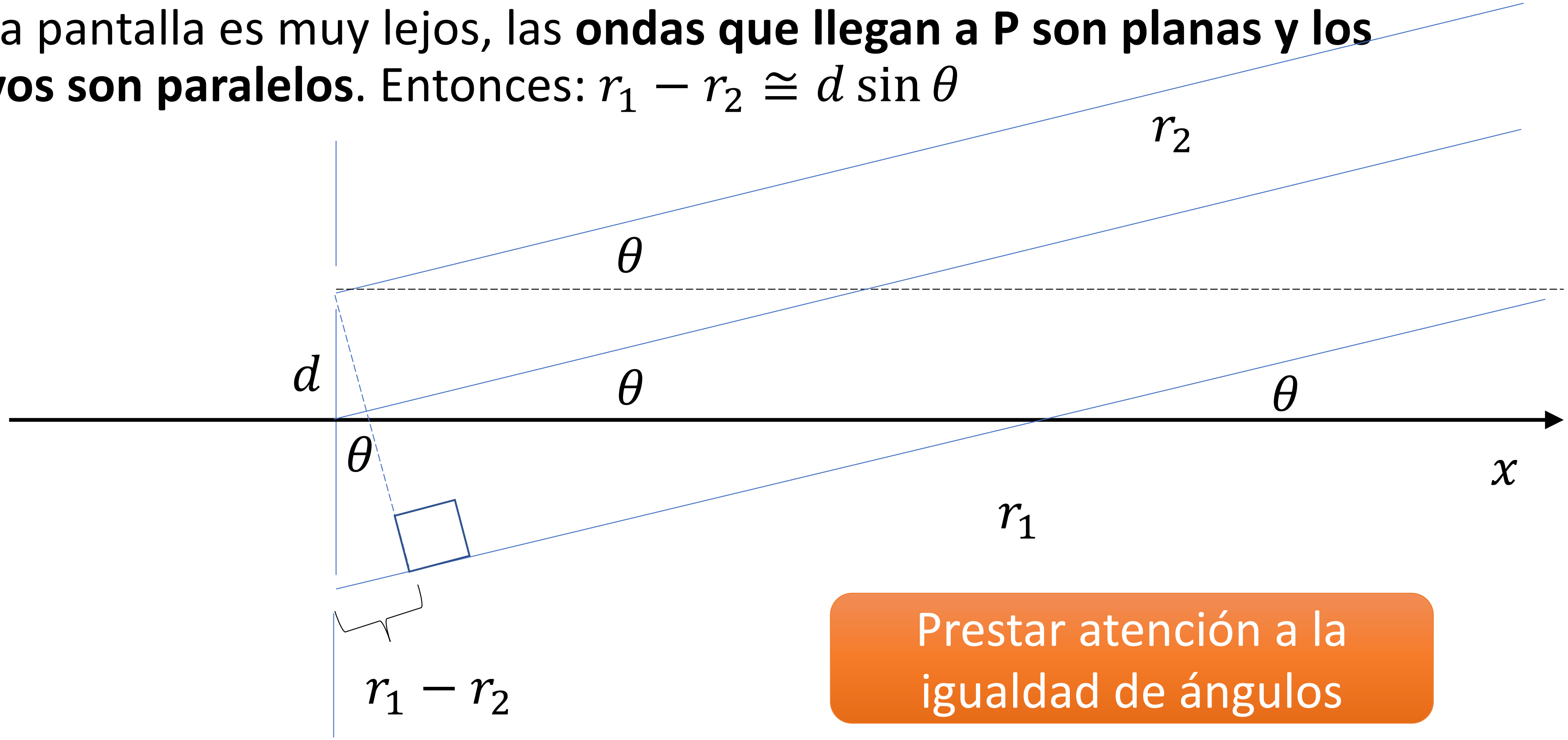
Diferencia de camino entre ondas

- La diferencia de camino entre las dos ondas es $r_1 - r_2$. Al llegar a P al mismo tiempo tienen una diferencia de fase $k(r_1 - r_2)$



Diferencia de camino entre ondas

- Si la pantalla es muy lejos, las **ondas que llegan a P son planas y los rayos son paralelos**. Entonces: $r_1 - r_2 \cong d \sin\theta$

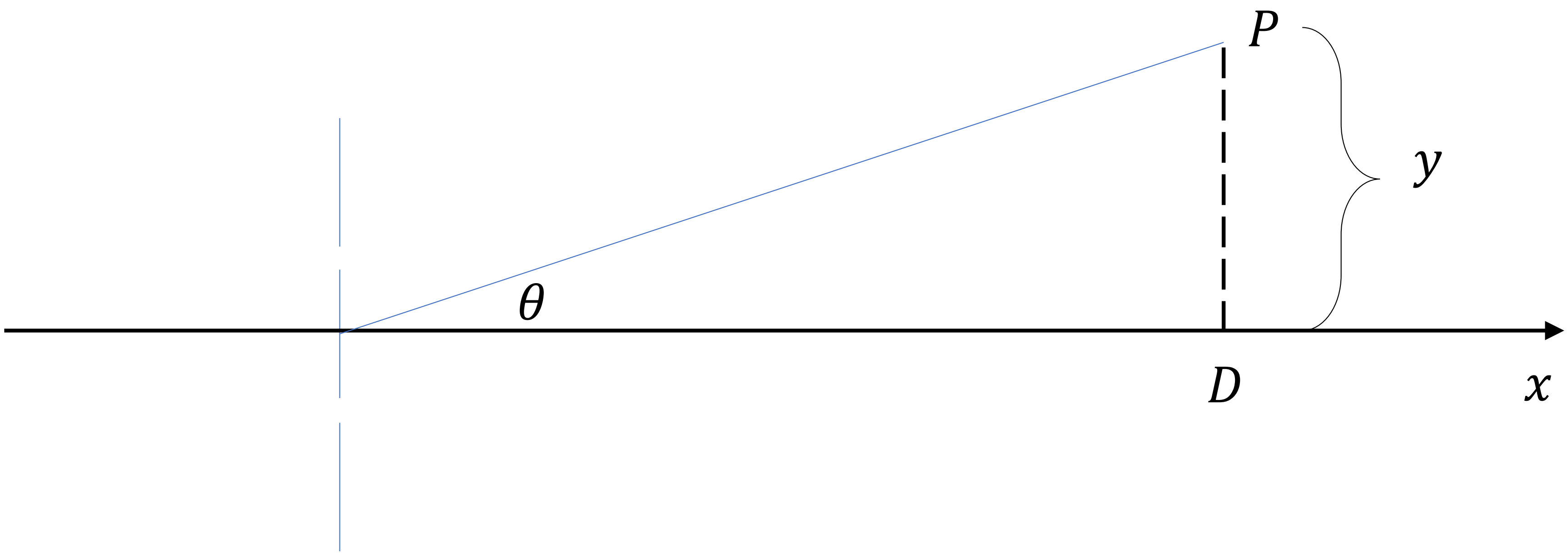


Prestar atención a la igualdad de ángulos

Diferencia de camino entre ondas

- Si la pantalla es muy lejos y ángulos θ pequeños:

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



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 que al llegar a la pantalla a un determinado instante va a haber 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:

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

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

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

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

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

Interferencia destructiva

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

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

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

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

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

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

Irradiancia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Irradiancia

- Tenemos entonces

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

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

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

Irradiancia

- Olvidándonos de las constantes multiplicativas vemos que si llamamos

$$I_1 = \left\langle \left|\overrightarrow{E_1}\right|^2 \right\rangle \quad \text{e} \qquad I_2 = \left\langle \left|\overrightarrow{E_2}\right|^2 \right\rangle \qquad \text{e} \qquad I_{12} = 2\langle \overrightarrow{E_1} \cdot \overrightarrow{E_2} \rangle$$

- Entonces

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

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

Irradiancia

- Para calcular el término de interferencia primero debemos escribir

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

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

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

$$\vec{\mathbf{E}}_{01} \cdot \vec{\mathbf{E}}_{02} [\cos(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_1) \cos \omega t + \sin(\vec{\mathbf{k}}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_1) \sin \omega t]$$

$$\times [\cos(\vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_2) \cos \omega t + \sin(\vec{\mathbf{k}}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}} + \varepsilon_2) \sin \omega t]$$

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 ½, con lo cual:

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

- 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

$$\overrightarrow{E_{01}} = \overrightarrow{E_{02}} = \overrightarrow{E_0}$$

- 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

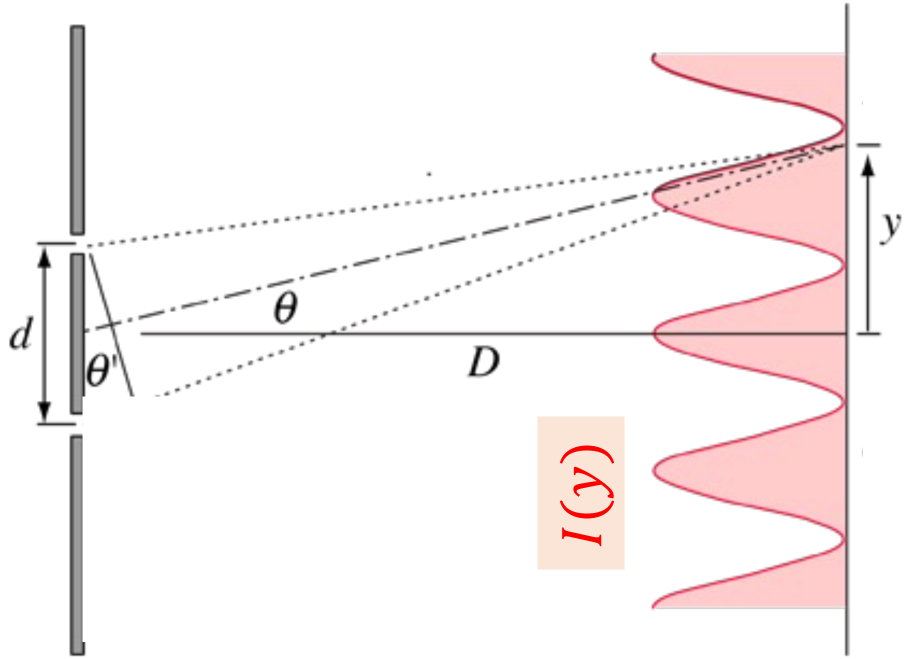
- En Young, no hay diferencia de fase inicial entre las ondas y $\vec{k} = \vec{k}_1 = \vec{k}_2$ por lo que la diferencia de fase ocurre por la diferencia de distancia $r_1 - r_2$
- Entonces para $\delta_{max} = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \ldots$

$$I_{max} = 4I_0$$

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

$$I_{min} = 0$$

Patrón de interferencia de Young (dos rendijas)

