

Óptica geométrica

En el capítulo anterior...

Lentes...3 rayos

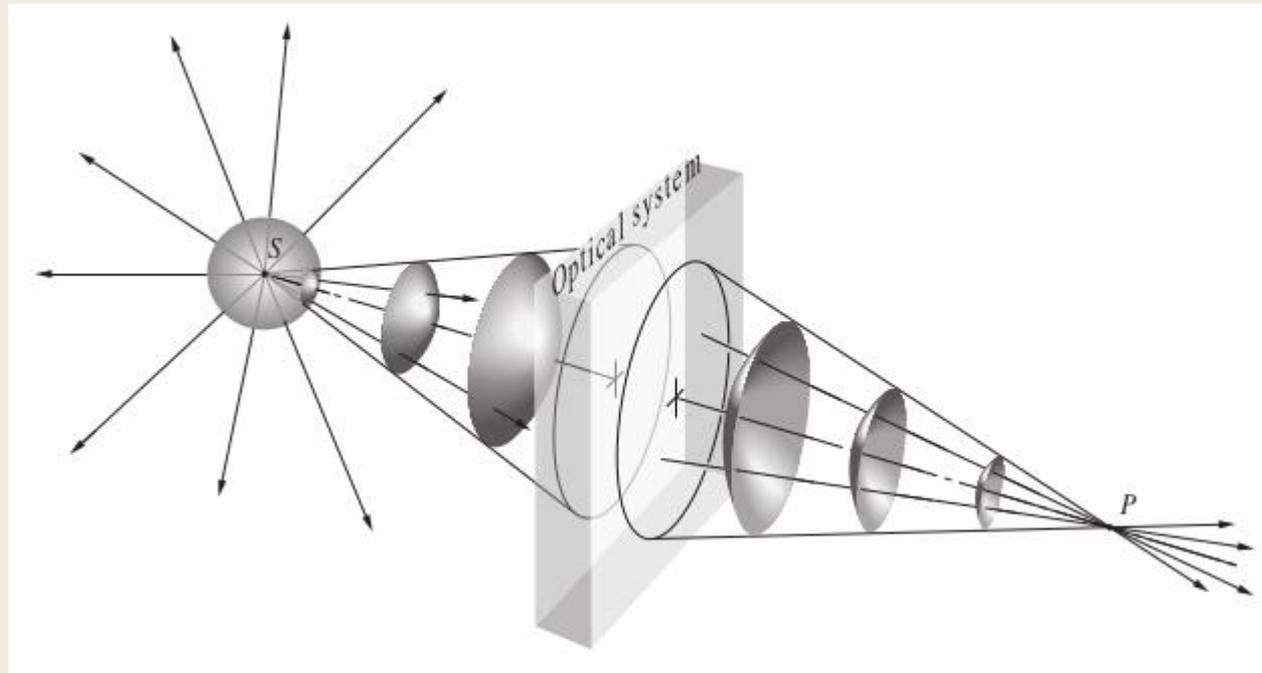
Prismas

Espejos

O de cómo seguir manejando rayos para que hagan lo que uno quiera

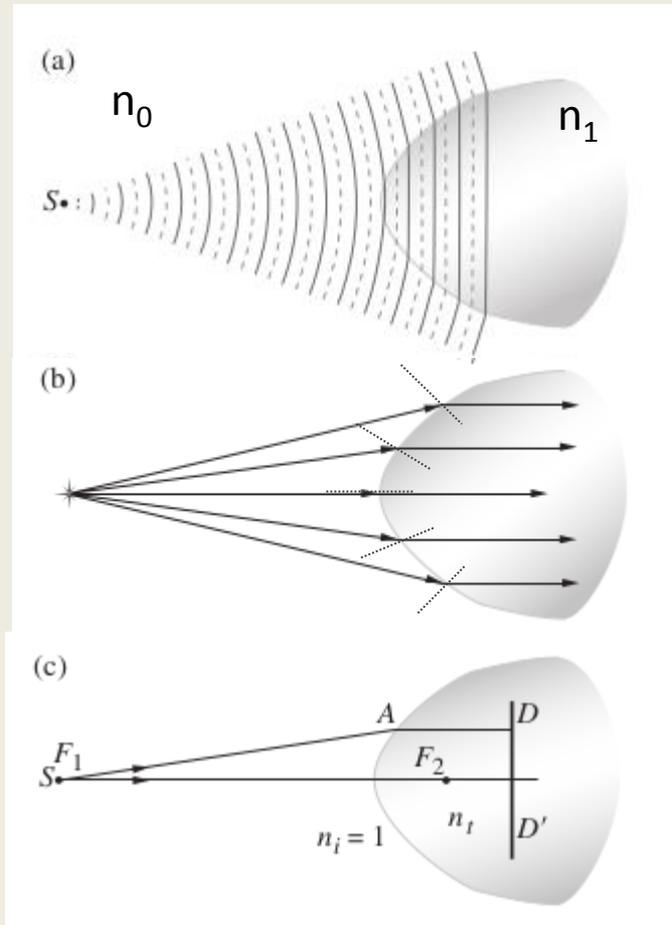
En el capítulo anterior...

