

Óptica Geométrica

Objetivos

- Delimitar el campo de validez de la Óptica Geométrica e introducir sus Leyes Fundamentales.
- Analizar la formación de Imágenes a través de Sistemas Ópticos sencillos.

Contenidos

1. Introducción: Naturaleza de la luz.
2. Conceptos fundamentales.
3. Leyes fundamentales de la Reflexión y Refracción.
4. Principio de Fermat: Camino Óptico.
5. Formación de Imágenes.
6. La Óptica bajo Aproximación Paraxial.
7. Invariante de Abbe.
8. Imágenes formadas por Reflexión y Refracción.
9. Sistemas Ópticos con Superficies Planas: Láminas Plano-paralelas y Prismas.

Bibliografía

- ✓ *P. A. Tipler, "Física", Vol. II, Reverté, 2005.*
- ✓ *F.W. Sears, M.W. Zemansky, "Física Universitaria", Addison-Wesley, 2004.*
- ✓ *J. Casas , "Óptica", Universidad de Zaragoza, 1985.*
- ✓ *E. Hecht "Óptica", Addison-Wesley, 2000.*

1. Introducción: Naturaleza de la Luz

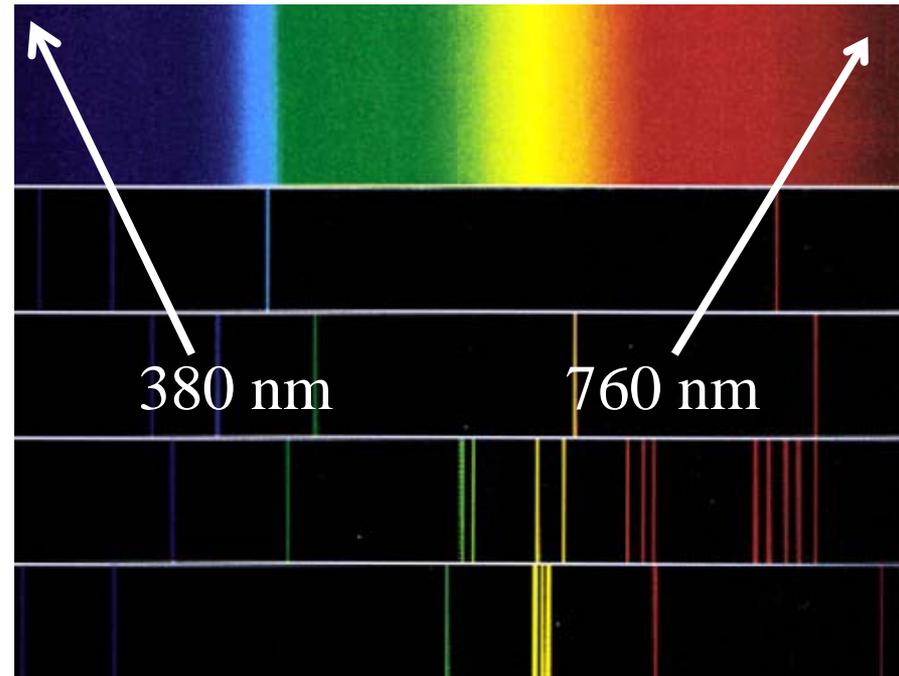
Óptica:

Estudia la generación, propagación de la luz y su interacción con la materia

Luz:

Energía radiante, capaz de estimular el proceso de la visión

(región $\lambda = 380\text{nm} - 760\text{nm}$ del espectro electromagnético)



Modelos Corpusculares.

Newton (1704):

“**Óptica**” Asume la teoría de Descartes.

Requiere $c_{\text{aire}} < c_{\text{agua}}$

Estudia los fenómenos de dispersión.

Construye el primer telescopio reflector.

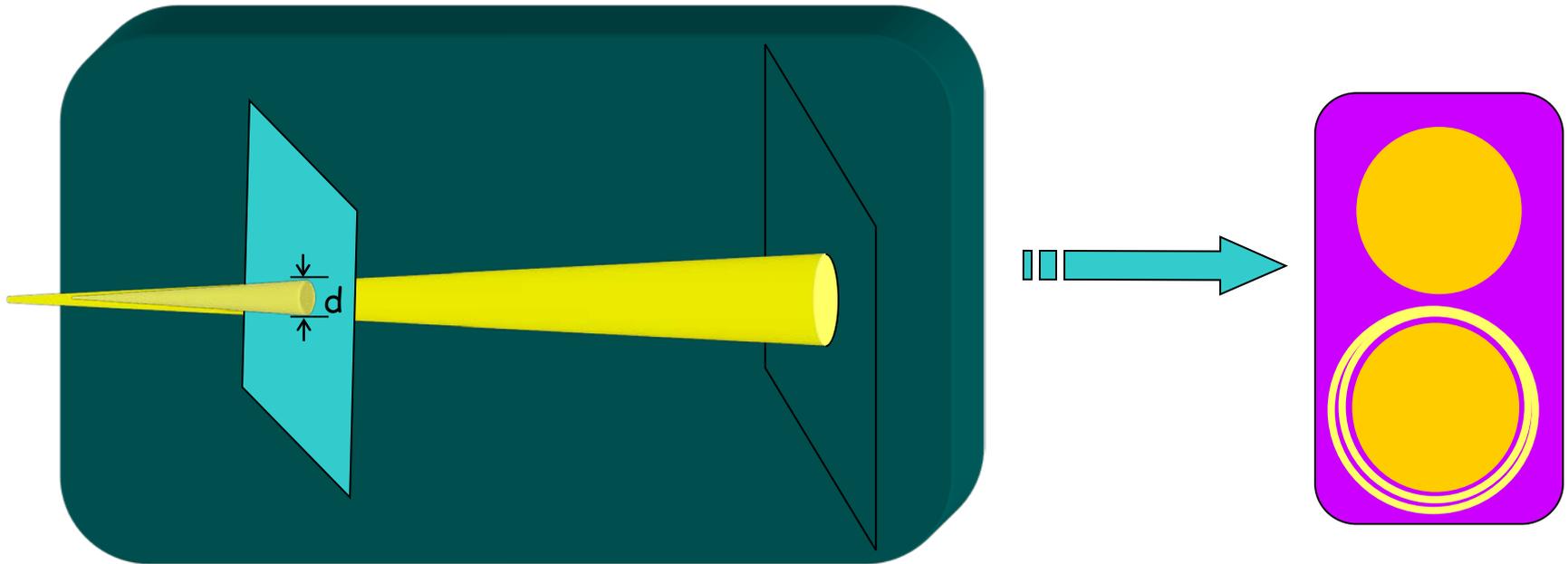


Modelos Ondulatorios.

Grimaldi (1665):

“Experiencia de Grimaldi”

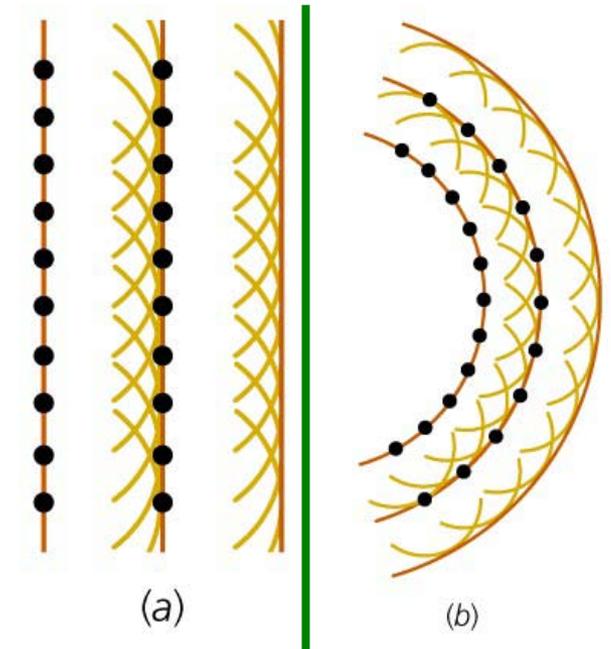
Contradice los modelos corpusculares



Modelos Ondulatorios.

Huygens (1690): Primer Modelo Ondulatorio

“Cada punto de un frente de onda primario sirve como foco de ondas elementales secundarias que avanzan con una velocidad y frecuencia igual a la de la onda primaria. El frente de onda primario, al cabo de un cierto tiempo, es la envolvente de estas ondas elementales.”



Modelos Ondulatorios.

Young (1773-1829):

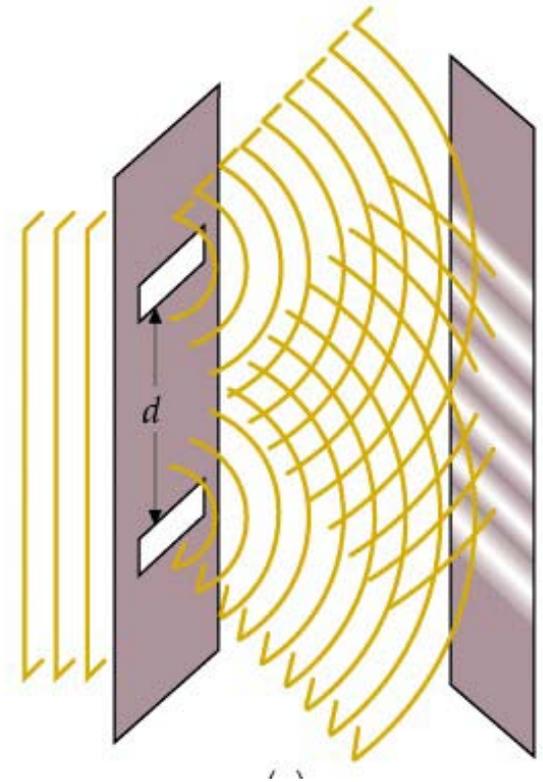
“Experiencia de la doble rendija”

Contradice los modelos corpusculares

Postula el carácter transversal de las ondas luminosas

Fresnel (1788-1827):

“Formalismo matemático casi completo del modelo ondulatorio”



Modelos Ondulatorios.

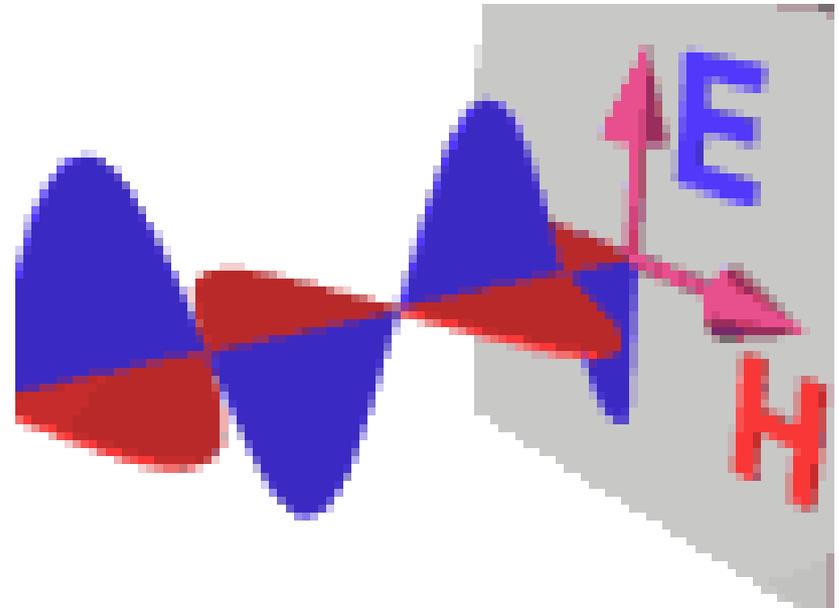
Foucault (1850):

“Mide la velocidad de la luz en el agua
comprueba que es menor que en el aire”

Maxwell (1864)

Hertz (1888):

“Introducen el carácter
electromagnético de la luz”



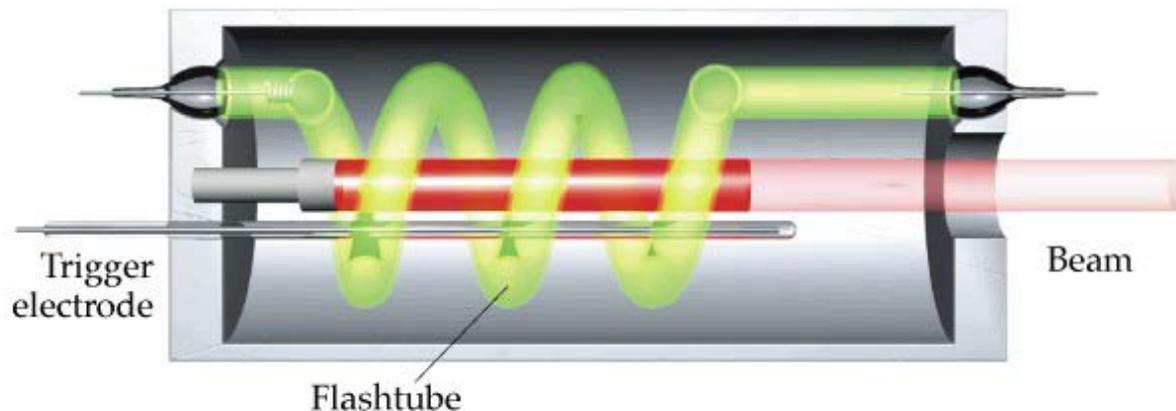
Óptica Actual

Einstein (1905) (Relatividad)

Efecto fotoeléctrico.

Planck (1900) (Física Cuántica)

Maiman (1960) Construye el Láser.



2. Conceptos Fundamentales

Óptica Geométrica: Propagación de la luz.

Objeto de estudio: determinar la trayectoria de la energía radiante a través de distintos medios, o cómo disponer éstos de modo que la propagación se ajuste a determinadas trayectorias.

Estudia la formación de imágenes basándose en las leyes de la reflexión y refracción.