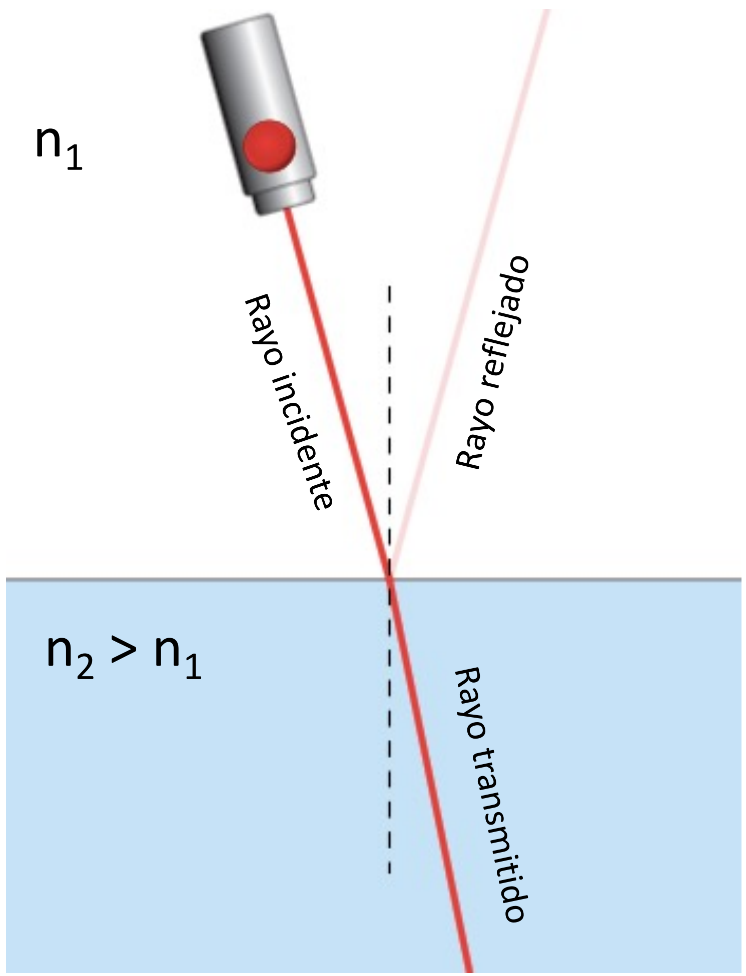


$$I(\theta) = I(y) = 4I_0\left[\cos\left(\frac{kd}{2}\theta\right)\right]^2 = 4I_0\left[\cos\left(\frac{kd}{2D}y\right)\right]^2$$

Interferencia por reflexión/refracción

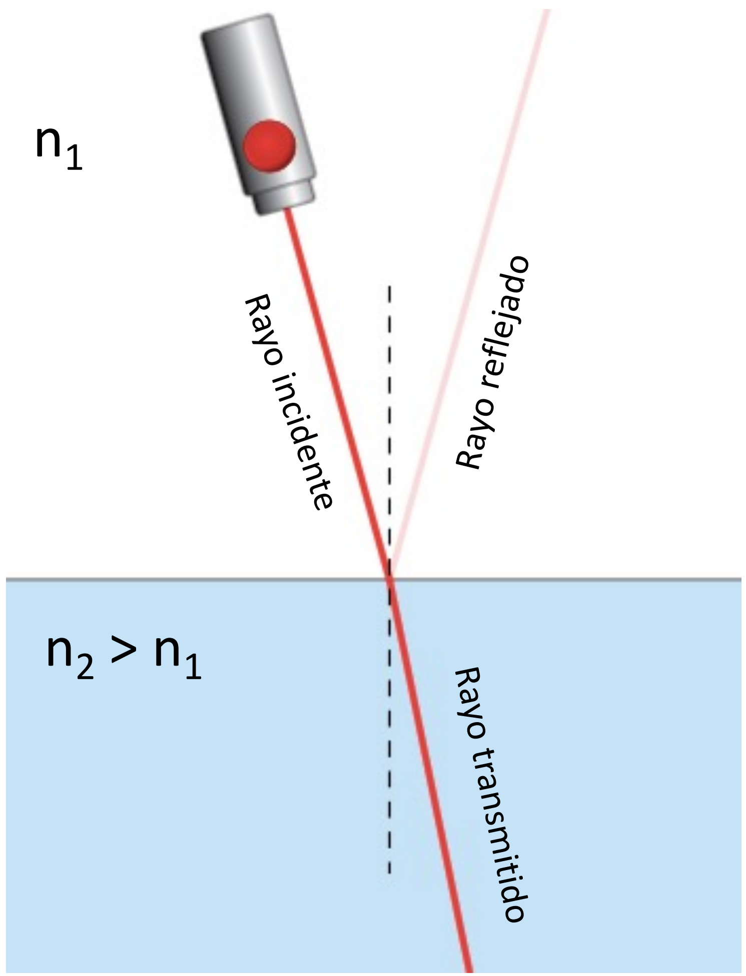
Reflexión, refracción y fase

- 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.



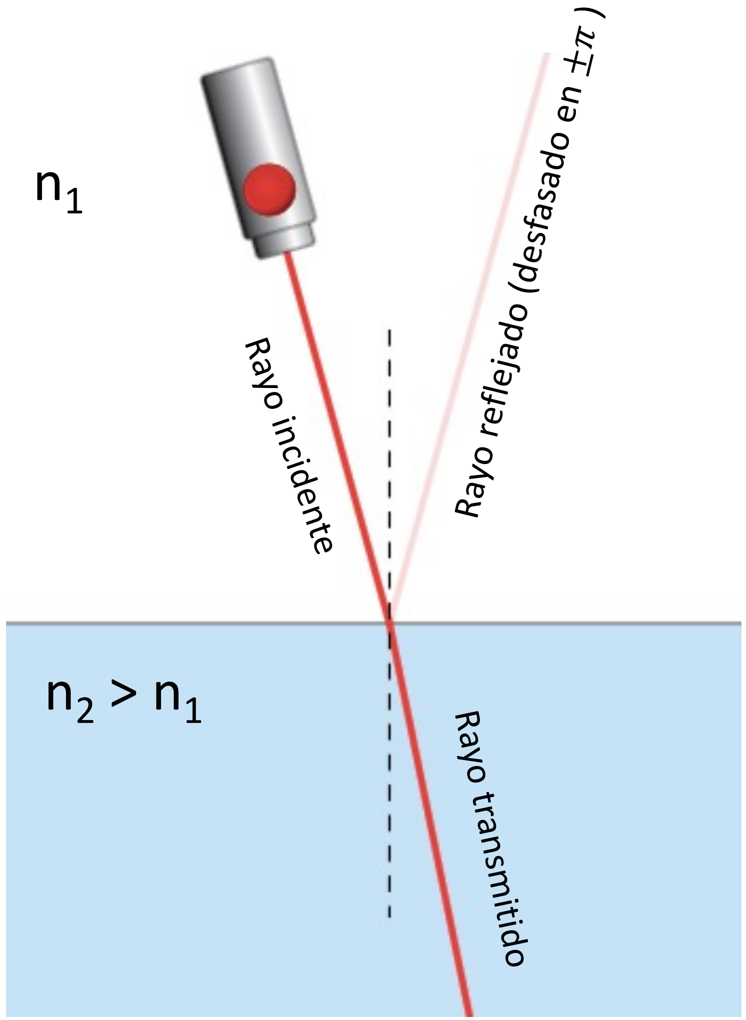
Reflexión, refracción y fase

- 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 $n_2 > n_1$.



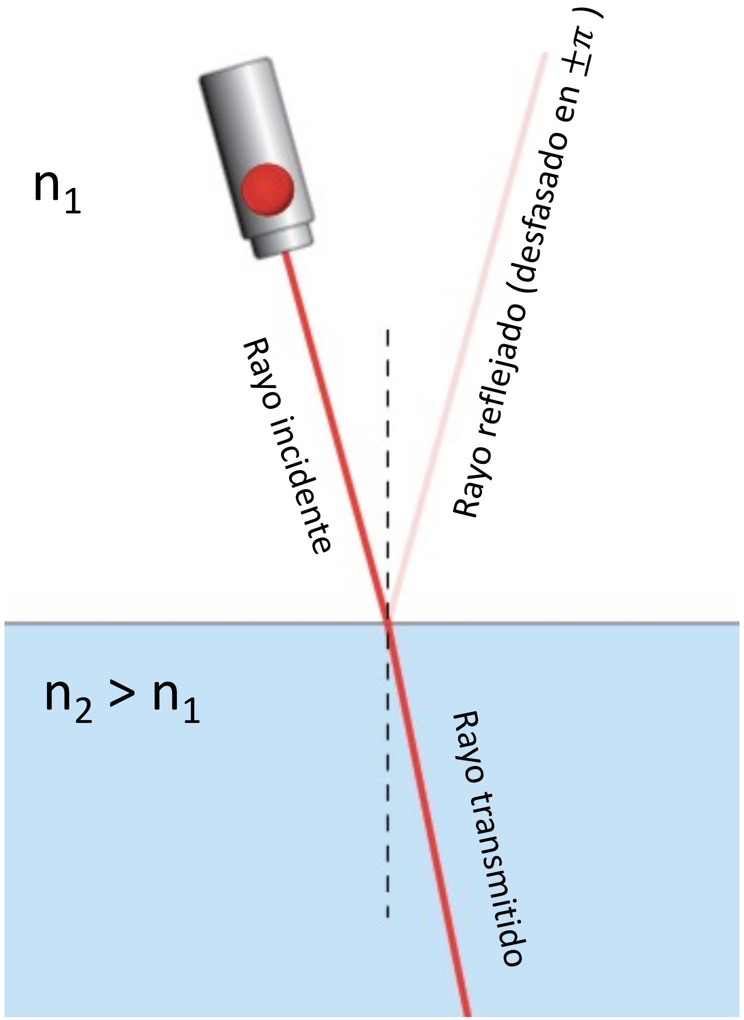
Reflexión, refracción y fase

- 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 $n_2 < n_1$.