Deformando frentes de onda



En el capítulo anterior...

Usando dióptras (interfases)



La combinación de geometría (una hipérbola en este caso) y cambio de velocidad de propagación ($n_1 > n_0$) da lugar a la deformación del frente de ondas de una manera particular

Esto también puede ser descrito en el lenguaje de rayos y Snell

Y también es consistente con Fermat!

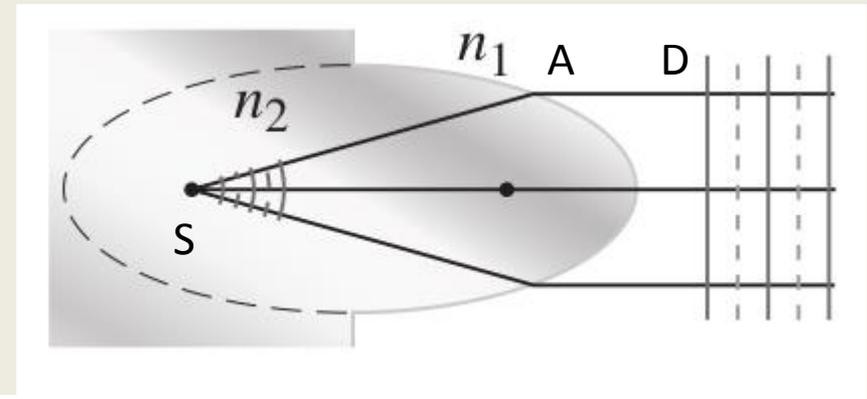
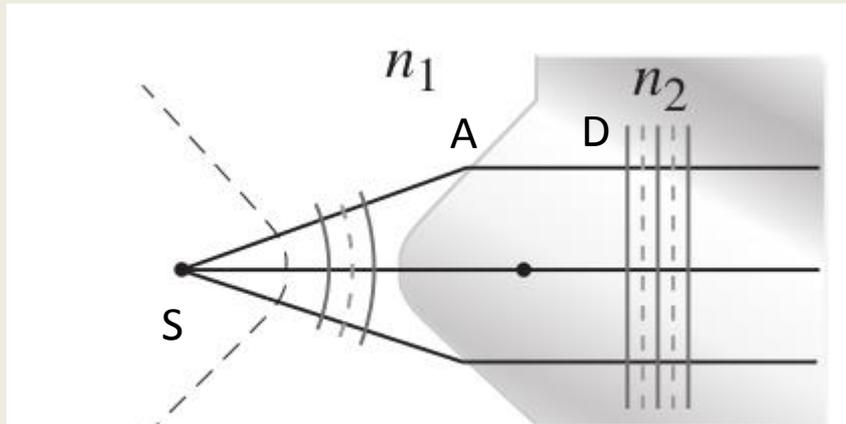
La trayectoria de la luz entre dos puntos es la que minimiza el tiempo de recorrido o lo que es lo mismo, la longitud de camino óptico.

La hipérbola tiene “justo” una forma tal que la longitud de camino óptico de cualquier rayo que parta de S y llegue a algún punto del frente DD' sea el mismo.

Esto asegura que todos los rayos de S lleguen en fase al plano DD' y definan por tanto un frente de onda plano.

En el capítulo anterior...