Excluiremos:

Absorción



Medios

Transparentes

Opacos

Difusión



$\lambda \approx$ rugosidades

Rango de validez de la Óptica Geométrica:

$\lambda \ll$ Dimensiones de superficies y discontinuidades que se encuentra en su propagación

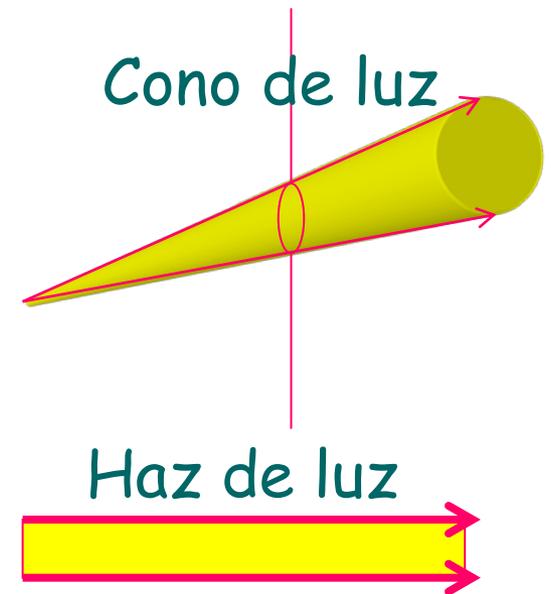
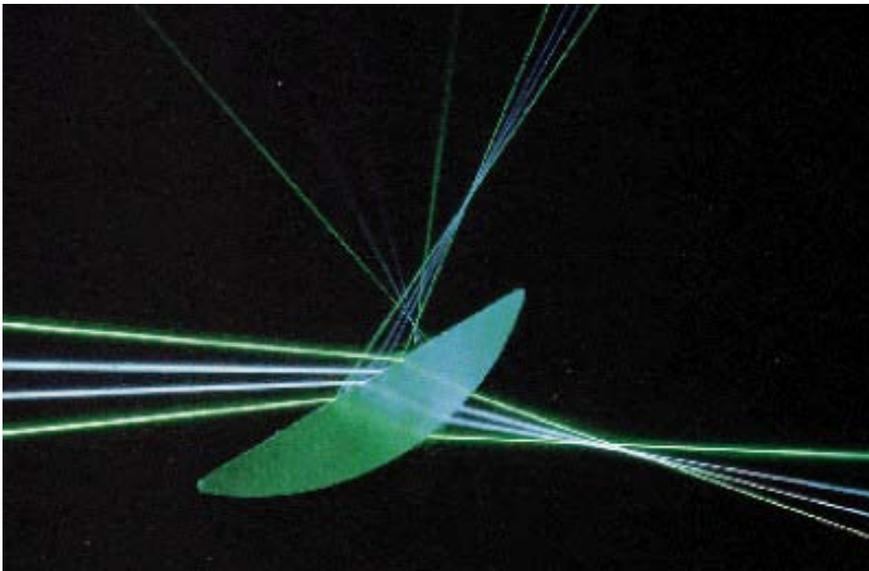
Conceptos

Rayo Luminoso (Caracteriza la trayectoria)

Índice de refracción (Caracteriza el medio)

Rayo Luminoso

Líneas del espacio correspondientes a la dirección del flujo de la energía radiante



Índice de Refracción

$$n = \frac{c}{v}$$

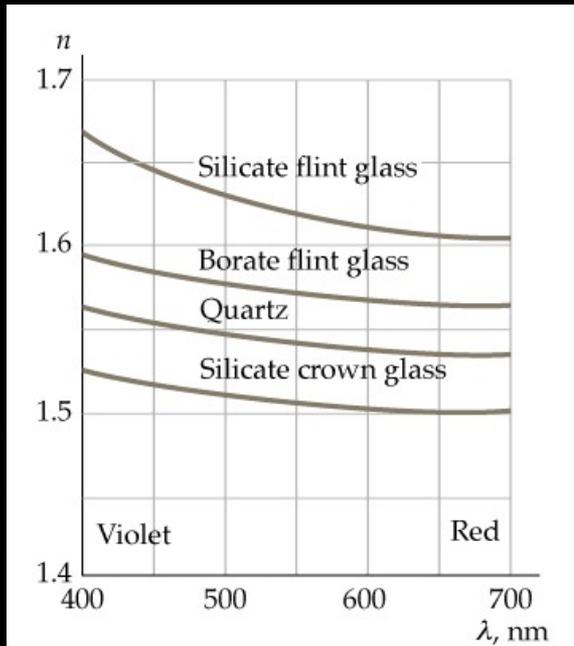
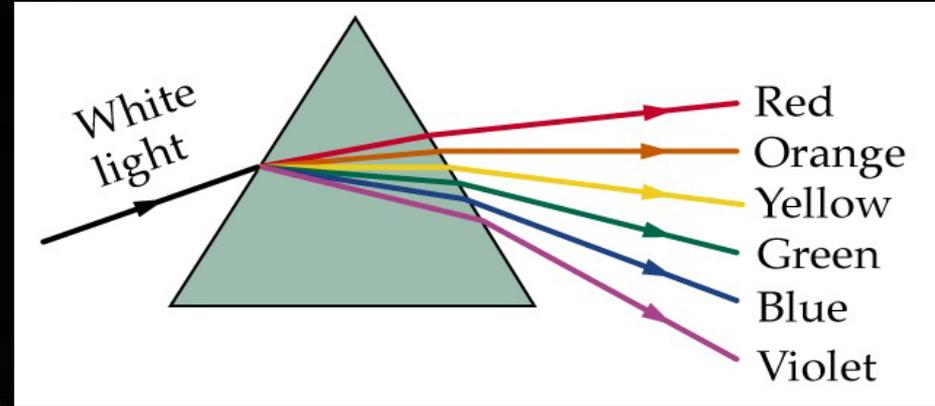
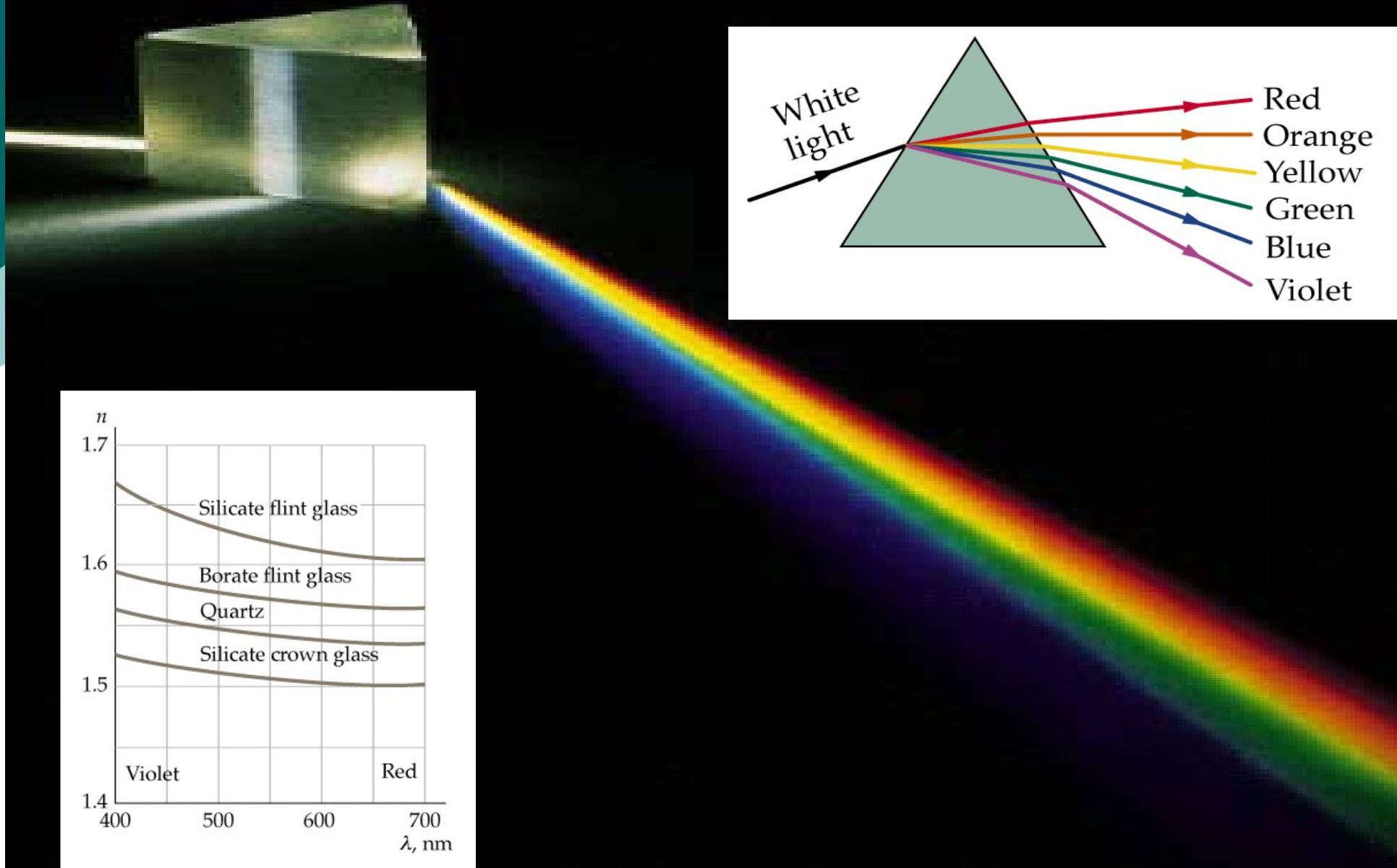
{ c, velocidad de la luz en el vacío
v, velocidad de la luz en el medio

$n \geq 1$ $n_{\text{agua}}=1.33$; $n_{\text{vidrio}}=1.5$; $n_{\text{diamante}}=2.4$

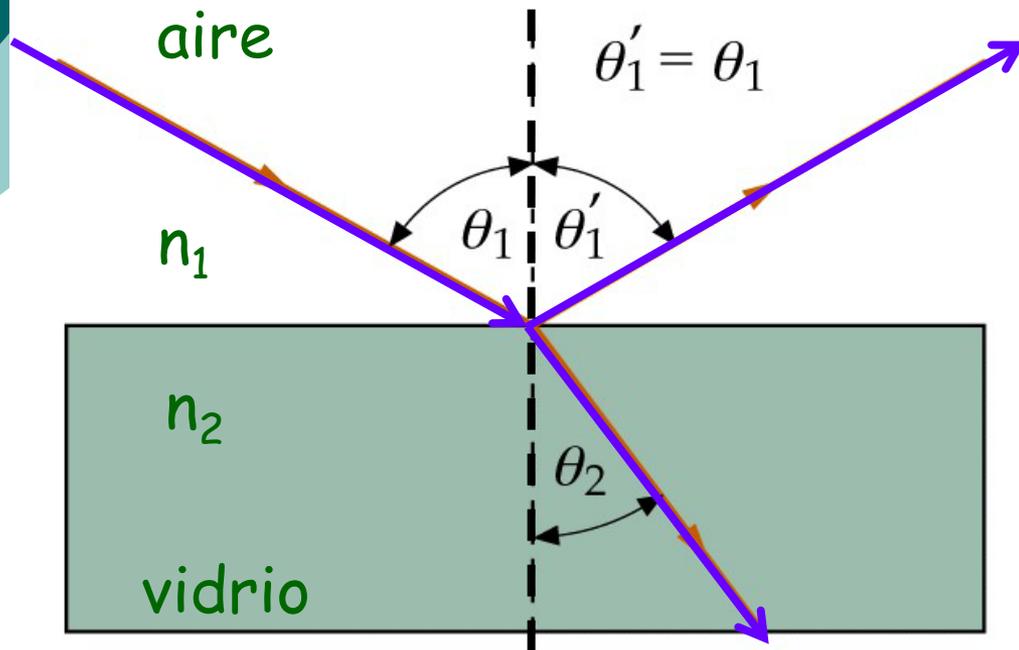
- ✓ Homogéneos e Isótropos $\implies n = \text{cte}$ { Vacío
Lentes ópticas
Cristales cúbicos
- ✓ Anisótropos $\implies n$, depende de la dirección { Todas las sustancias
cristalinas excepto
cúbicas
- ✓ Heterogéneos $\implies n$ varía de un punto a otro { Aire

$$n = n(\lambda)$$

⇒ "Dispersión Cromática"



3. Leyes de Reflexión y Refracción



- Los rayos incidente, reflejado y refractado y la normal están contenidos en el plano de incidencia
- Ley de la reflexión
- Ley de la refracción

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2$$

Ley de Snell

4. Principio de Fermat

Camino óptico



$$(L) = n s$$

S= trayectoria que sigue la luz para ir de un punto a otro

Si el medio es heterogéneo

$$(L) = \int_A^B n ds$$

$(L) > 0$, si se toma en el sentido de propagación de la luz

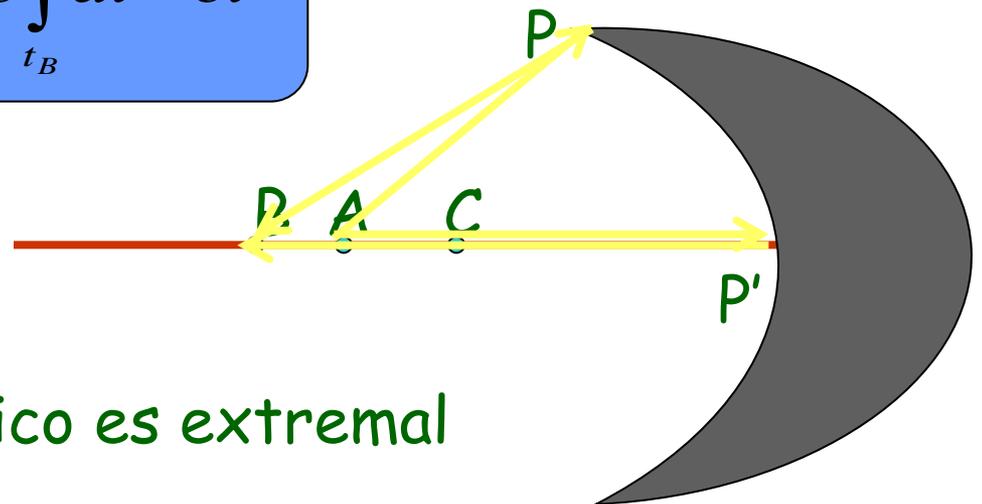
$(L) < 0$, si se toma en sentido contrario

Principio de Fermat

De entre todas las posibles trayectorias que puede seguir la luz para ir de un punto A a otro B , la que realmente sigue es aquella que hace mínimo el camino óptico recorrido.