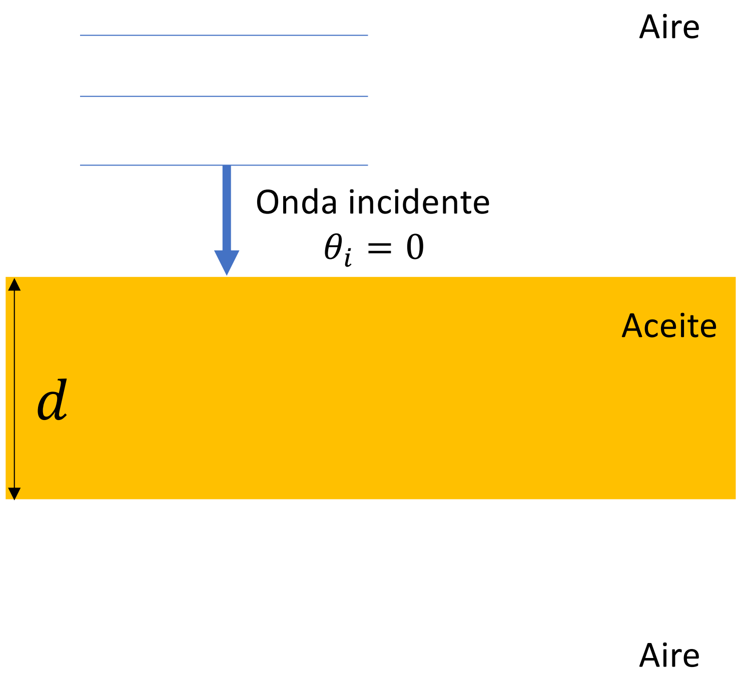


Interferencia de láminas delgadas

- Imaginemos una lámina fina de aceite ($n = 1{,}45$) rodeada de aire.

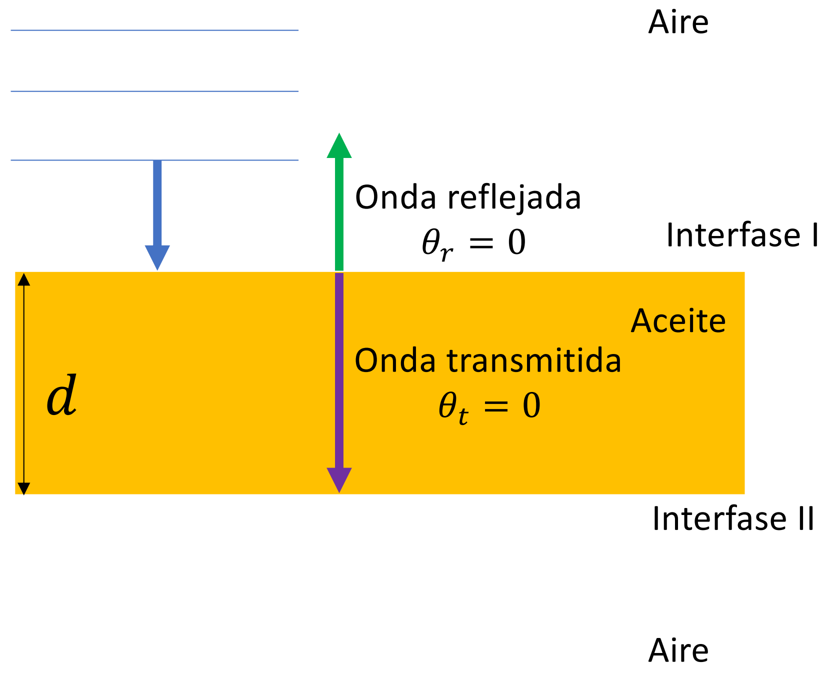
- La lámina es delgada (la onda no debe perder coherencia) de espesor d.

- Una onda plana, coherente, de longitud de onda λ incide **normalmente** desde el aire.



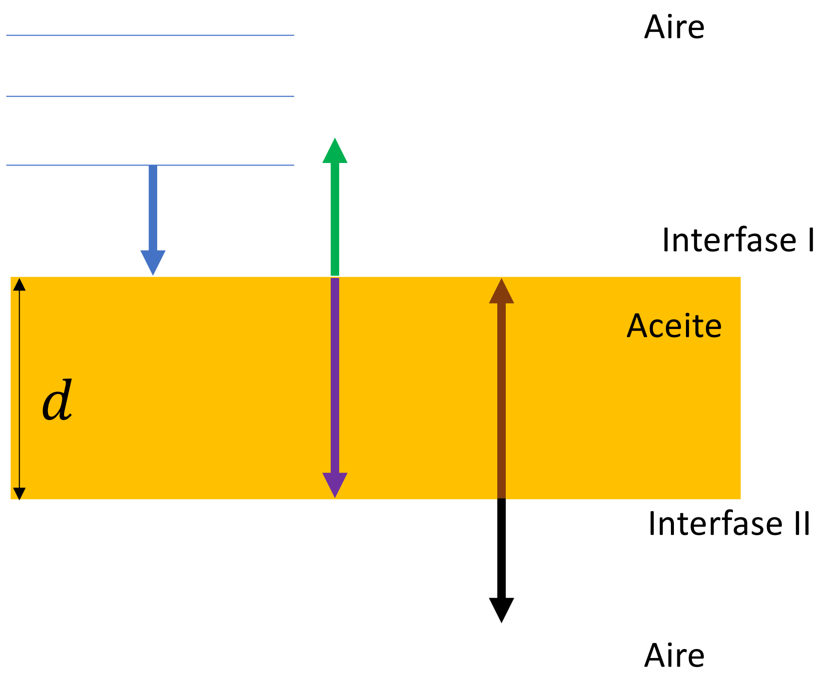
Interferencia de láminas delgadas

- 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).



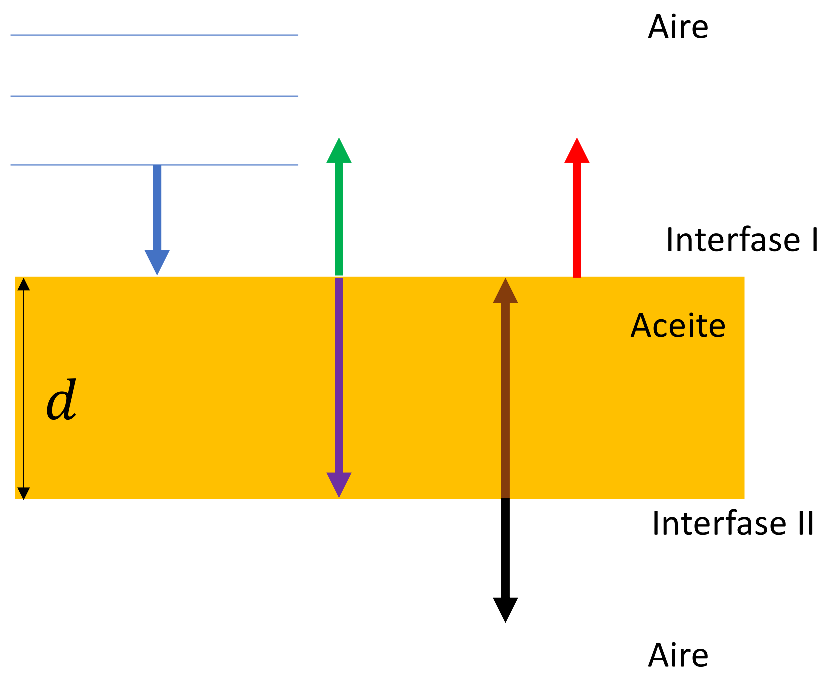
Interferencia de láminas delgadas

- 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

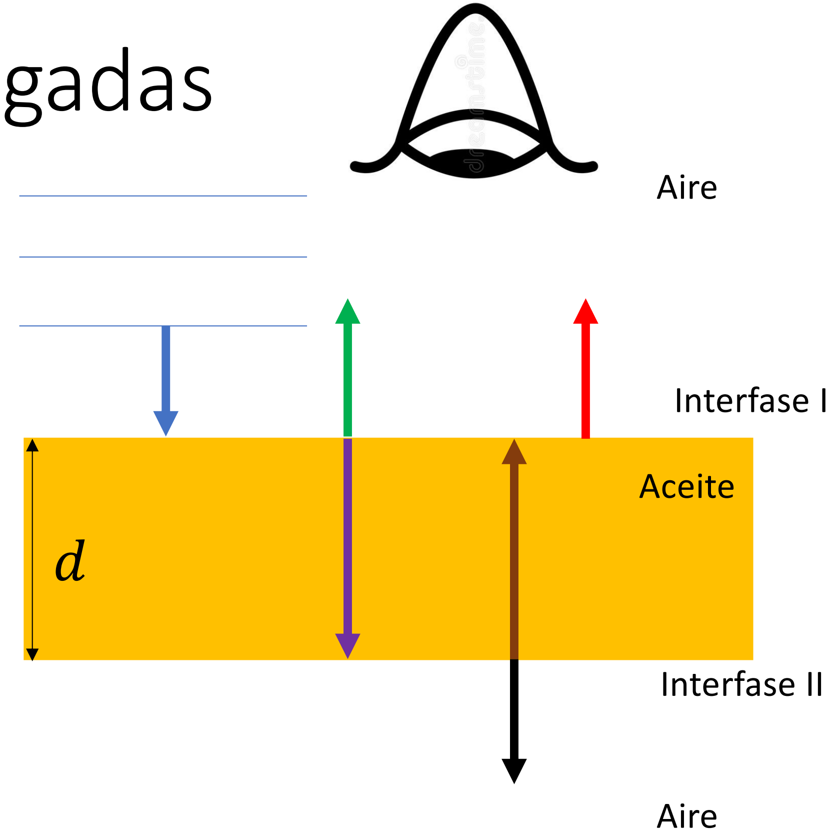
- El rayo marrón, reflejado en la interfase II se refracta volviendo a la capa superior de aire (color rojo).