Dióptras que transforman ondas esféricas en ondas planas



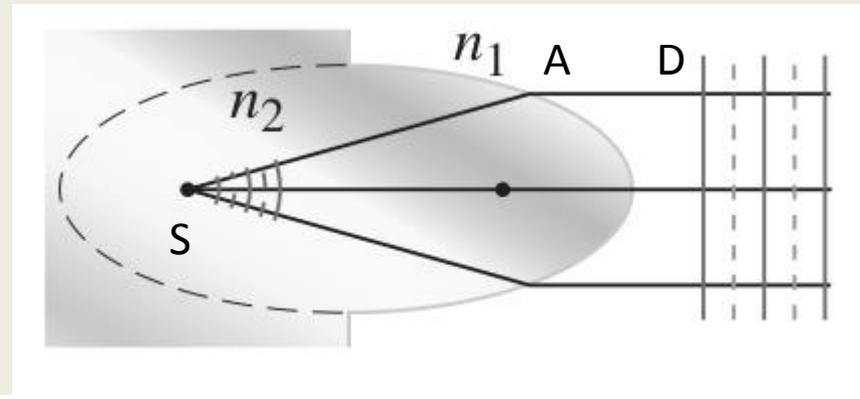
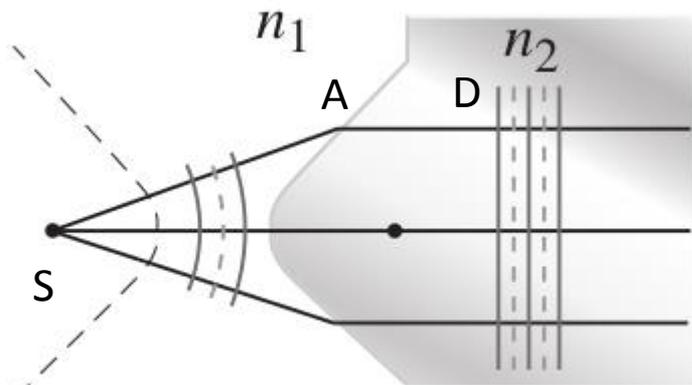
Planteo que LCO de rayos de S que llegan al frente de onda D tiene que ser el mismo.

LCO $n_i |SA| + n_t |AD| = cte$, para todo rayo que pase por A sobre la interfase

Curva de puntos que cumplen que la suma de distancias respecto a un punto (S) y a una recta directriz (D) se mantiene constante son: **hiperbolas** o **elipses**

En el capítulo anterior...

Dióptras que transforman ondas esféricas en ondas planas



Planteo que LCO de rayos de S que llegan al frente de onda D tiene que ser el mismo.
LCO $n_i |SA| + n_t |AD| = cte$, para todo rayo que pase por A sobre la interfase

$$|SA| + \frac{n_t}{n_i} |AD| = cte'$$

$$n_t > n_i$$

$$e > 1$$

$$|SA| + e |AD| = cte'$$

$$n_t < n_i$$

$$e < 1$$

Los puntos A describen una hipérbola
(me lo dijo mi primo que es matemático)

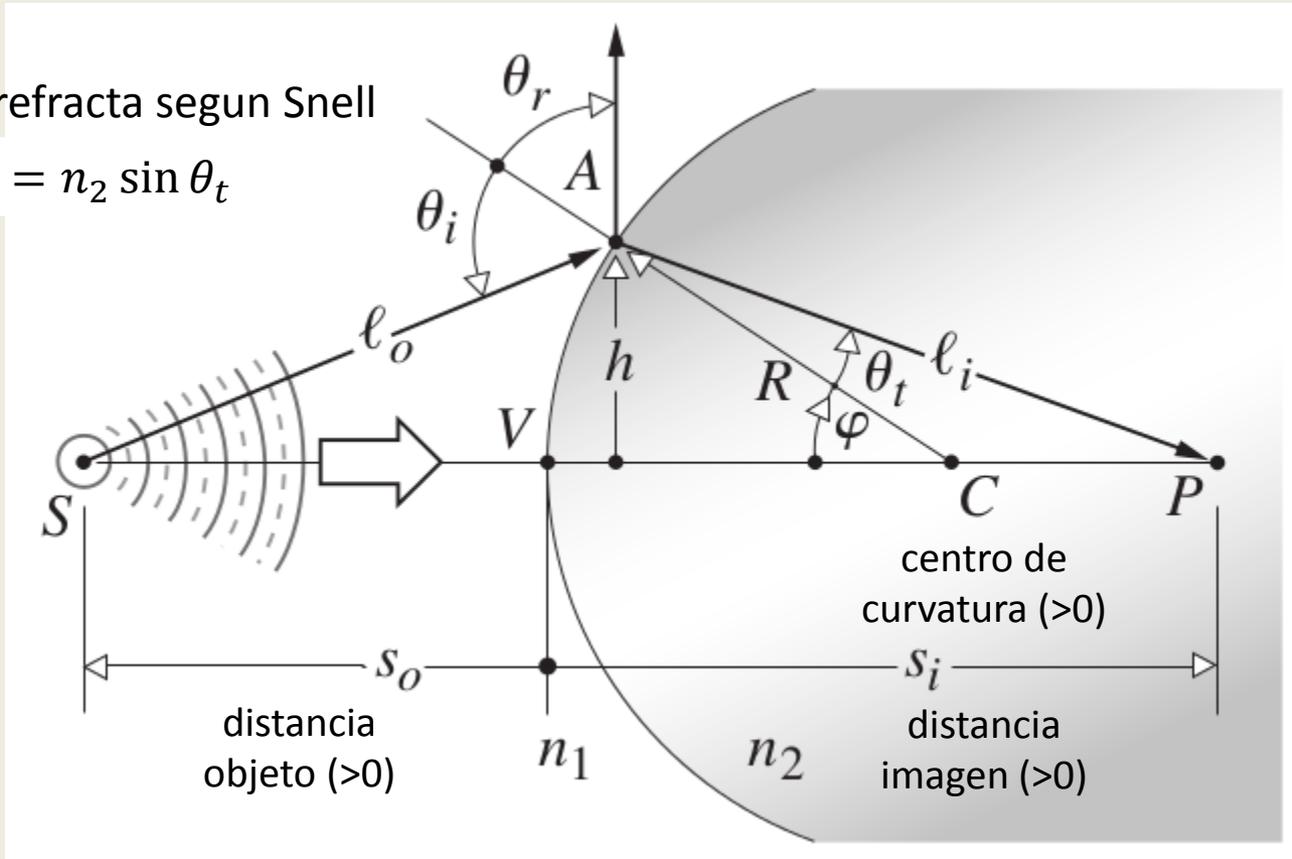
Los puntos A describen una elipse
qué ve alguien que observa desde la derecha?