$$(L) = \int_A^B n ds \Rightarrow \text{Mínimo}$$

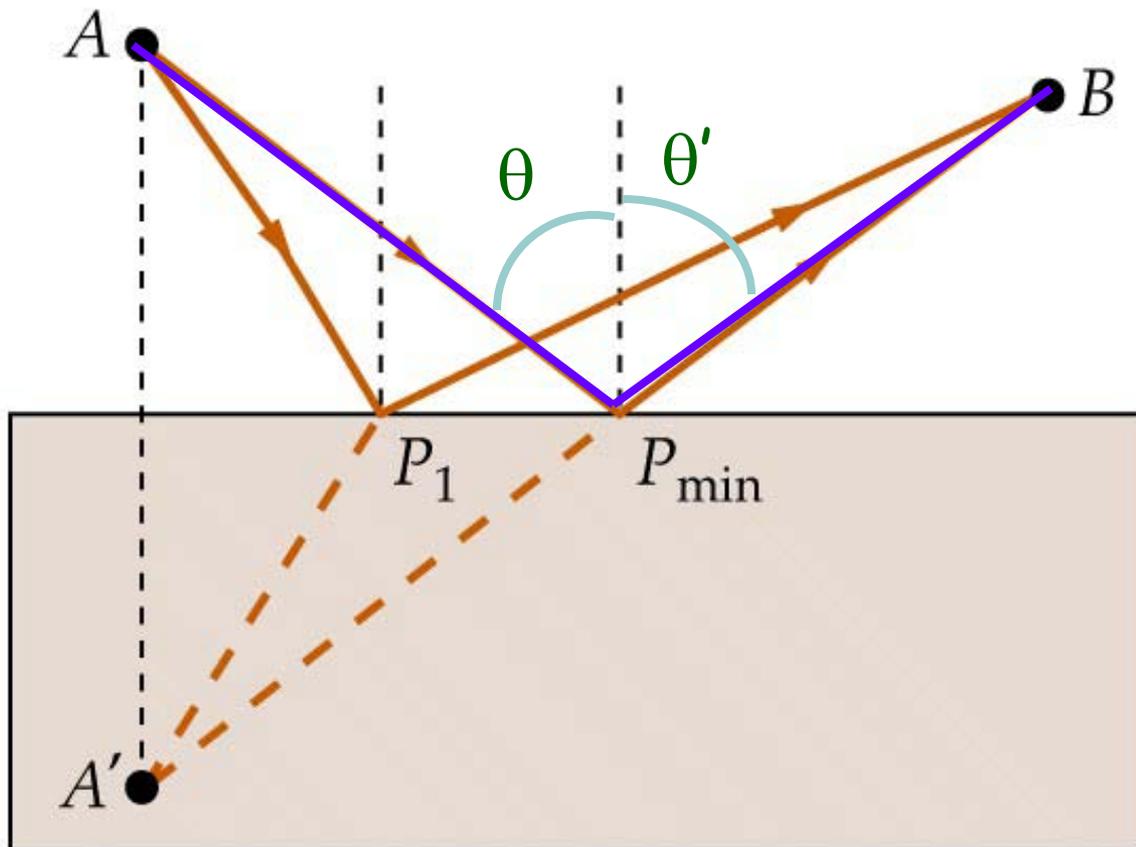
$$\int_A^B n ds = \int_A^B \frac{c}{v} ds = c \int_A^B \frac{ds}{v} = c \int_{t_A}^{t_B} dt = ct$$



En realidad el camino óptico es extremal

Ley de Reflexión

La luz pasa de A a B en el menor tiempo posible



$n = \text{cte} \Rightarrow$
distancia mínima

$$A P_1 B = A' P_1 B$$

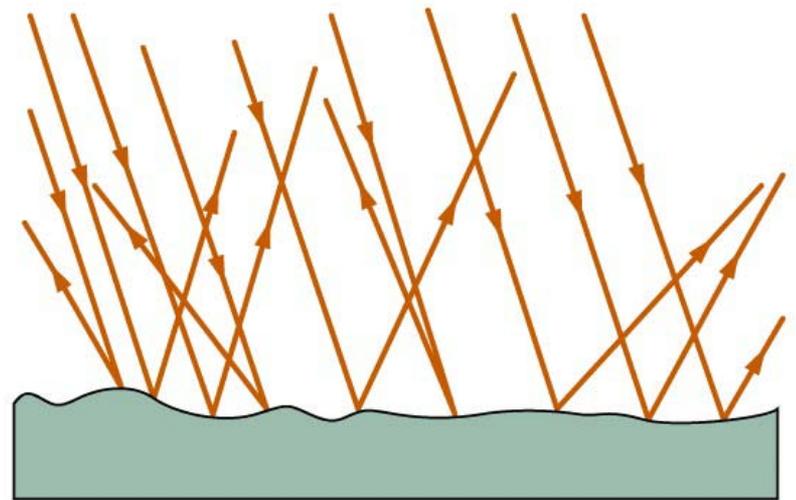
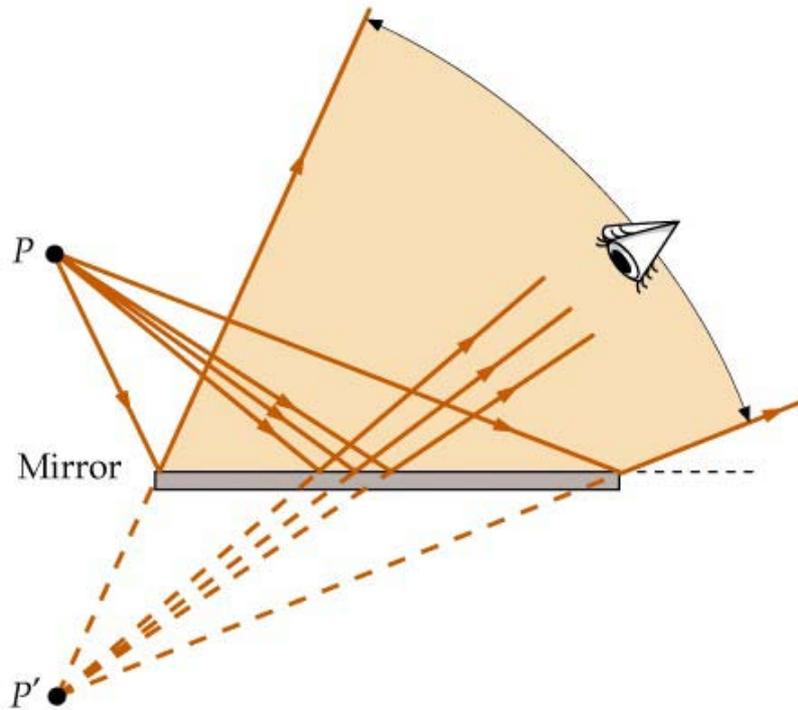
$$A' P_1 B = \text{mínima}$$

↓
 $A' P_1 B = \text{recta}$

$$\theta = \theta'$$

Ley de Reflexión

Tipos: reflexión especular y reflexión difusa.

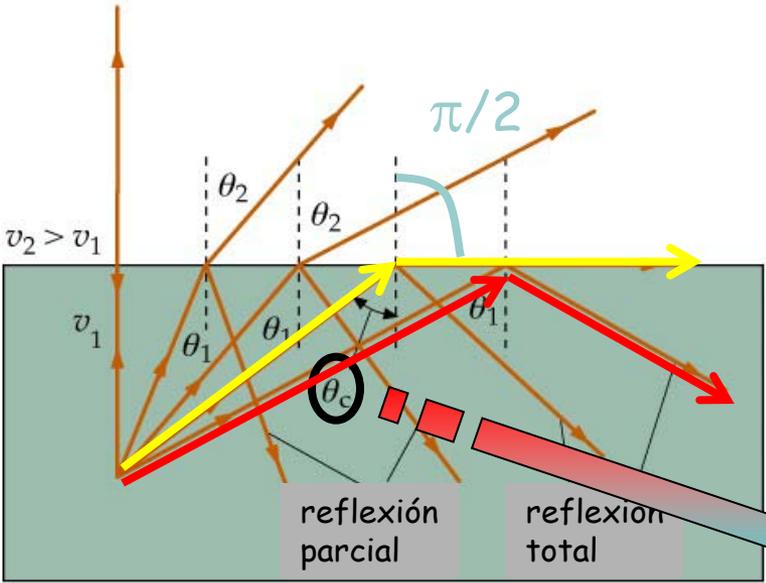
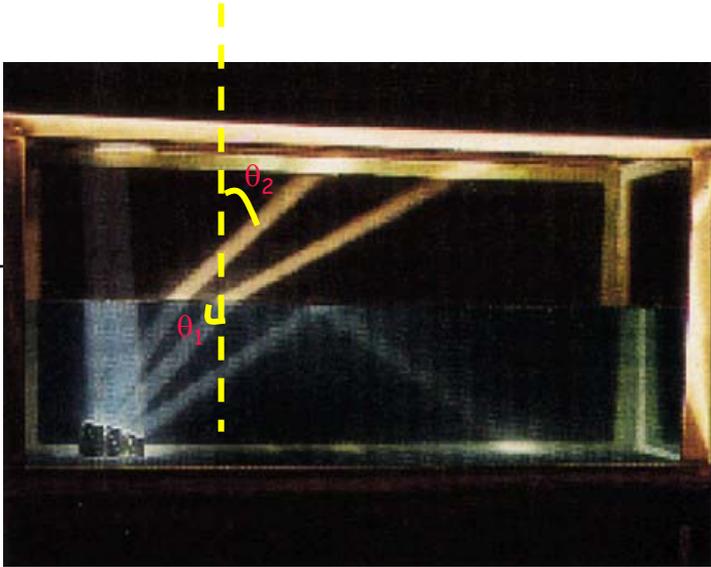


$$n_1 \geq n_2$$

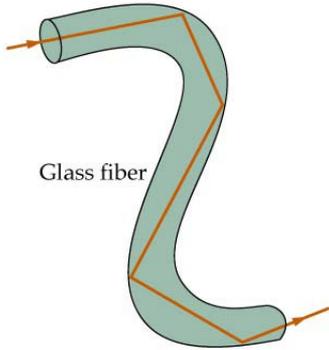
$$\theta \geq \theta_1$$

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \frac{\pi}{2}$$

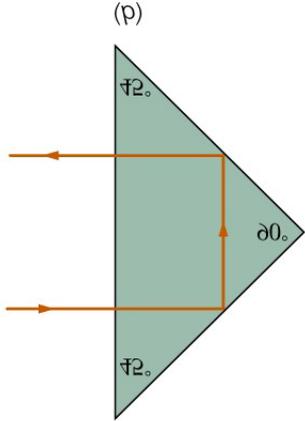
Reflexión Total



(a)



(a)



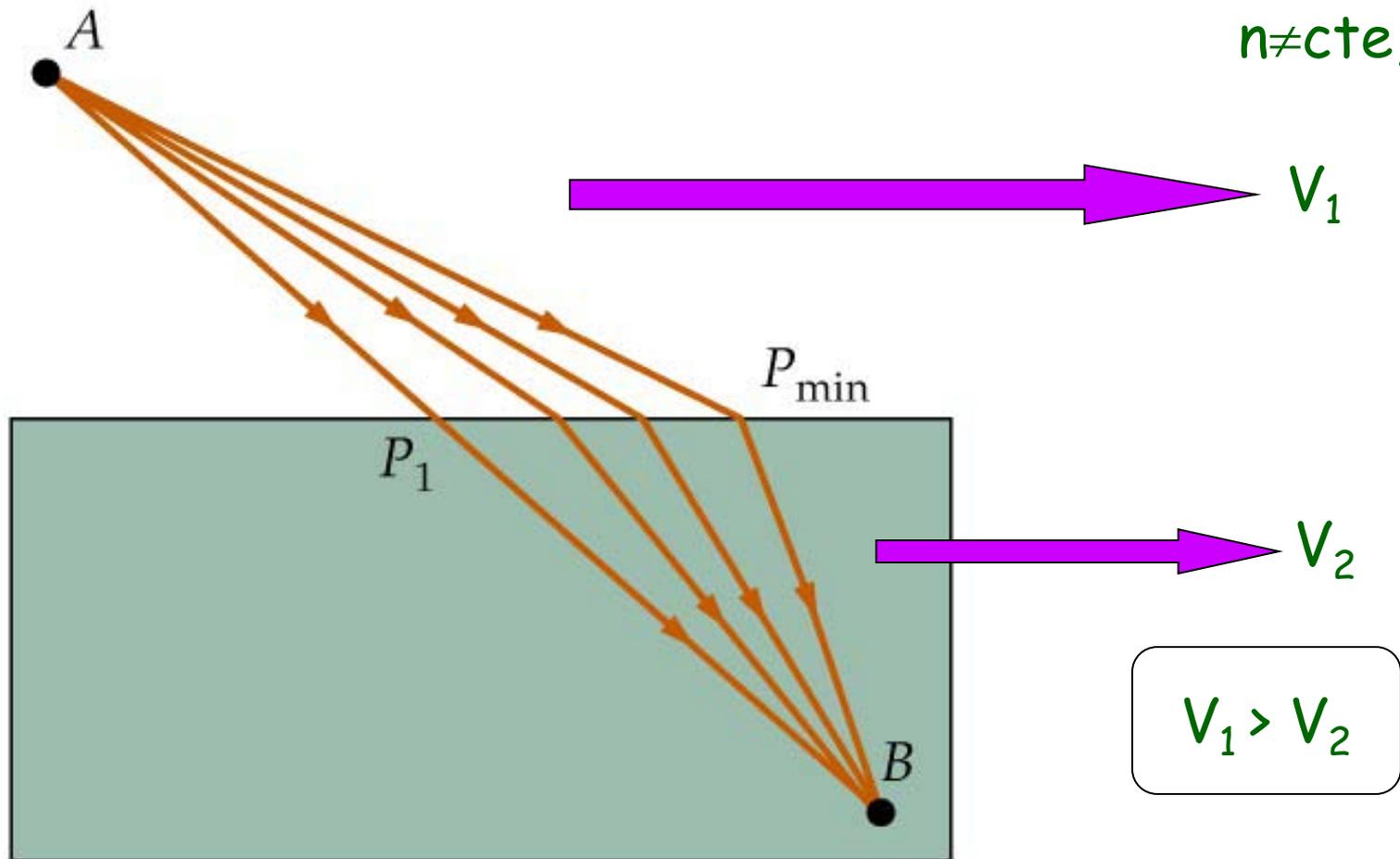
$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Ángulo Límite

Ley de Refracción

La luz pase de A a B en el menor tiempo posible

$n \neq \text{cte,}$



Ley de Refracción

$$t = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} = \frac{n_1 L_1}{c} + \frac{n_2 L_2}{c}$$