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.

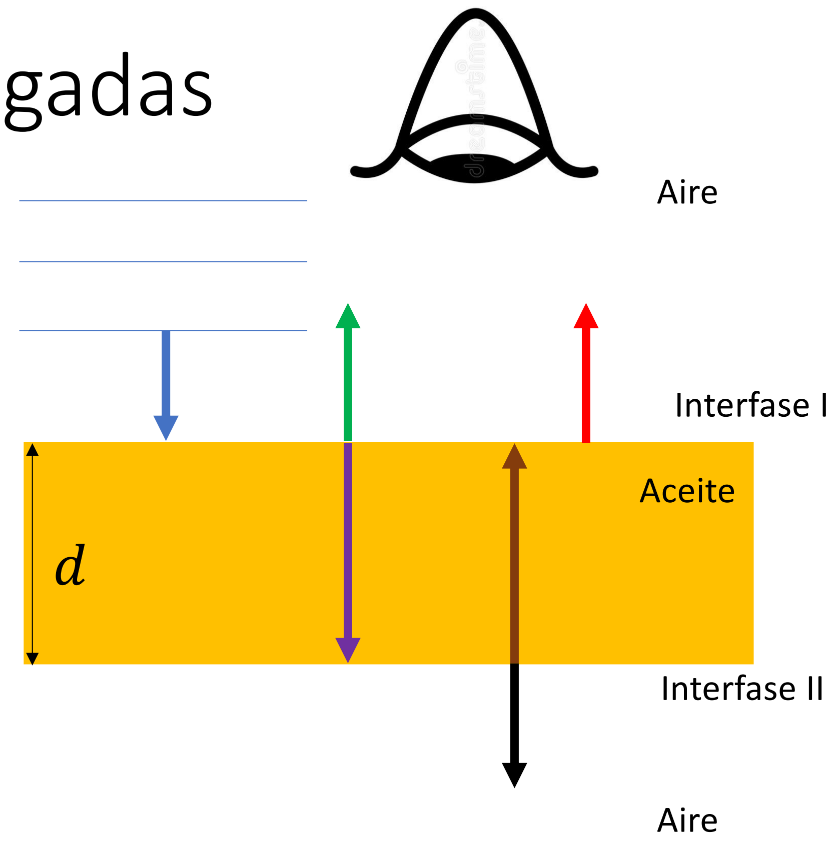


Interferencia de láminas delgadas

- 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?

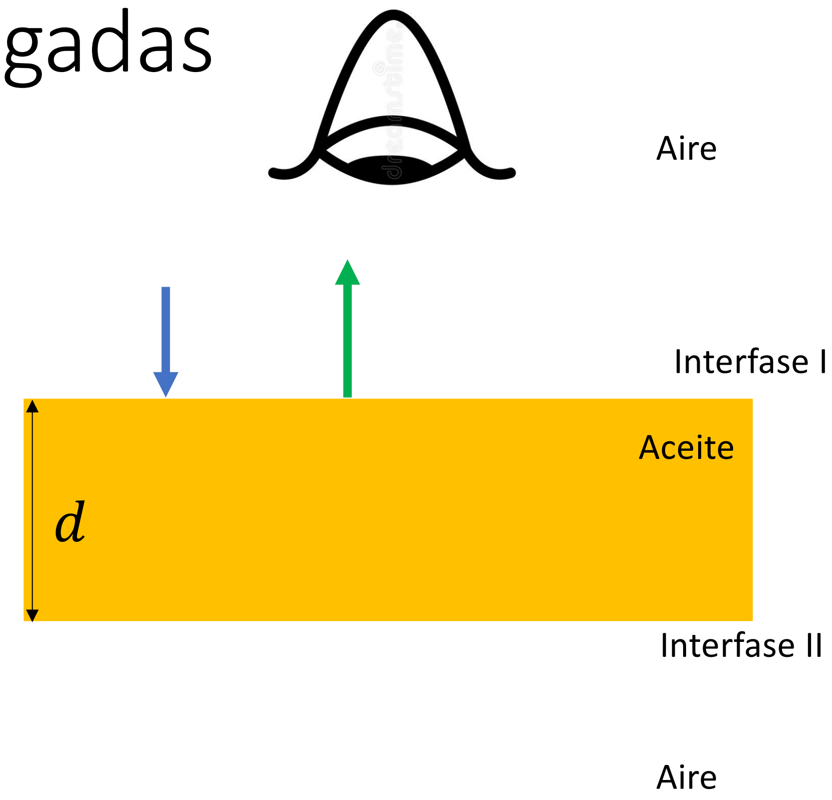


Interferencia de láminas delgadas

- 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.



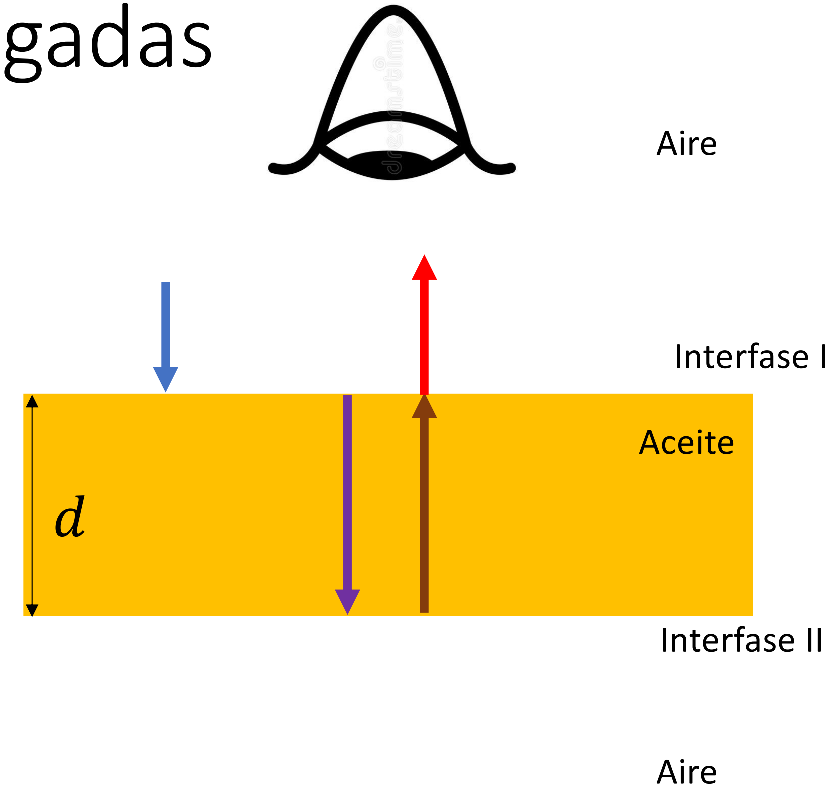
Diferencia de fase total del rayo verde: π

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:

$$\delta = (fase\ acumulada\ por\ rayo\ verde\ - fase\ acumulada\ por\ rayo\ rojo)$$

- 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:**

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

- Para que haya **interferencia destructiva:**

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

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}
$2\pi, 4\pi, 6\pi\ldots$	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 $\lambda = 550\ nm$ (amarillo verdoso) entonces, el espesor mínimo vale:
$$\frac{\lambda}{4n_{ac}} = 94{,}8\ nm$$

- Otros espesores válidos serán
$$3\times 94{,}8\ nm, 5\times 94{,}8\ nm, 7\times 9{,}8\ nm \text{ etc}$$

Valores de d para interferencia destructiva

- Si fijo λ modificando d voy 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}
3π, 5π…	Negativo (no sirve)
π	0 (lámina hiperdelgada)
$-\pi$	$\dfrac{\lambda}{2n_{ac}}$
-3π	$\dfrac{\lambda}{n_{ac}}$