¿ P_{\min} ?, de manera que t es mínimo

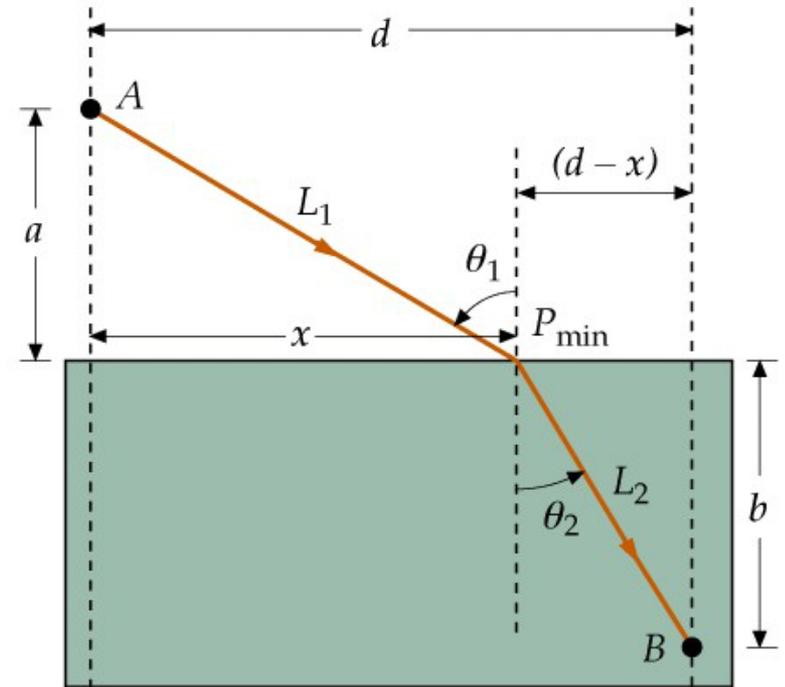
$$t = t(x)$$

$$L_1^2 = a^2 + x^2$$

$$L_2^2 = b^2 + (d - x)^2$$

(I)

$$(II) \quad t = \frac{1}{c} \left(n_1 \sqrt{x^2 + a^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (d - x)^2} \right)$$



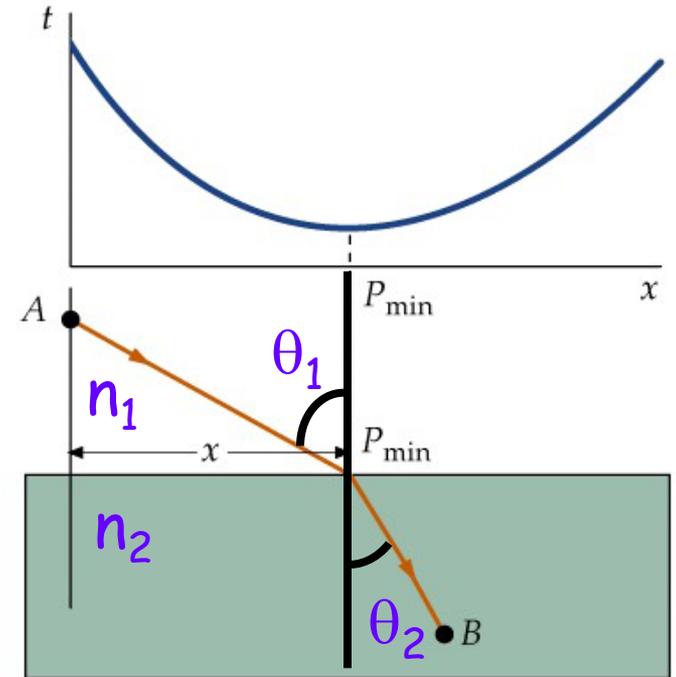
$$\frac{dt}{dx} = 0 \quad \text{(III)}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c} \left(n_1 \frac{dL_1}{dx} + n_2 \frac{dL_2}{dx} \right) = 0 \quad \text{(IV)}$$

$$n_1 \frac{dL_1}{dx} + n_2 \frac{dL_2}{dx} = 0 \quad \text{(V)}$$

$$\frac{dL_1}{dx} = \frac{x}{L_1} = \text{sen } \theta_1 \quad \text{(VI)}$$

$$\frac{dL_2}{dx} = -\frac{d-x}{L_2} = -\text{sen } \theta_2 \quad \text{(VII)}$$

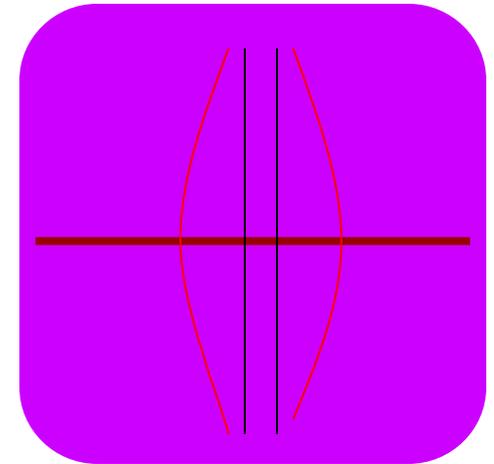
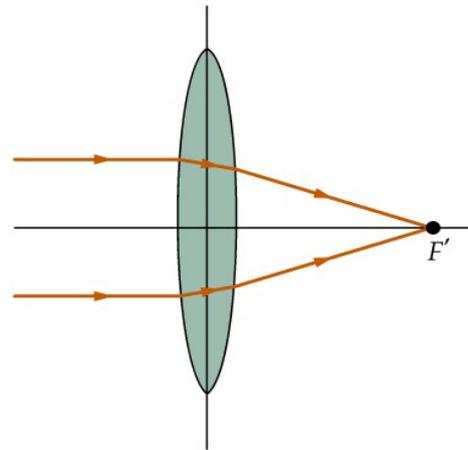
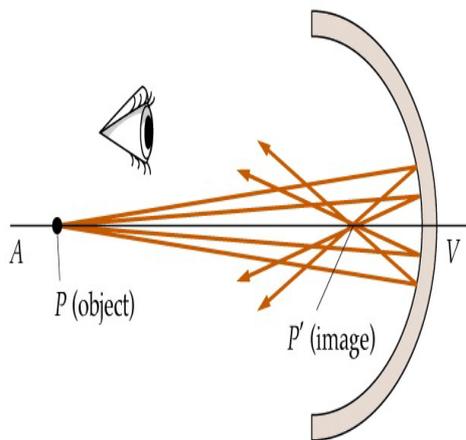


$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$

Ley de Snell

5. Sistemas Ópticos Centrados.

Sistema Óptico: Conjunto de superficies reflectoras y/o refractoras (esféricas o planas si $R=\infty$)



Sistema Óptico Centrado: Sistema óptico de revolución cuyos centros están en una línea que llamaremos eje óptico

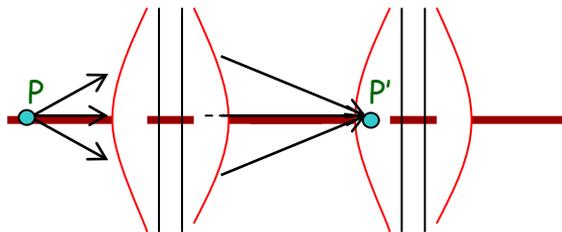
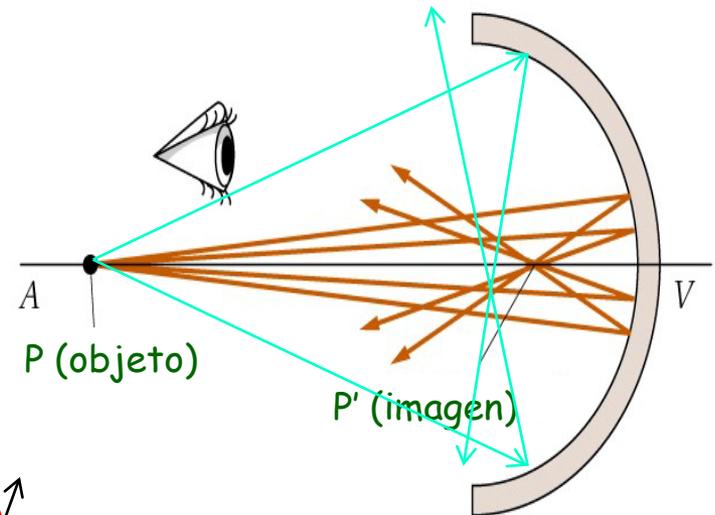
Sist. Ópticos Centrados.

Objeto: Conjunto de puntos emisores de luz.

Imagen: Confluencia de los haces que salen del sistema.

Objetos $\left\{ \begin{array}{l} \text{reales} \\ \text{virtuales} \end{array} \right.$

Imágenes $\left\{ \begin{array}{l} \text{reales} \\ \text{virtuales} \end{array} \right.$



Objeto real/virtual

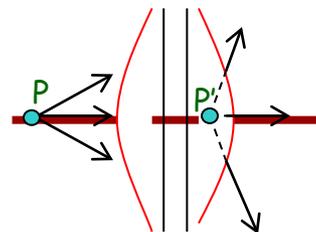
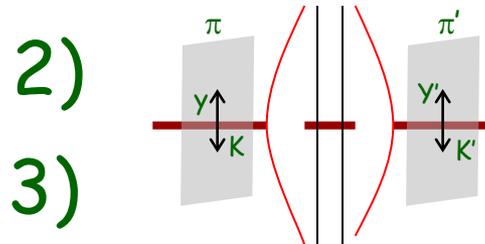
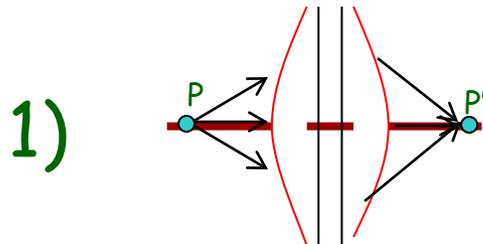


Imagen virtual

¿Cuándo la imagen formada por un S.O. es buena?

Condiciones de Maxwell para un Sistema Perfecto

1. Los rayos de luz que parten de un punto situado en el espacio objeto, convergen real o virtualmente en otro punto a la salida del S.O.
2. La imagen de un plano objeto perpendicular al eje del sistema, es otro plano perpendicular al eje.
3. Se mantiene una relación de semejanza entre las distancias del plano objeto y las distancias del plano imagen

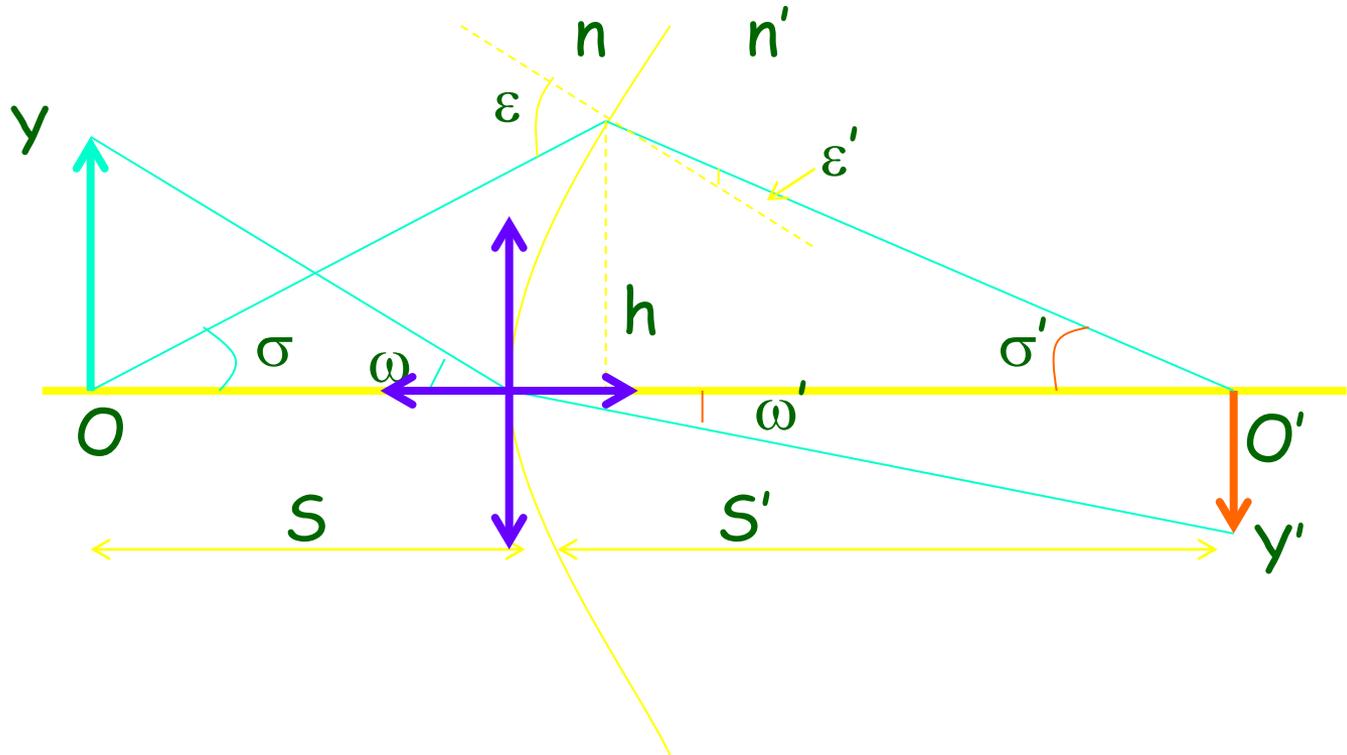


$$\frac{y'}{y} = \frac{k'}{k}$$

Criterio de signos

Distancias: ejes coordenados

$$\begin{cases} (+), Y, h, S' \\ (-), Y', S \end{cases}$$



Ángulos:

- Incidencia o refractados (+), hacia la normal, sentido horario: $\varepsilon, \varepsilon'$ (-): ω, ω'
- Con el E.O. (-), hacia el E.O, sentido horario: σ , (+): σ'

Superficie convexa si $r > 0$, cóncava $r < 0$

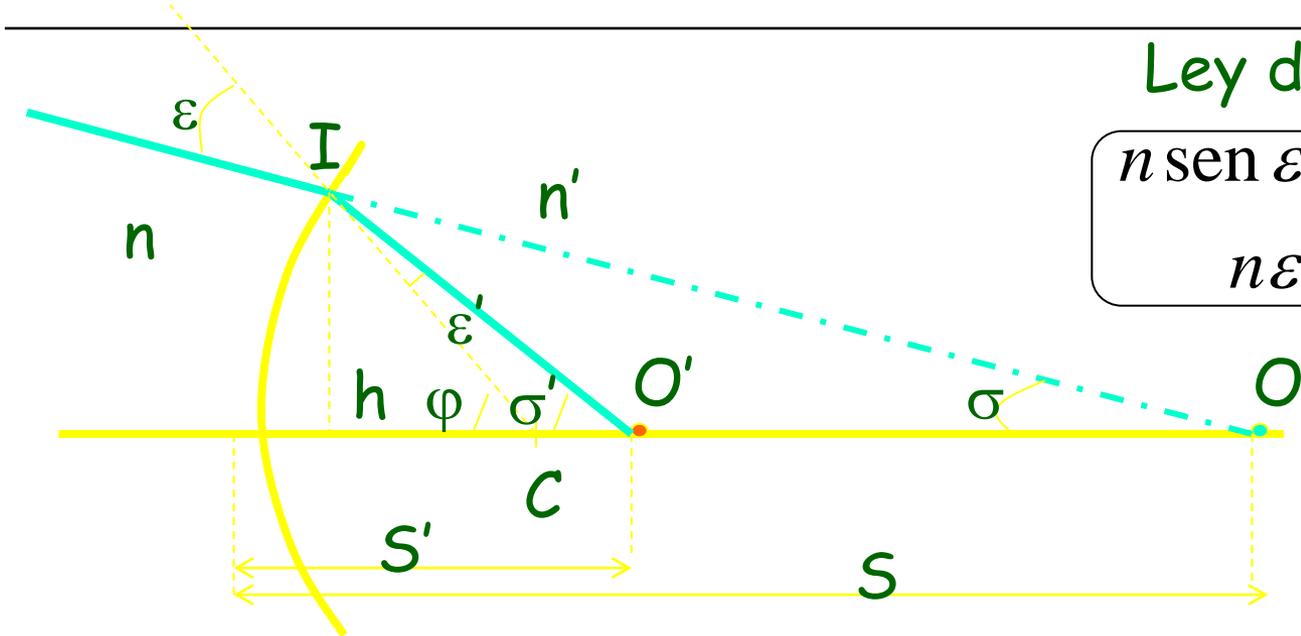
$n, n', r, \text{és y } s'?$

Invariantes de un sist.
La esfera en zona paraxial

Ley de Snell

$$n \operatorname{sen} \varepsilon = n' \operatorname{sen} \varepsilon'$$

$$n \varepsilon = n' \varepsilon'$$



\triangle
ICO

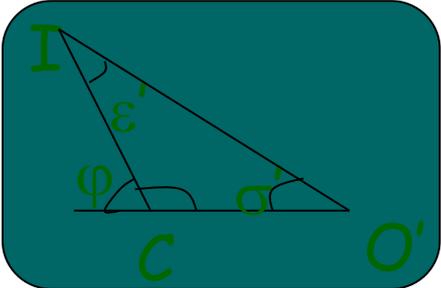
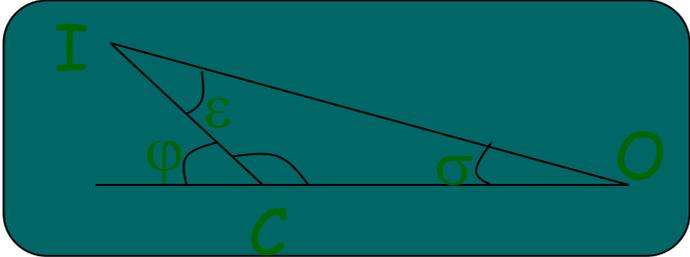
$$\pi = \sigma + \varepsilon + (\pi - \varphi) \Rightarrow$$

$$\varepsilon = \varphi - \sigma$$

\triangle
ICO'

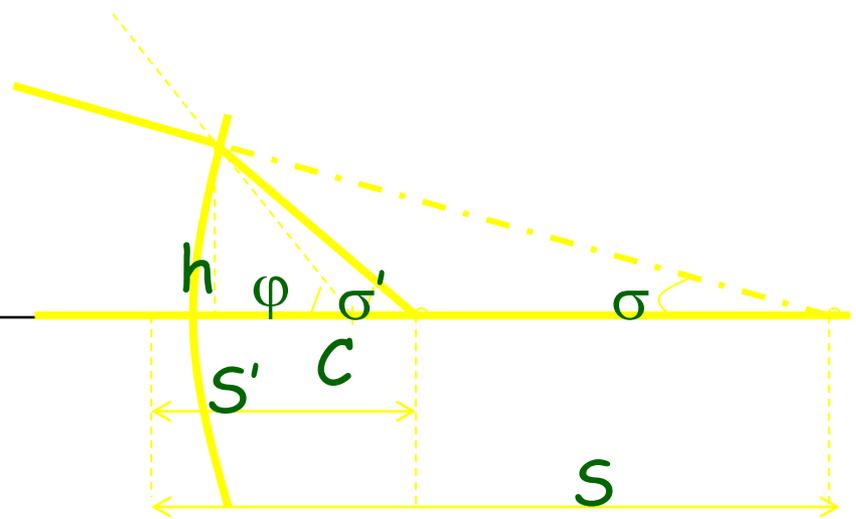
$$\pi = \sigma' + \varepsilon' + (\pi - \varphi) \Rightarrow$$

$$\varepsilon' = \varphi - \sigma'$$



Ley de Snell

$$n(\varphi - \sigma) = n'(\varphi - \sigma')$$



$$\varphi = \frac{h}{r}; \sigma = \frac{h}{S}; \sigma' = \frac{h}{S'}$$

$$n\left(\frac{h}{r} - \frac{h}{S}\right) = n'\left(\frac{h}{r} - \frac{h}{S'}\right)$$

$$n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S'}\right)$$

Invariante de
Abbe

$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S'} \right)$$

Invariante de Abbe

Casos Particulares

✓ Superficie plana
refractante: $r = \infty$

$$S' = \frac{n'}{n} S$$

✓ Espejo Esférico: $n' = -n$

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{2}{r}$$

✓ Espejo Plano:

$$r = \infty$$

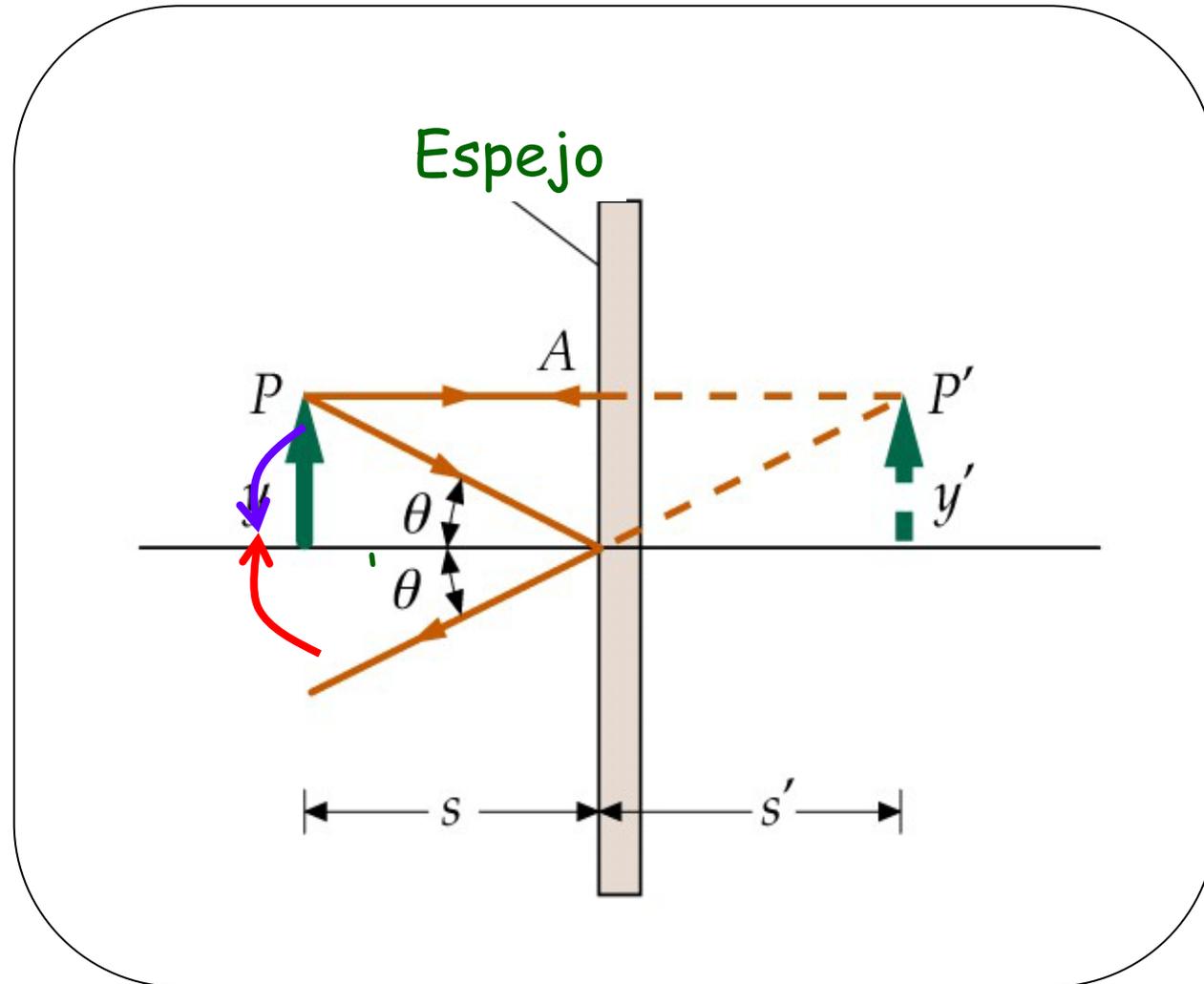
$$n' = -n$$

$$S' = -S$$

Imágenes formadas por Reflexión

✓ Espejo Plano: $r = \infty$ $n' = -n$

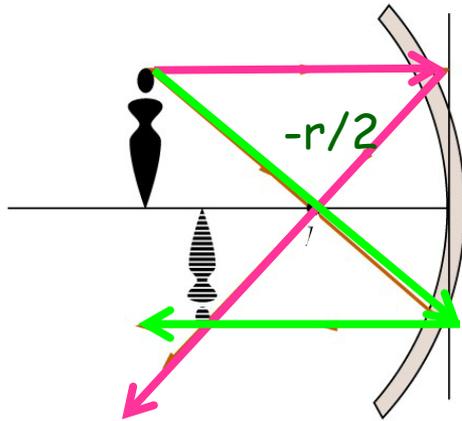
$$S' = -S$$



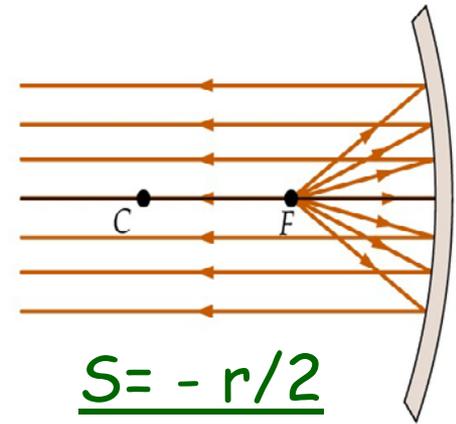
Imágenes formadas por Reflexión

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{2}{r}$$

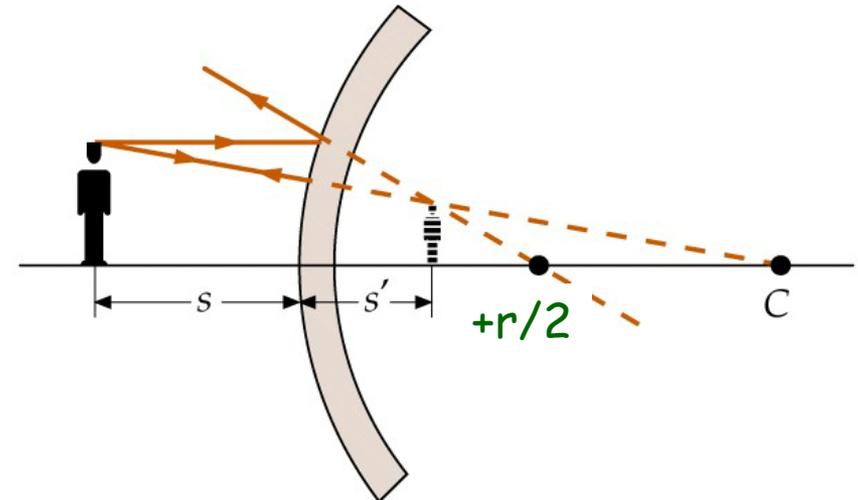
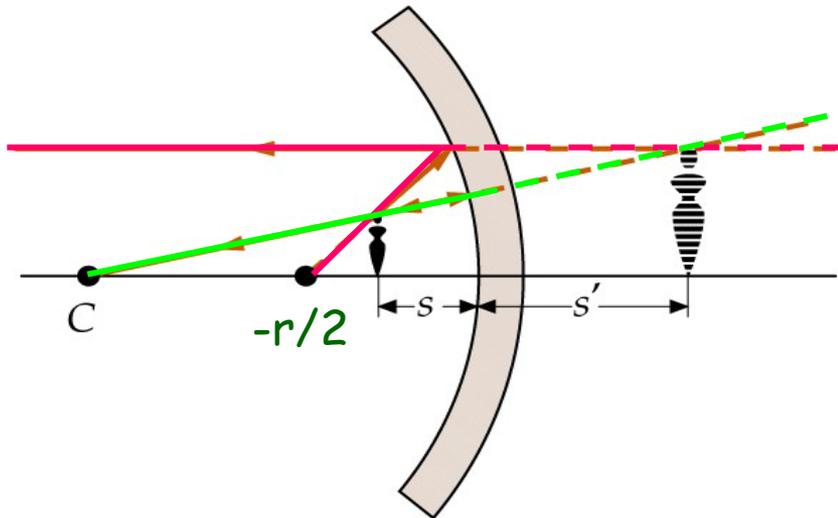
✓ Espejo Esférico: $n' = -n$