Valores de d para interferencia destructiva

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

$$0$$

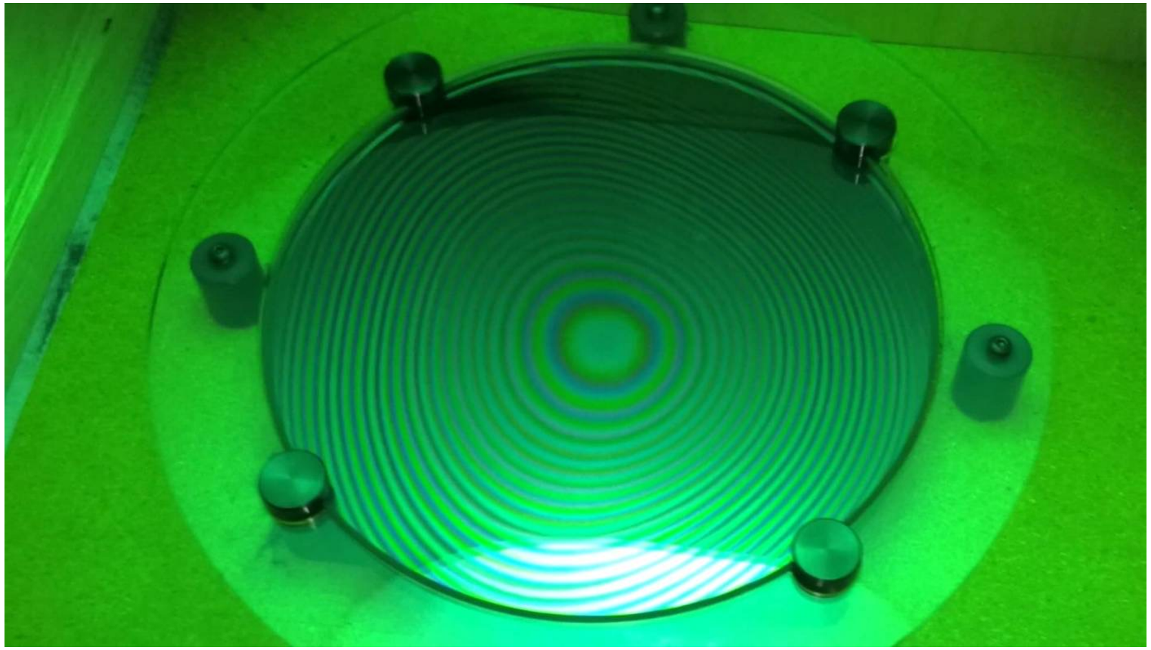
- Esto vale para todo λ

- Otros espesores válidos serán dependientes de λ. Para $\lambda = 400\ nm$ (azul)

$$137{,}9\ nm, 2\times 137{,}9\ nm, 3\times 137{,}9{,}7\ nm \text{ etc}$$

Anillos de Newton

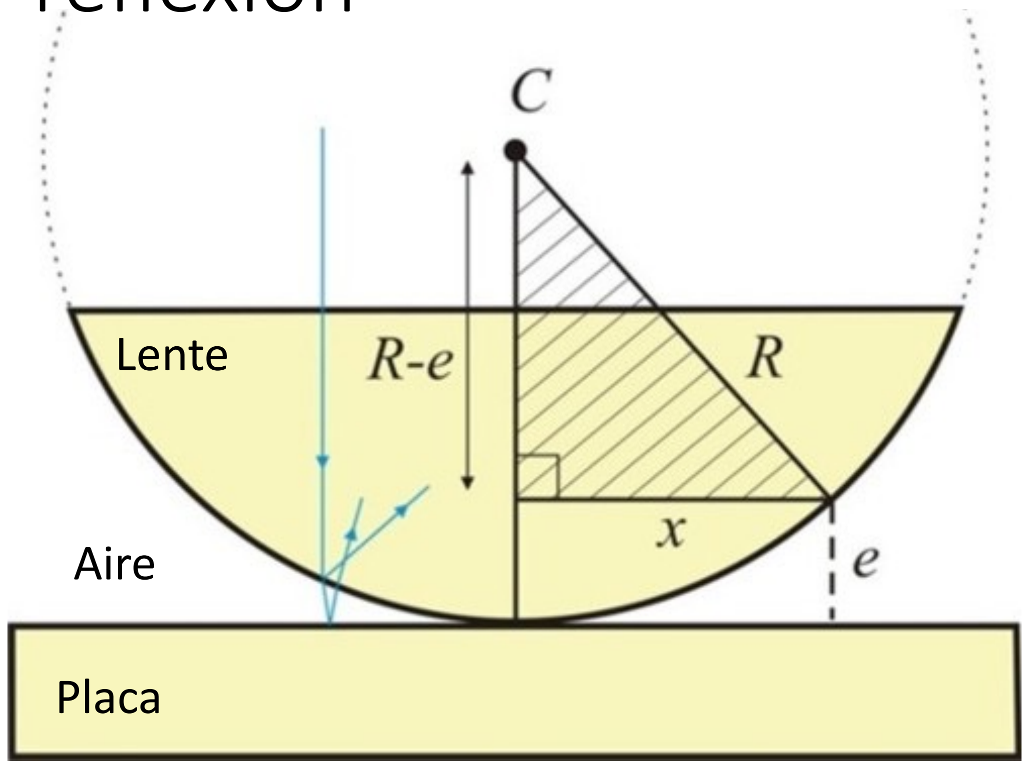
- Patrones de interferencia generados por rayos que viajan entre dos superficies de simetría axial extremadamente próximas que se tocan en un punto central.
- Efecto investigado por Newton en 1704 en su libro Opticks



Anillos de Newton por reflexión

- Supongamos una lente plano-convexa de radio de curvatura R apoyada en su vértice sobre una placa de caras plano paralelas.

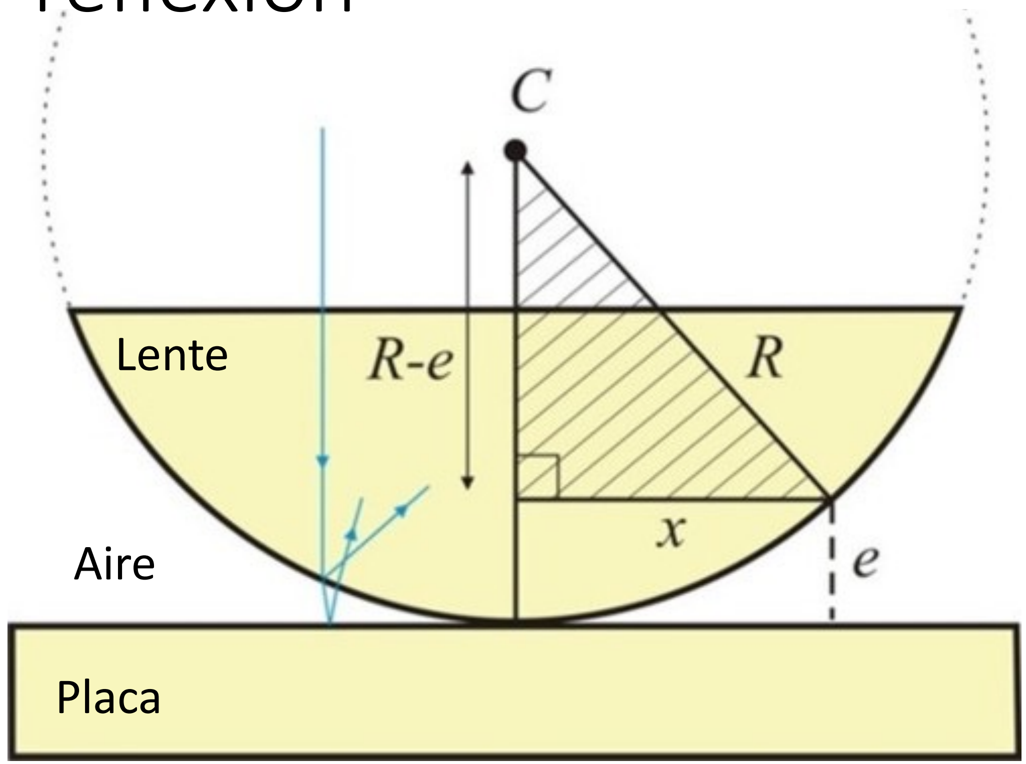
- Ambas piezas son de vidrio ($n = 1{,}5$) y el espacio entre ellas está ocupado por aire.



Anillos de Newton por reflexión

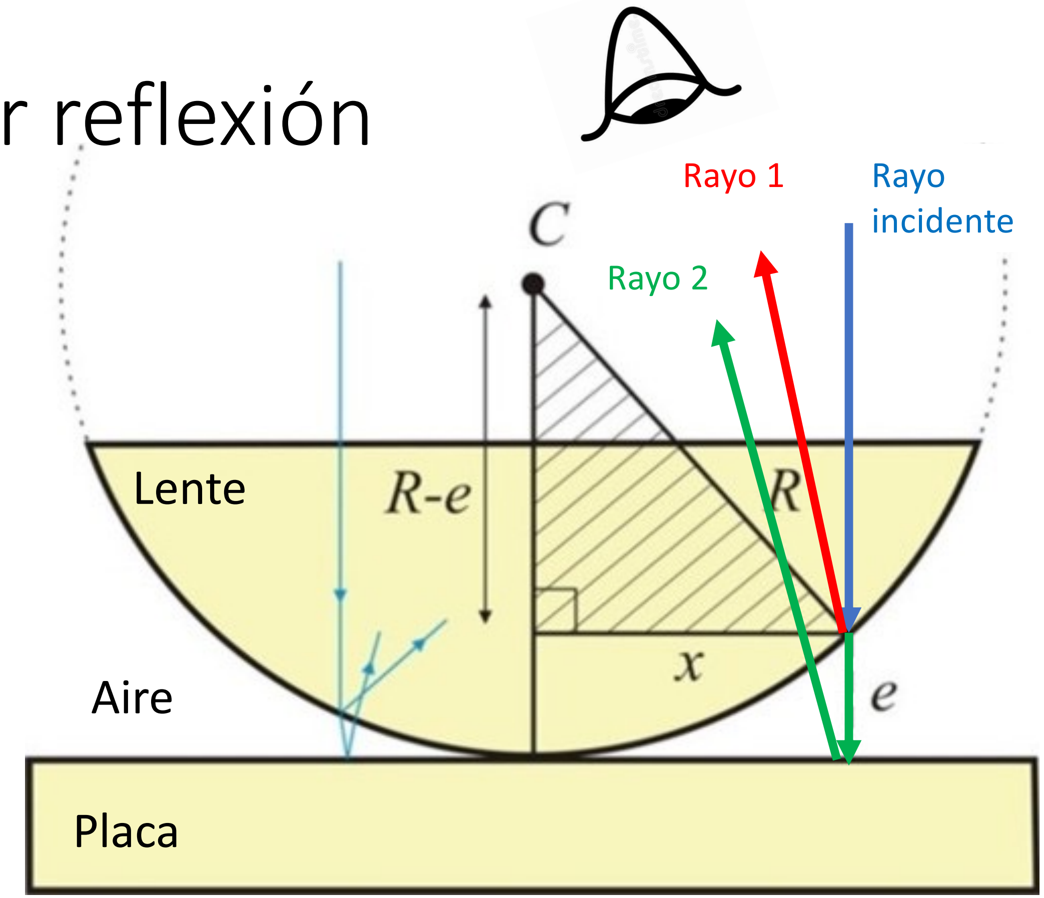
- Se hace incidir un haz de luz monocromática de manera normal a la placa.
- Se estudia la interferencia por reflexión en una región próxima al punto de contacto donde el espesor de la capa de aire

$$e \ll R$$



Anillos de Newton por reflexión

- En virtud de la aproximación anterior, la incidencia de todos los rayos del experimento pueden asumirse normal a las interfases.
- 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