$S = -\infty$



FOCO \rightarrow $S = -r/2$

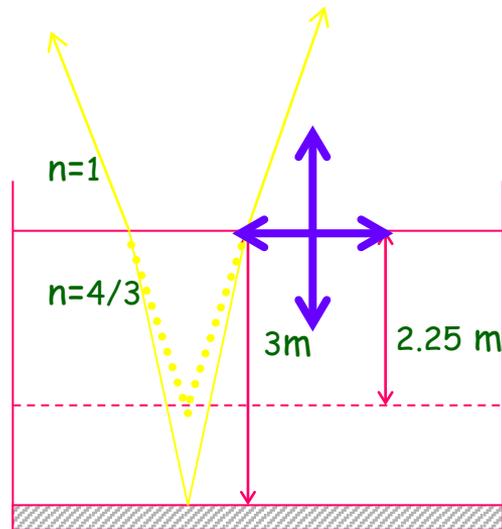


Imágenes formadas por Refracción

✓ Superficie Plana: $R=\infty$

$$S' = \frac{n'}{n} S$$

$$S' = \frac{1}{4/3} (-3) = -2.25$$



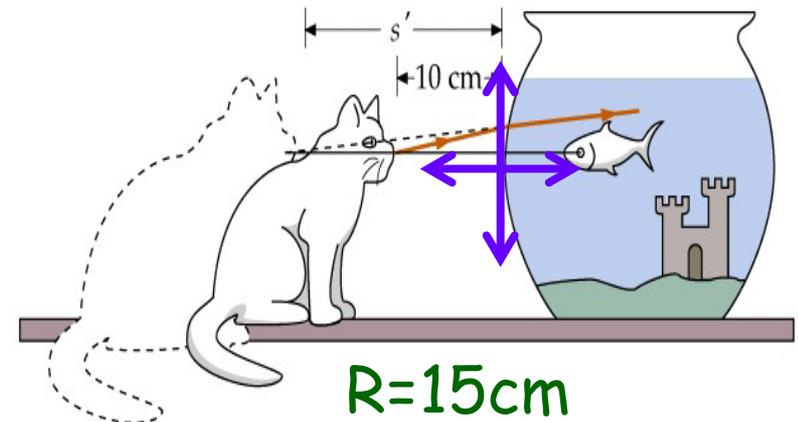
Profundidad aparente

✓ Superficie esférica:

$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S'} \right)$$

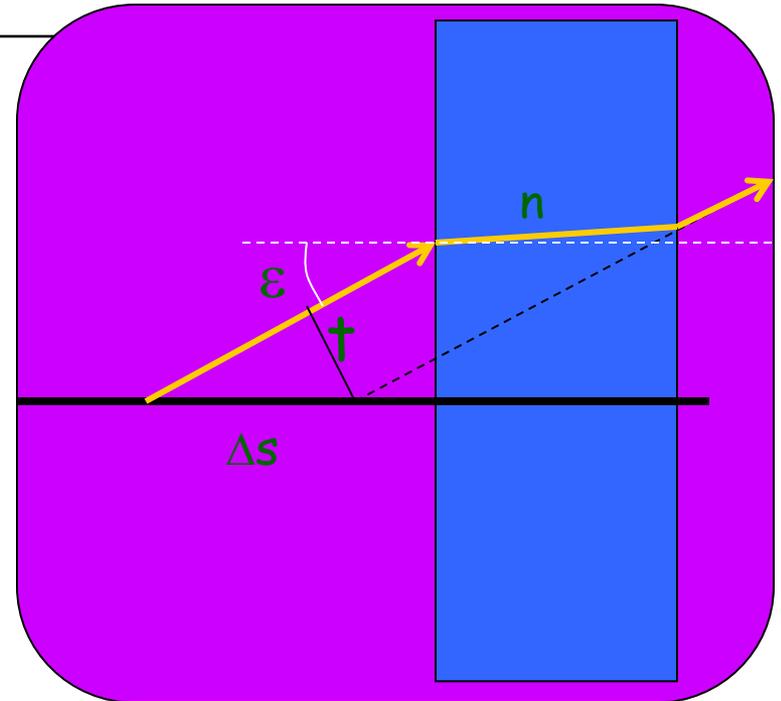
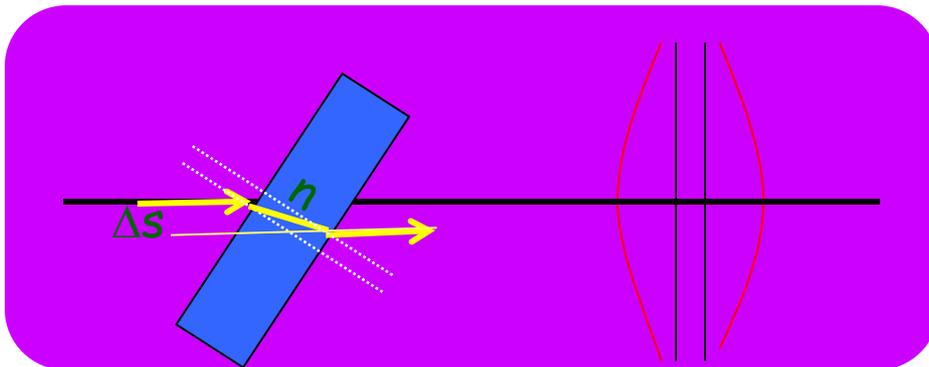
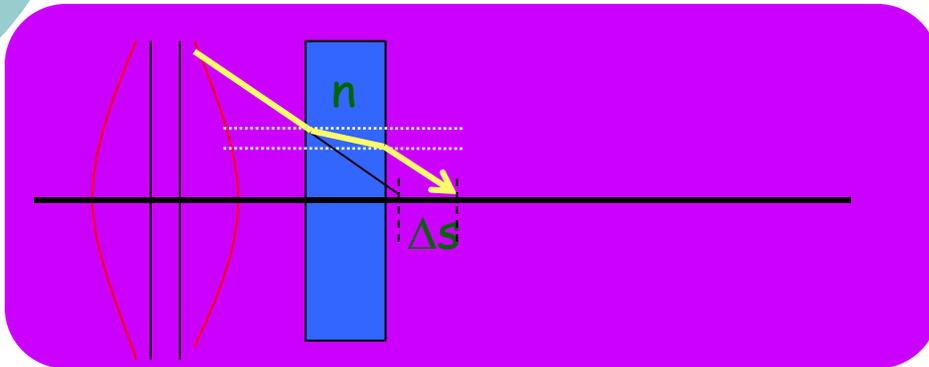
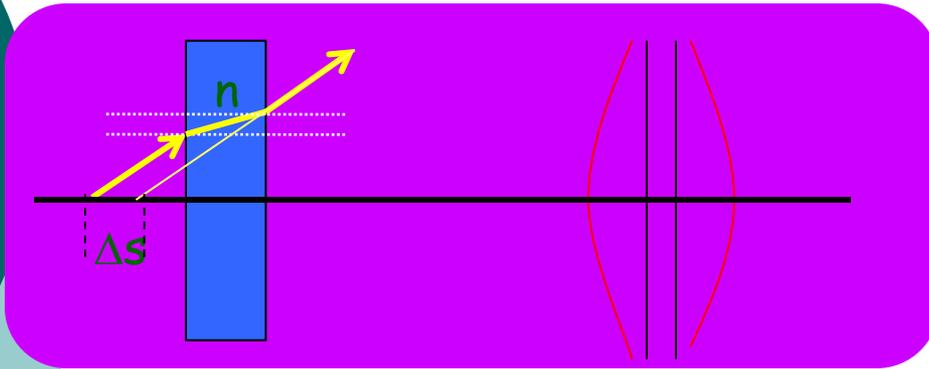
$$1 \left(\frac{1}{15} - \frac{1}{(-10)} \right) = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{15} - \frac{1}{S'} \right)$$

$$S = -17.1$$



$$R=15\text{ cm}$$

S.O. con Superficies Planas: Láminas Planoparalelas

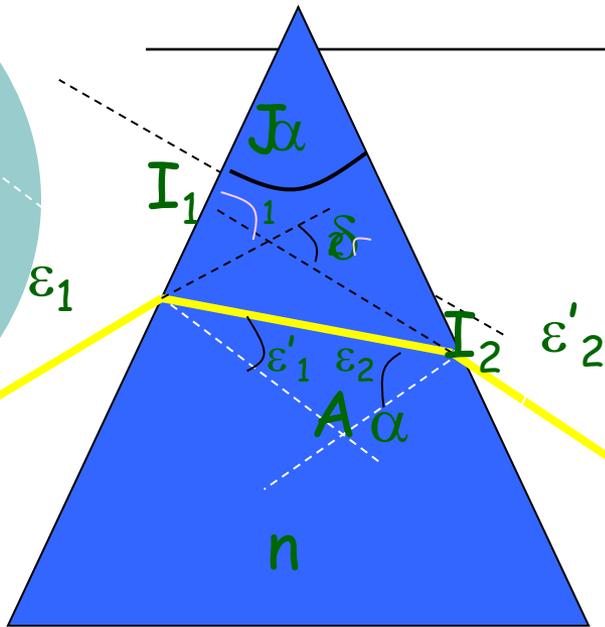


$$\Delta s = \frac{t}{\text{sen } \epsilon}$$

S.O. con Superficies Planas: Prismas

$\triangle I_1 I_2 A$

$$\alpha = \varepsilon'_1 + \varepsilon_2$$

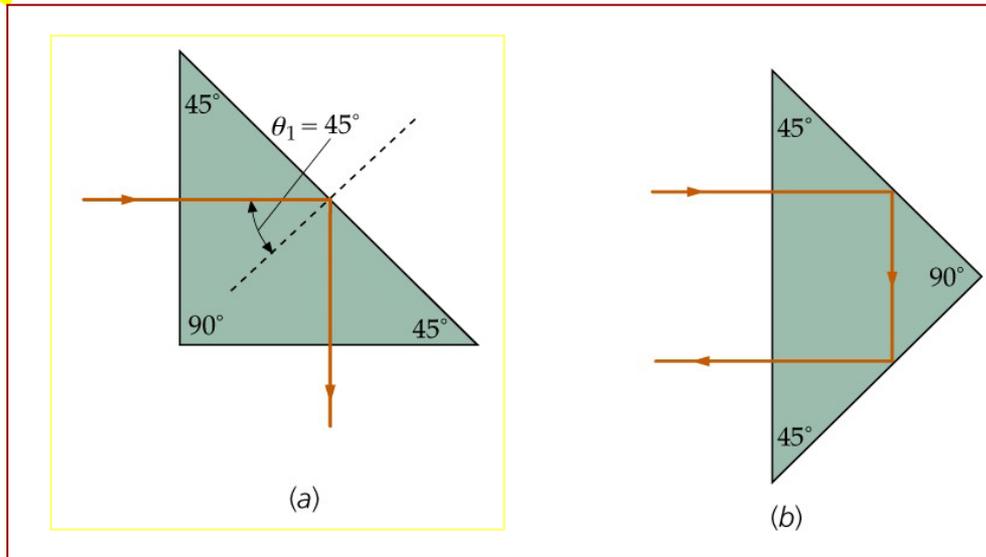


$\left. \begin{array}{l} |\varepsilon_2| > \varepsilon_1 \\ |\varepsilon'_1| > \varepsilon_1 \end{array} \right\}$ No existe rayo emergente
 $|\alpha| > 2\varepsilon_1$ No existe rayo emergente

$\triangle I_1 I_2 J$

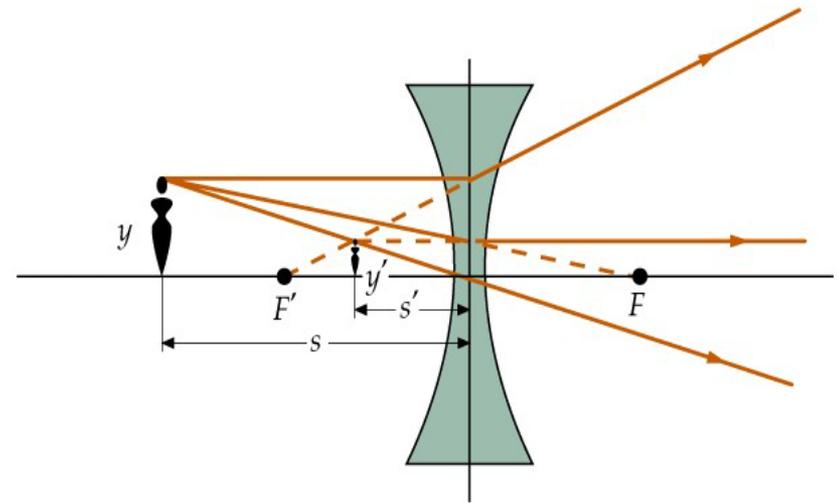
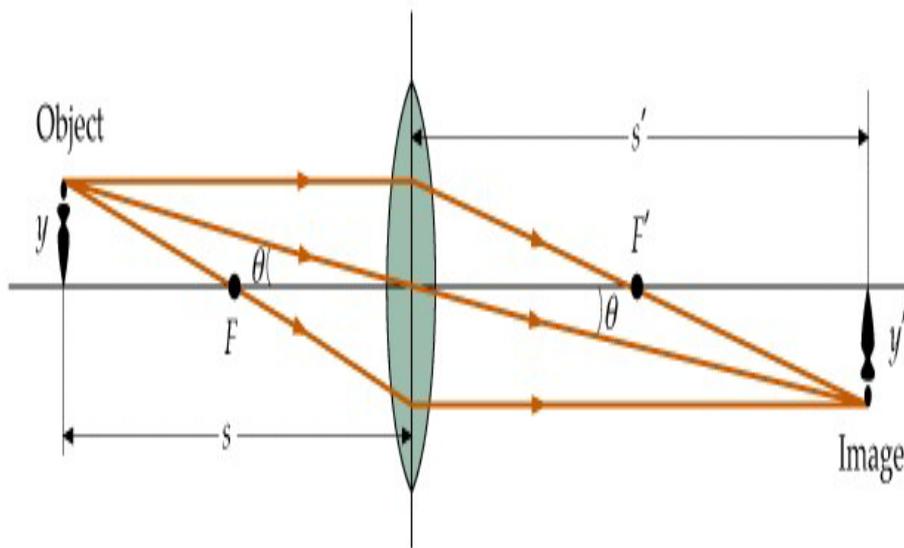
$$\delta = \varepsilon_1 + \varepsilon'_2 - \alpha$$

Desviación angular



S.O. con Superficies Esféricas: Lentes

Una lente delgada es un sistema óptico de índice n acoplado entre dos medios de igual índice, normalmente $n' = 1$, formado por dos superficies esféricas de radios r_1 y r_2 y cuyo espesor es despreciable.



S.O. con Superficies Esféricas: Lentes

La imagen que una lente produce se determina calculando (por aplicación del invariante de Abbe):

- Primero la imagen del objeto por la 1ª superficie.
- Y luego, esta imagen será el objeto para la 2ª superficie.

$$1 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{s_1} \right) = n \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{s'_1} \right)$$

Llamando:

$$\begin{aligned} s_1 &= s \\ s'_1 &= s_2 \\ s'_2 &= s' \end{aligned}$$

$$n \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{s_2} \right) = 1 \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{s'_2} \right)$$

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Fórmula del Constructor de Lentes

$$\frac{1}{x_o} + \frac{1}{x_i} = \left(\frac{n_{lente}}{n_{medio}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Donde x_o : distancia del objeto al plano de la lente

x_i : distancia del plano de la lente a la imagen

Cuando el objeto está en el infinito, la imagen se forma en el foco y viceversa, cuando el objeto está en el foco, la imagen se forma en el ∞ .

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f_i} = \frac{1}{f_i} = \left(\frac{n_{lente}}{n_{medio}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \rightarrow \quad f_o = f_i = f$$

$$\frac{1}{f_o} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{f_o} = \left(\frac{n_{lente}}{n_{medio}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Y dado que $1/f$ es igual al segundo miembro de la fórmula del constructor de lentes, de lo anterior surge la fórmula de gauss para lentes delgadas:

$$\frac{1}{x_o} + \frac{1}{x_i} = \frac{1}{f}$$

S.O. con Superficies Esféricas: Lentes

Definimos las distancias focales de una lente:

$$\text{Si } s = -\infty \Rightarrow s' = f' \Rightarrow \frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\text{Si } s = f \Rightarrow s' = \infty \Rightarrow \frac{1}{f} = - (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Definimos la potencia de una lente como el inverso de la focal (medida en m^{-1} , llamados dioptrías):

$$\boxed{\varphi' = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}$$



Óptica

Óptica Geométrica

Ley de la Reflexión y Refracción

Ley de Snell
aproximación Paraxial

Invariante de Abbe

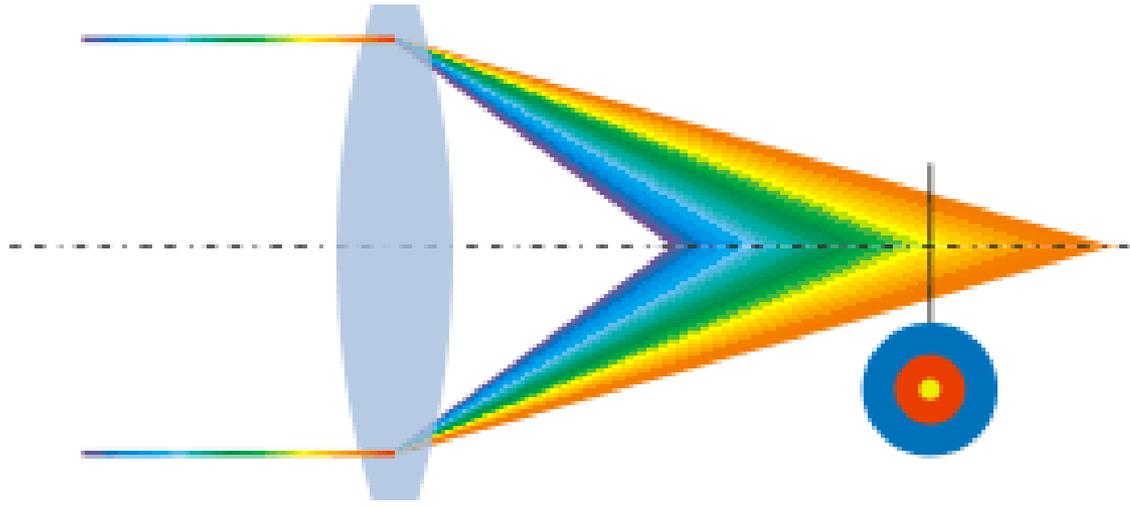
Sistemas Simples

Instrumentos Ópticos

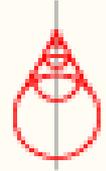
- El ojo
- La Lupa o "Microscopio Simple"
- El Microscopio Compuesto
- El Telescopio
- Cámaras, Proyectores, etc...



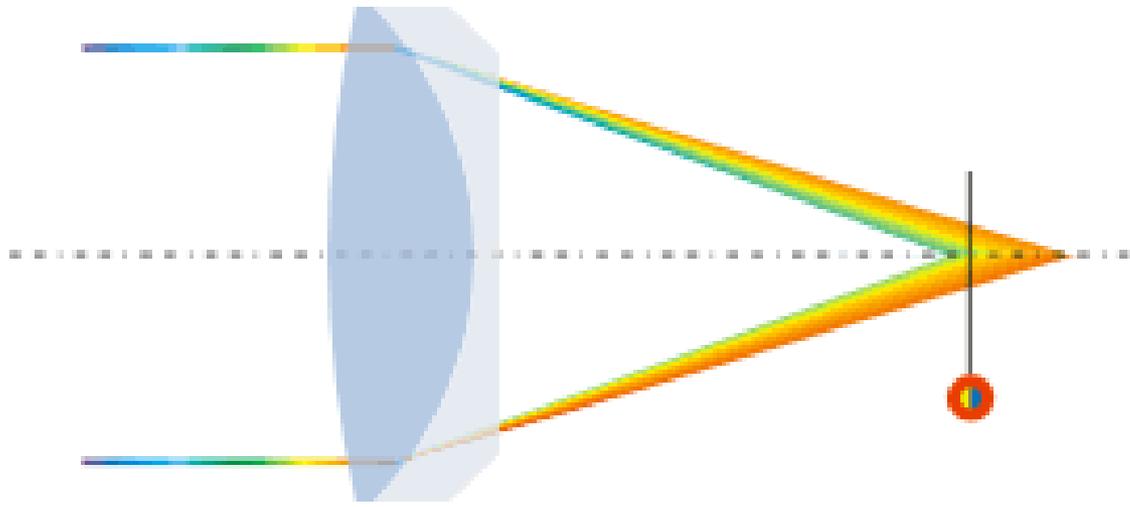
1



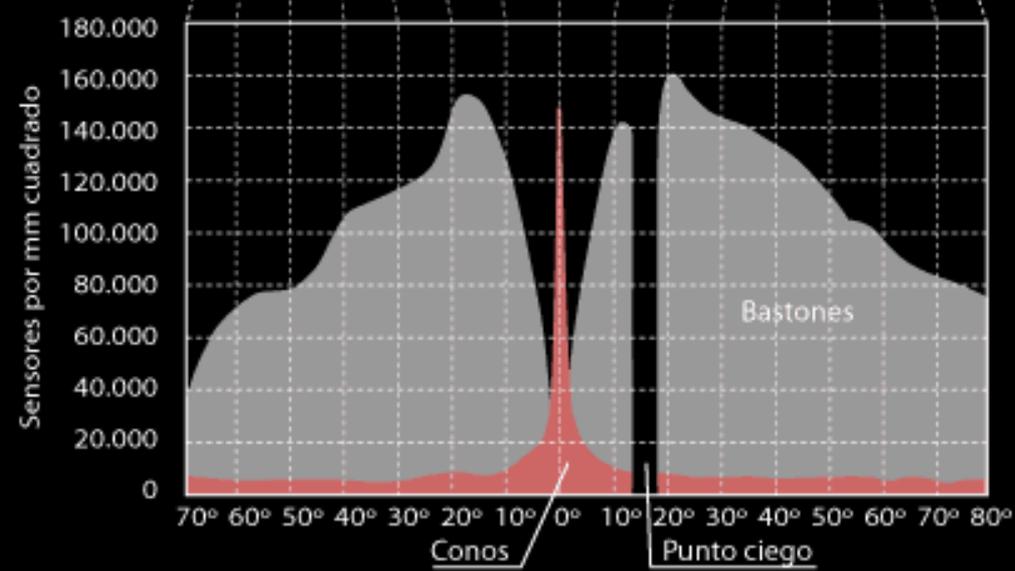
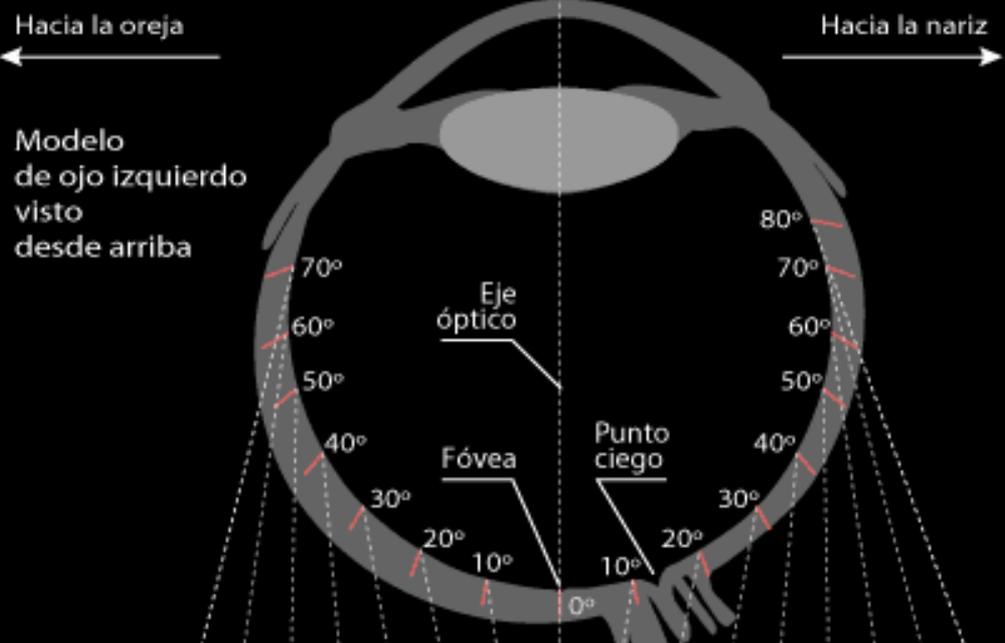
Image



2

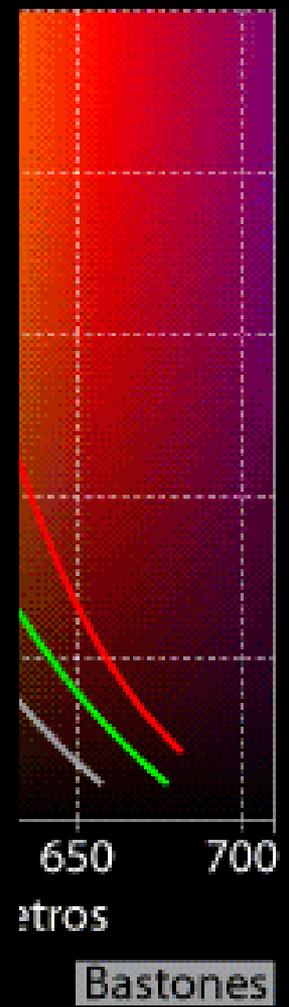


Distribución de conos y bastones en la retina según ángulo visual



Conos

Profunda



Bastones



Zona exterior del ojo

Células fotorreceptoras

Fundas

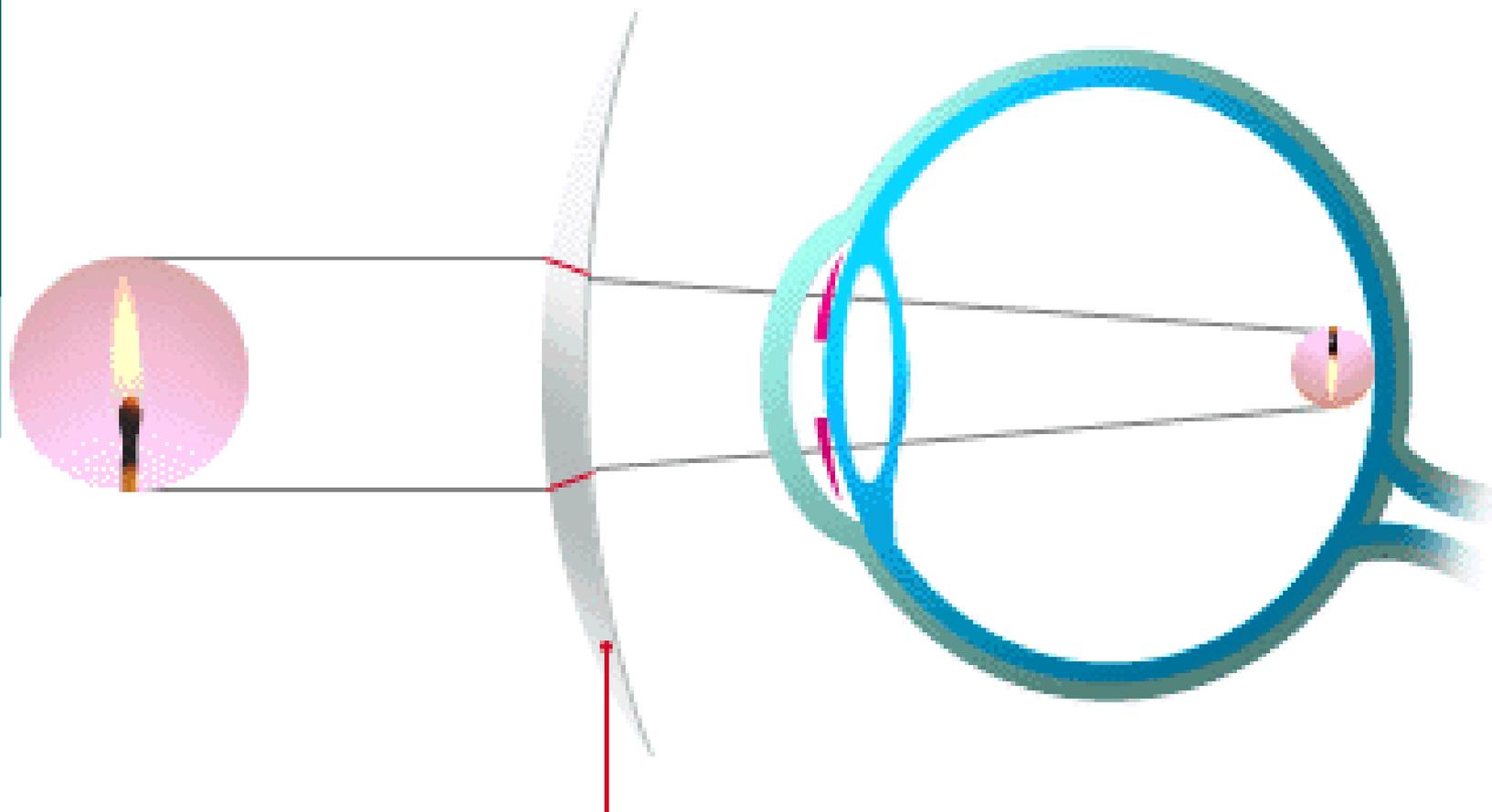
Formación de imágenes en el ojo

El ojo es un Sistema Óptico con:

$f \sim 17\text{mm} \rightarrow P \sim 59$ dioptrías

Ojo Emétrope

- Ojo Emétrope:
 - Ojo con visión normal
 - Punto próximo: 25cm (menor en niños)
 - Punto remoto: Infinito