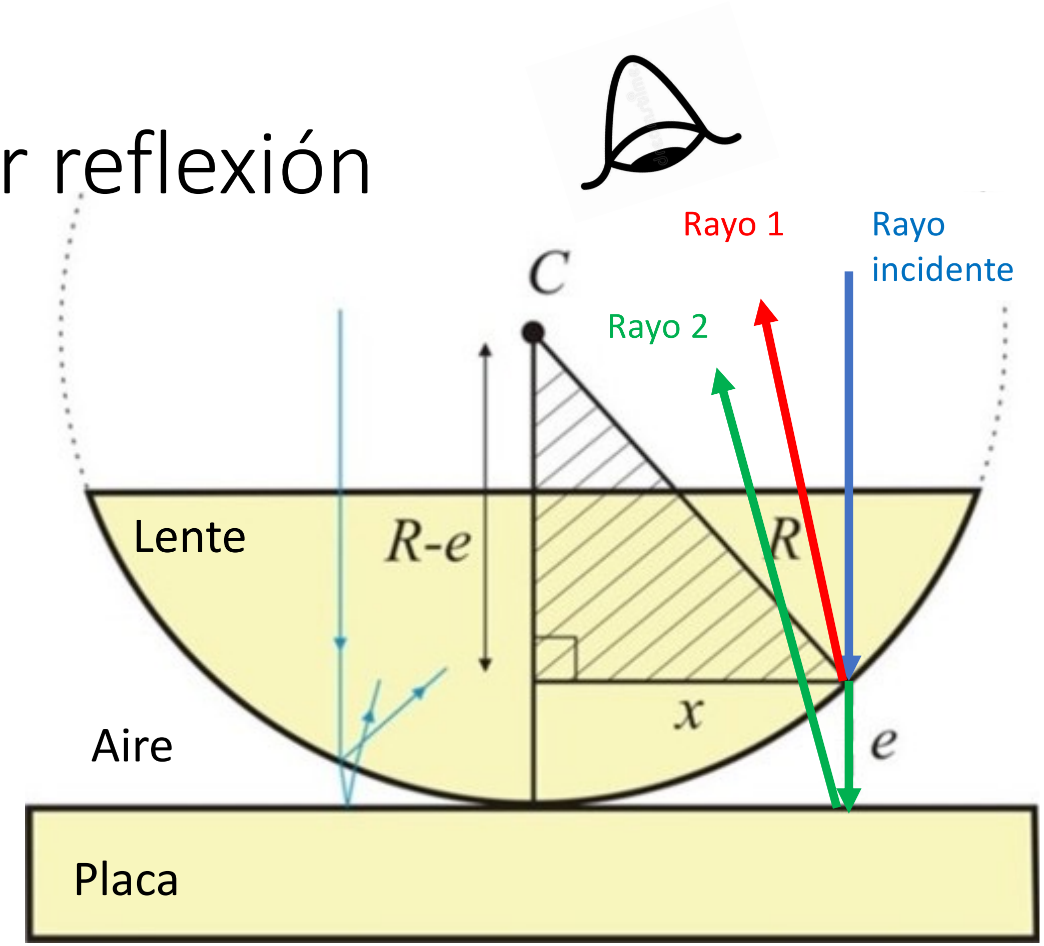


Anillos de Newton por reflexión

- 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



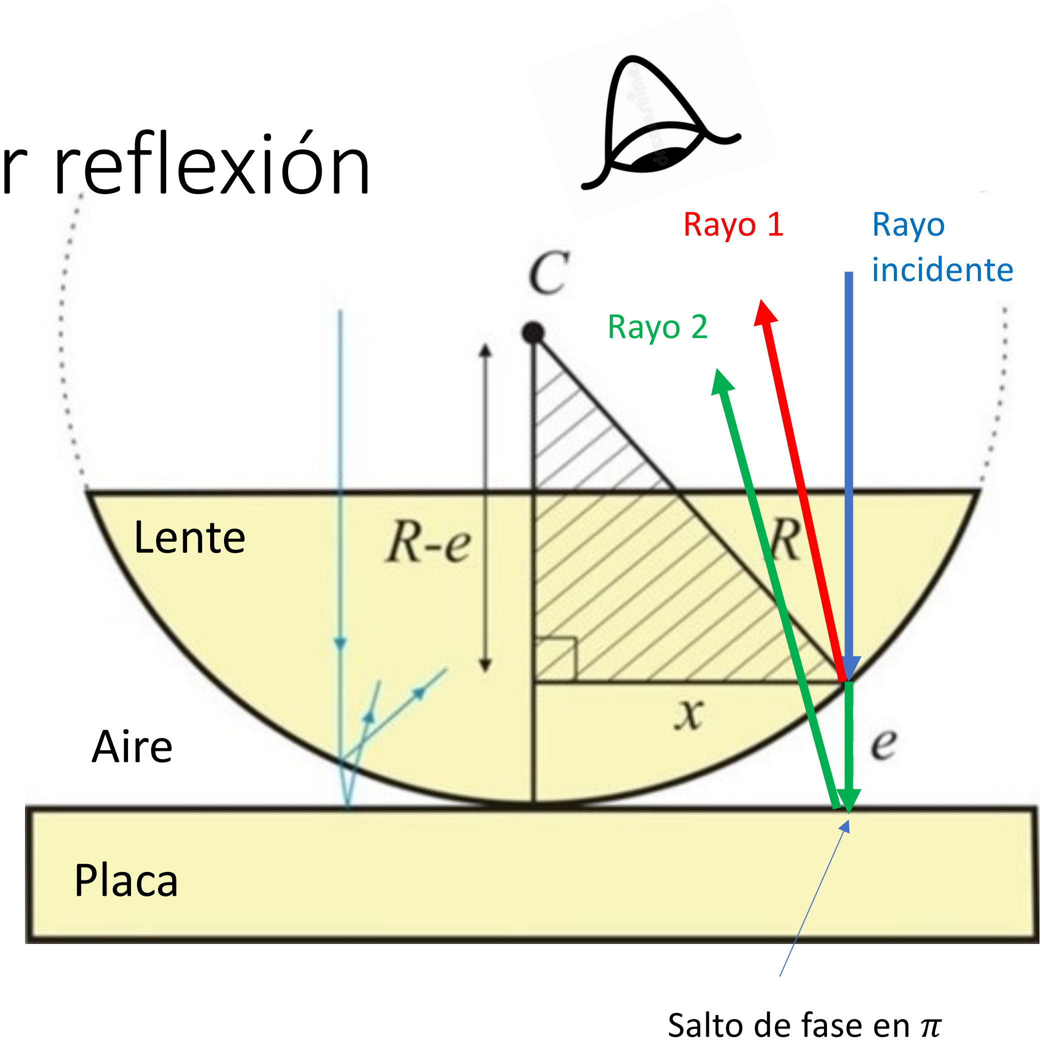
Anillos de Newton por reflexión

- 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:

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



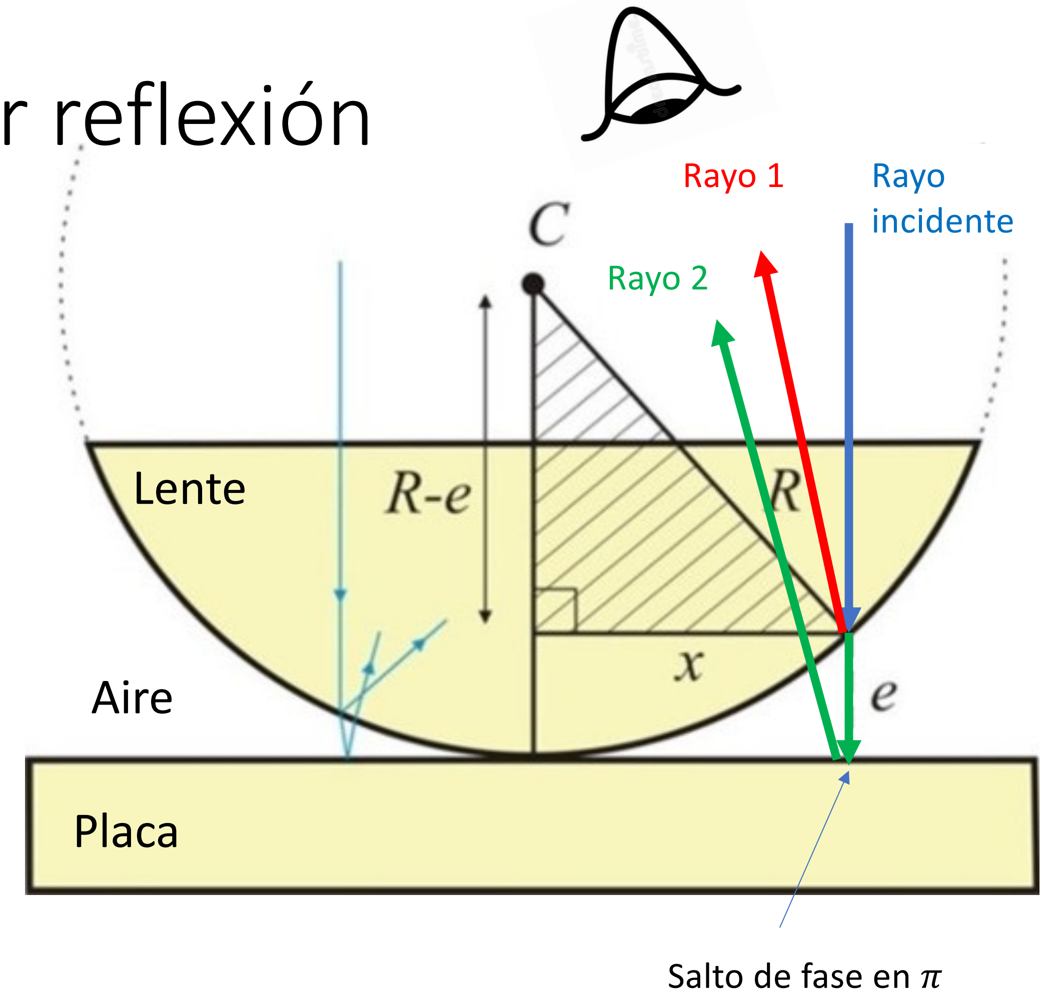
Anillos de Newton por reflexión

- Los rayos interferirán constructivamente cuando:

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

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

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



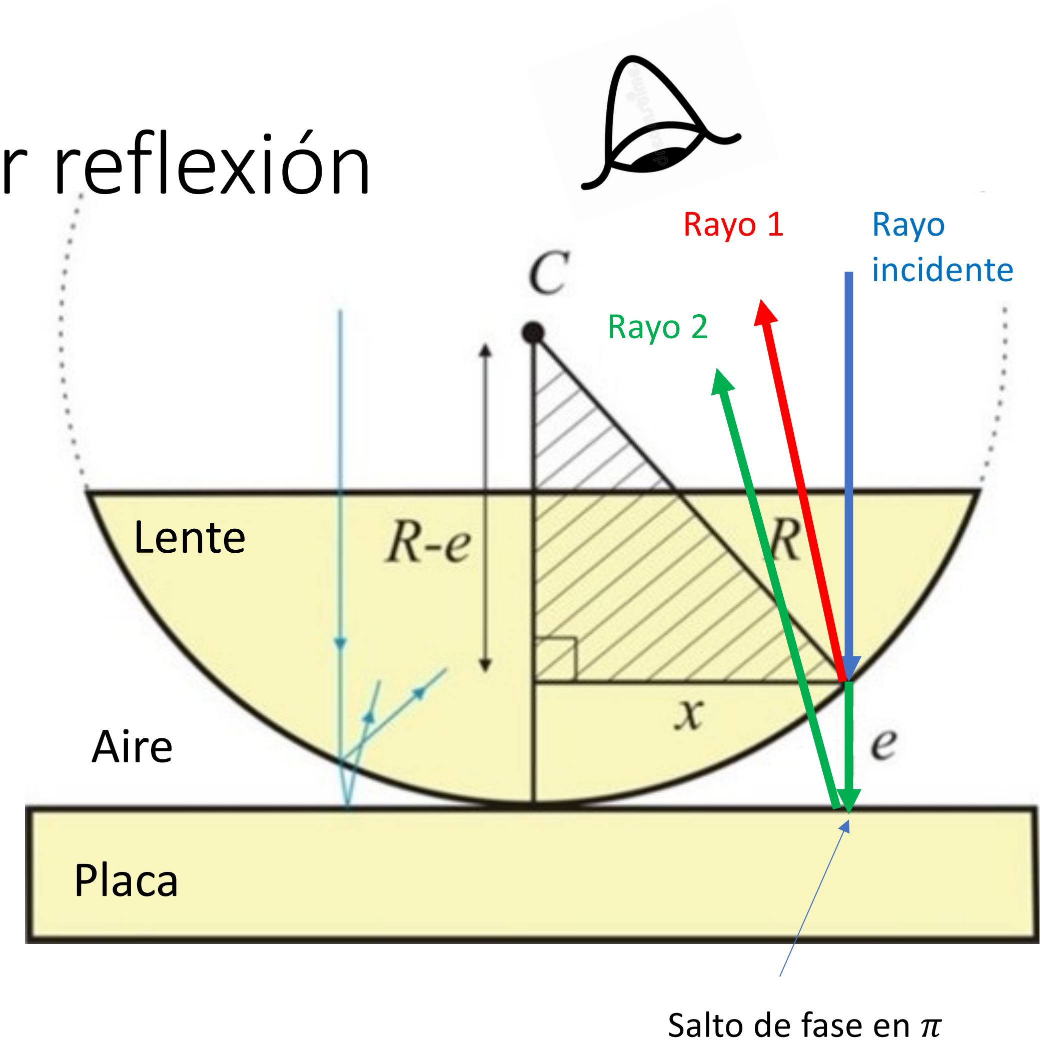
Anillos de Newton por reflexión

- 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.

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

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



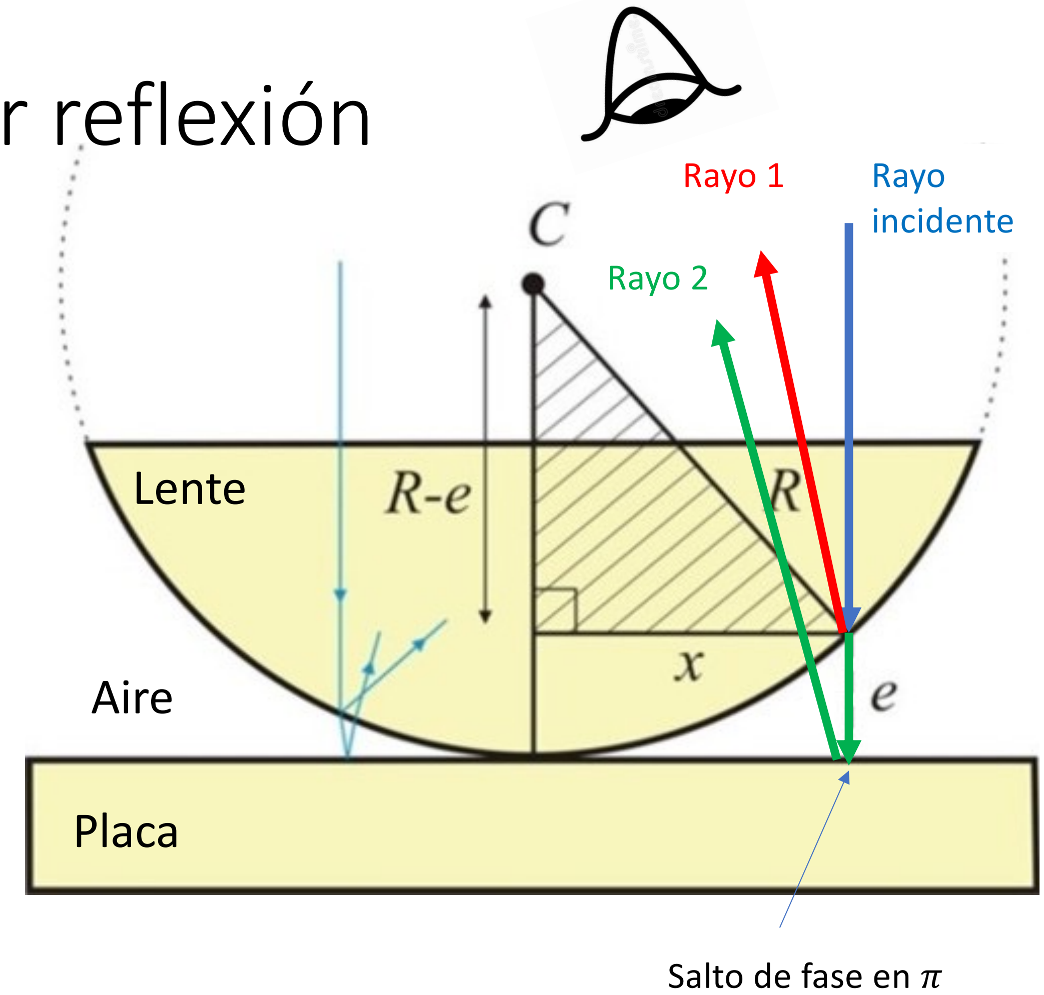
Anillos de Newton por reflexión

- Los rayos interferirán destructivamente cuando:

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

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

$$k\frac{{x_{min}}^2}{R} + \pi = \pm\pi, \pm 3\pi, \dots$$



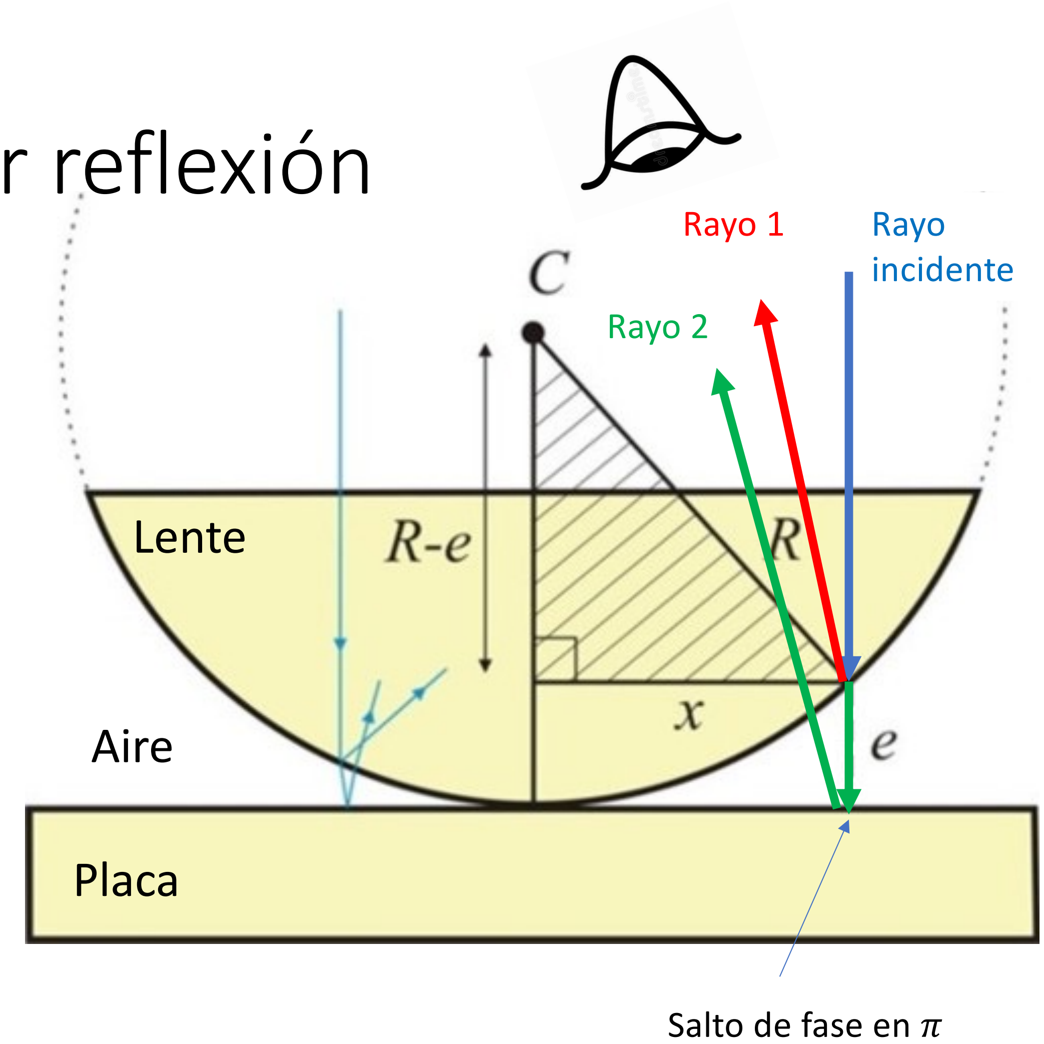
Anillos de Newton por reflexión

- Estos valores corresponden a ANILLOS oscuros.

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

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

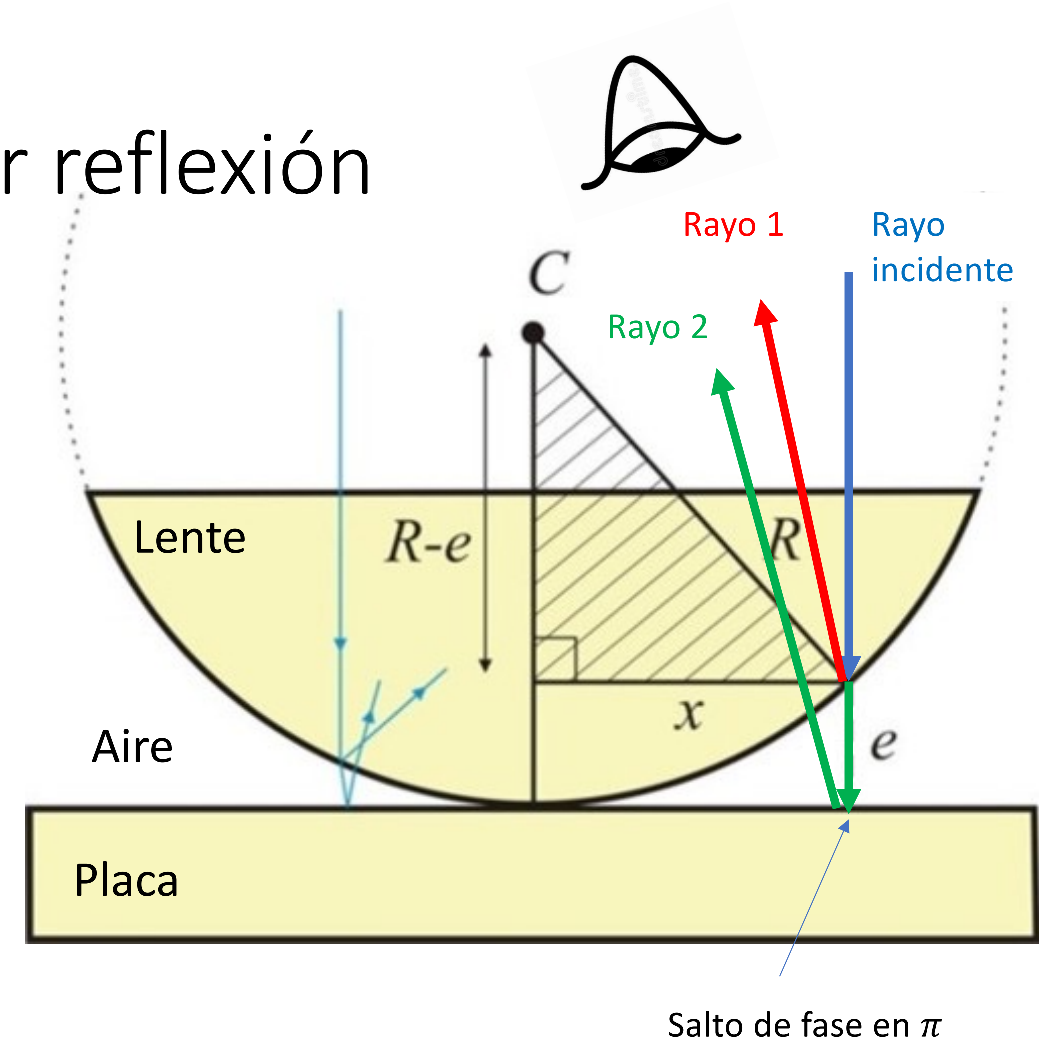
- En el punto de contacto hay un mínimo !



Anillos de Newton por reflexión

- Los mínimos ocurrirán para los radios.

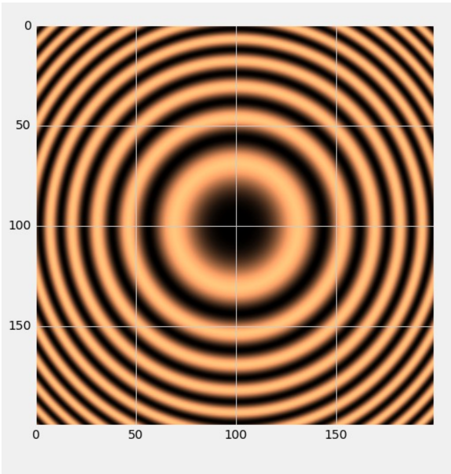
$$x_{min}{}^{2} = 0, \lambda R, 2\lambda R, 3\lambda R \ldots$$

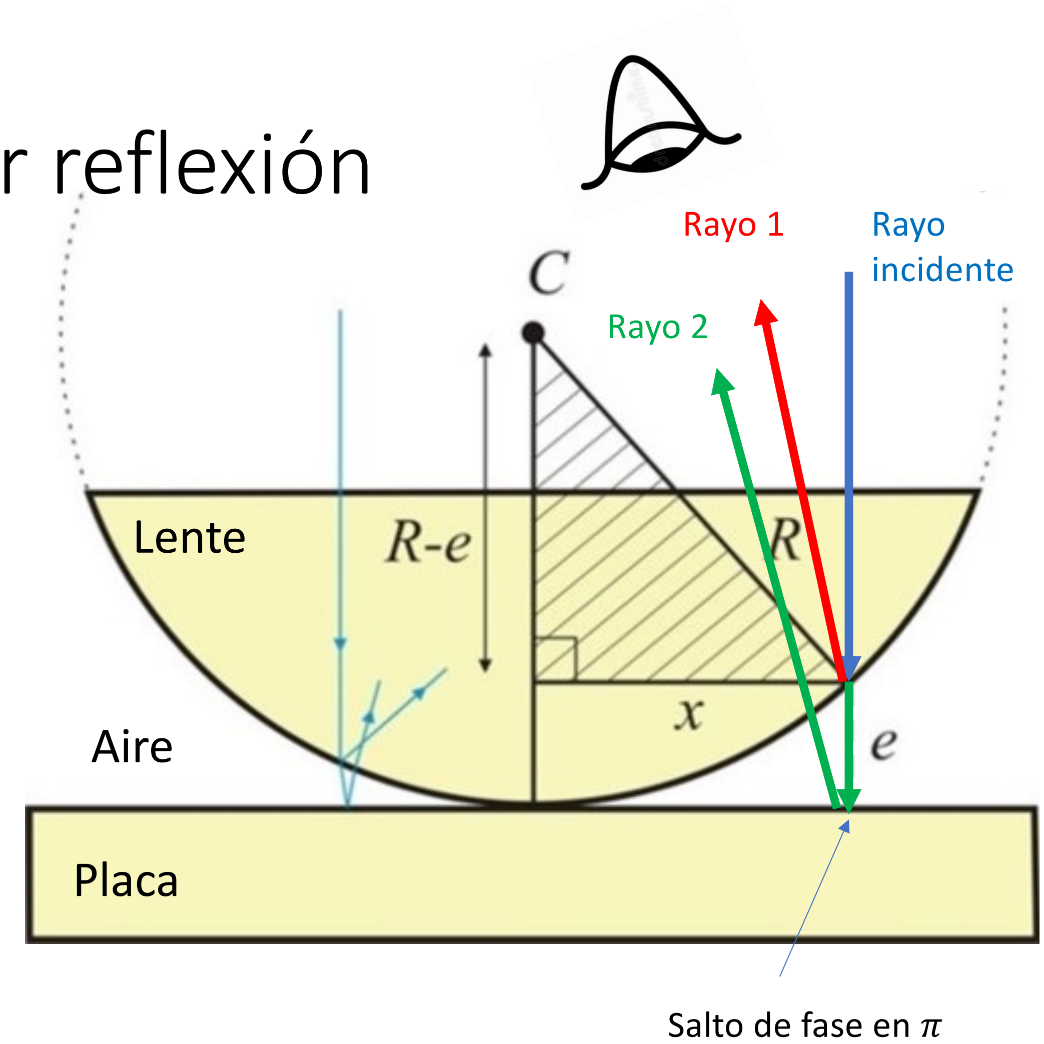


Anillos de Newton por reflexión

- Los mínimos ocurrirán para los radios.

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





Anillos de Newton por transmisión

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