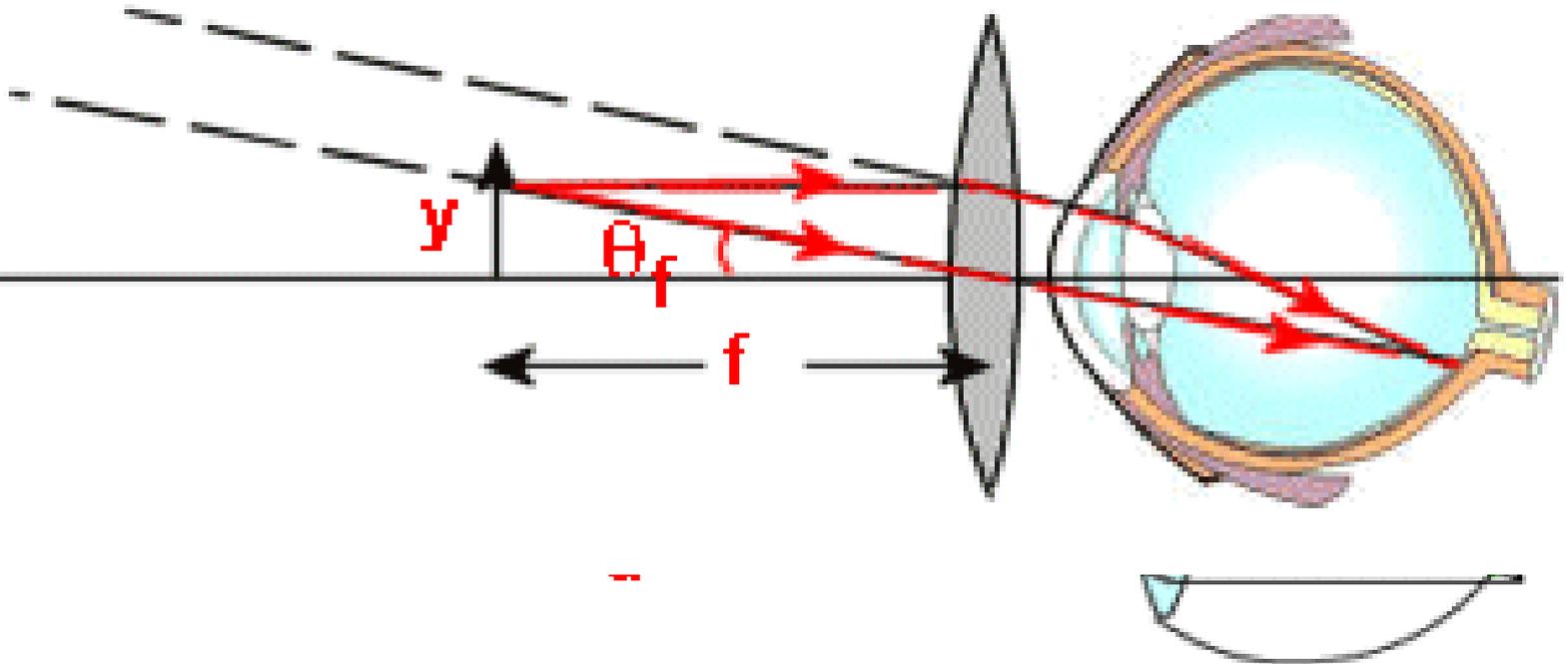
Una lente menisco convergente

Una lente menisco divergente

Efectos Ópticos



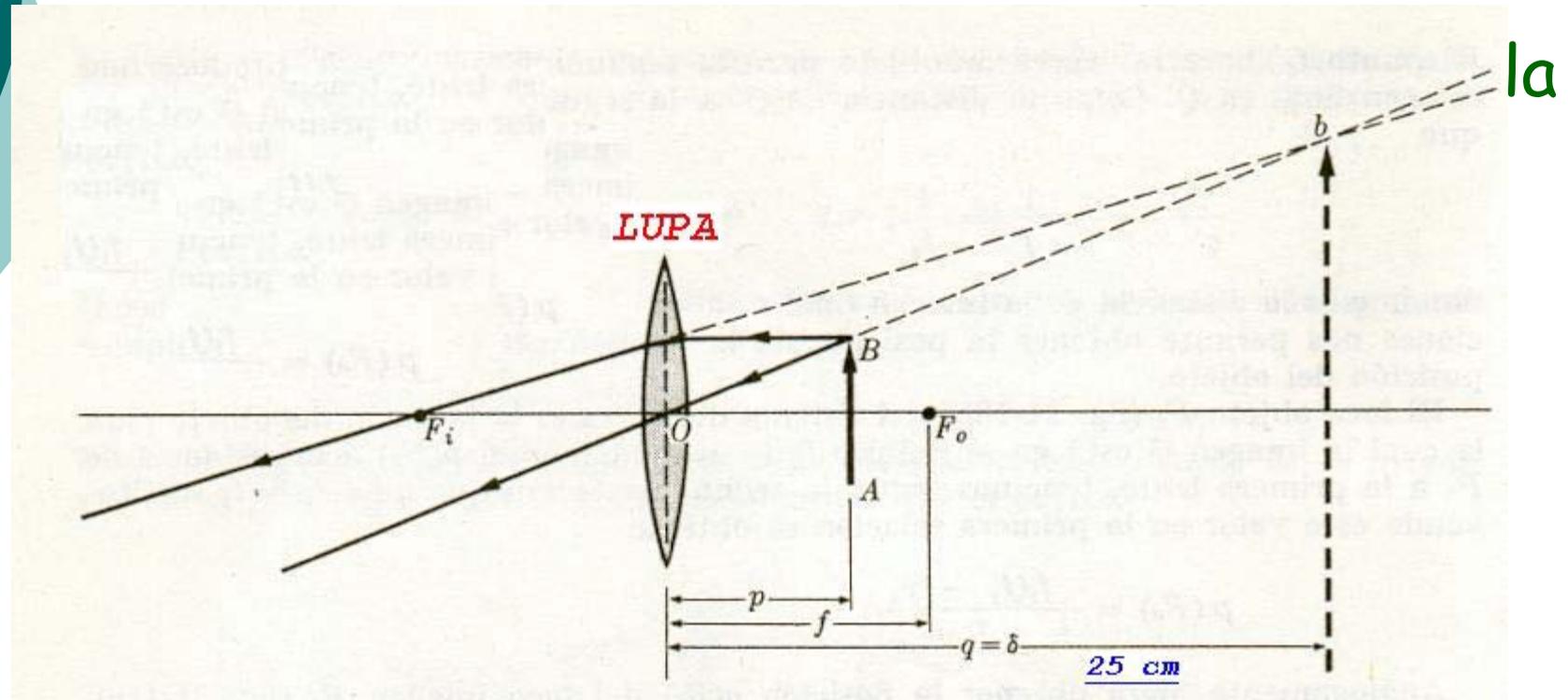
La Lupa - Microscopio Simple



- Lo más cómodo es poner el objeto en foco
- El aumento angular es:

$$M = \frac{\theta_f}{\theta_i} = \frac{x}{f}$$

Lupa - Aumento máximo



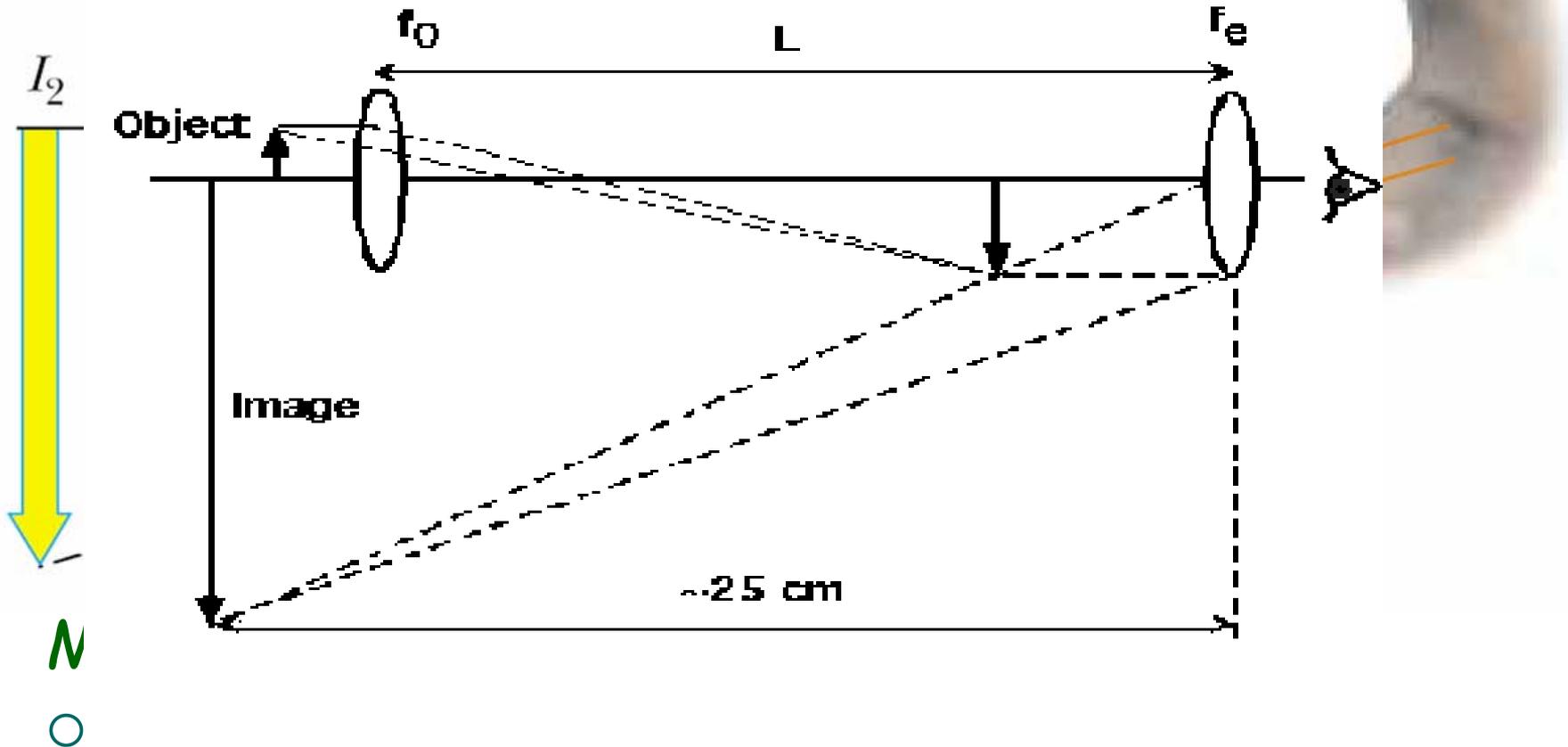
- Con Microscopio Simple se pueden conseguir aumentos entre 4 y 20.

Microscopio Composto

Microscope:

$$M_{\text{total}} = M_o \cdot M_e$$

where $M_o \sim L/f_o$ and $M_e \sim 25 \text{ cm}/f_e$



Microscopio

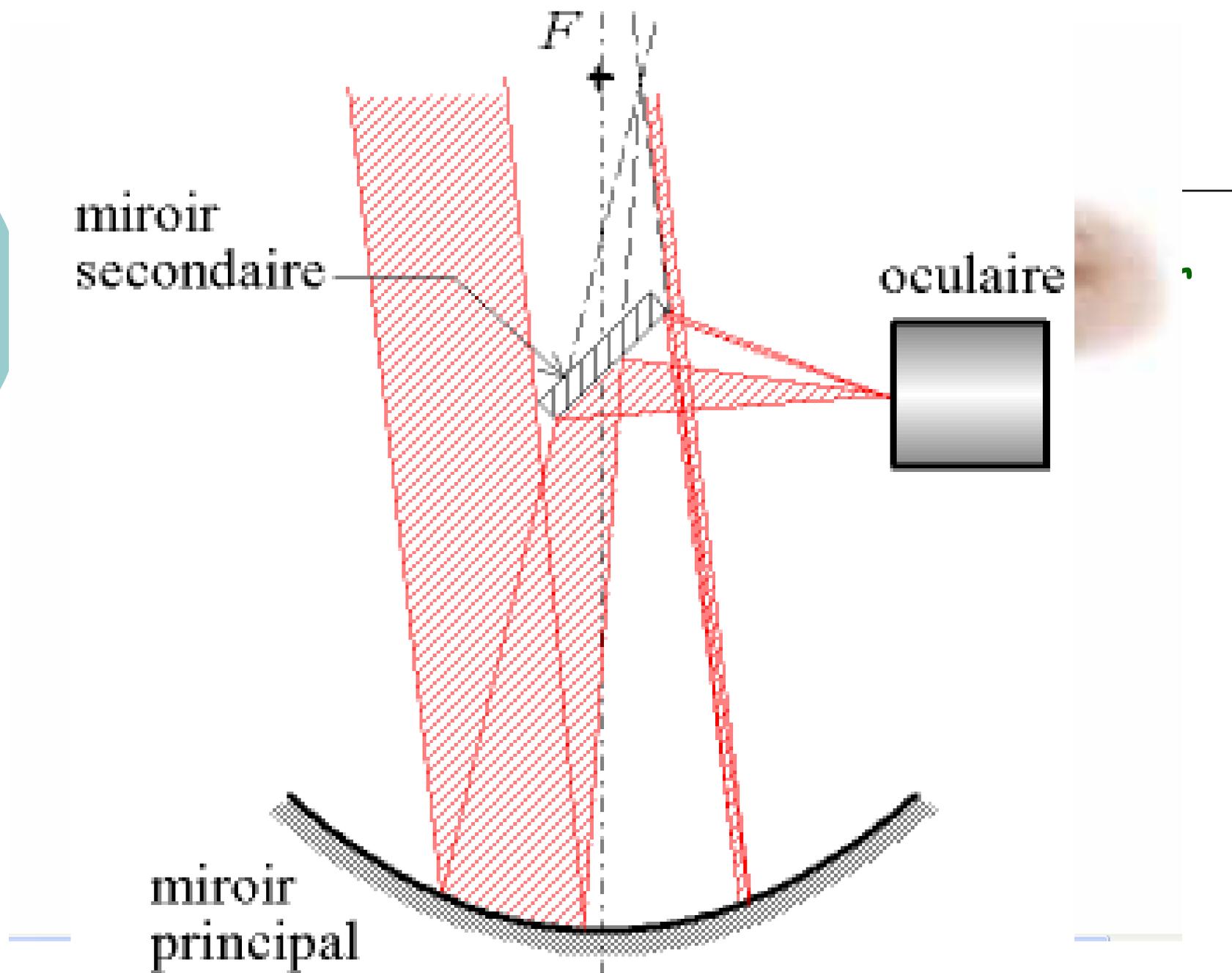


miroir
secondaire

oculaire

miroir
principal

F



Telescopio