En el capítulo anterior...

Que sea esférica!

Cada rayo se refracta según Snell

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$



Cómo podemos relacionar las posiciones del **objeto**, la **imagen** y la **geometría de la interfase**?

$$LCO = n_1 l_o + n_2 l_i$$

En el capítulo anterior...

Dióptrica Esférica

$$LCO = n_1 l_o(\varphi) + n_2 l_i(\varphi)$$

Para que TODOS los rayos emitidos por S lleguen a P, la LCO de las diferentes trayectorias debe ser la misma (y encima la mínima posible, ¿no?)

Pero cuando hacemos las cuentas vemos que esto no ocurre: LCO depende de φ

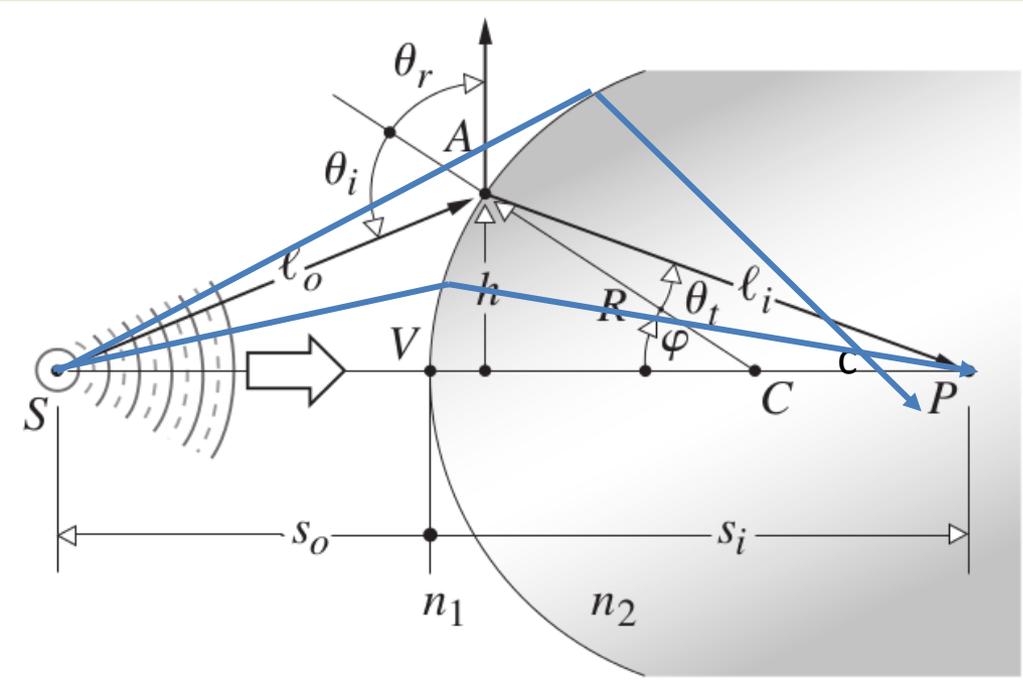
Por eso NO TODOS LOS RAYOS DE S LLEGAN A P por lo que la imagen de un punto no es un punto.

PERO...también vimos que si nuestro sistema óptico se *saca de encima* los rayos alejados del eje óptico la cosa podría funcionar (aproximación paraxial).

El LCO de los rayos cercanos al eje ~cte....pedir que sea mínimo conduce, en esta aprox a

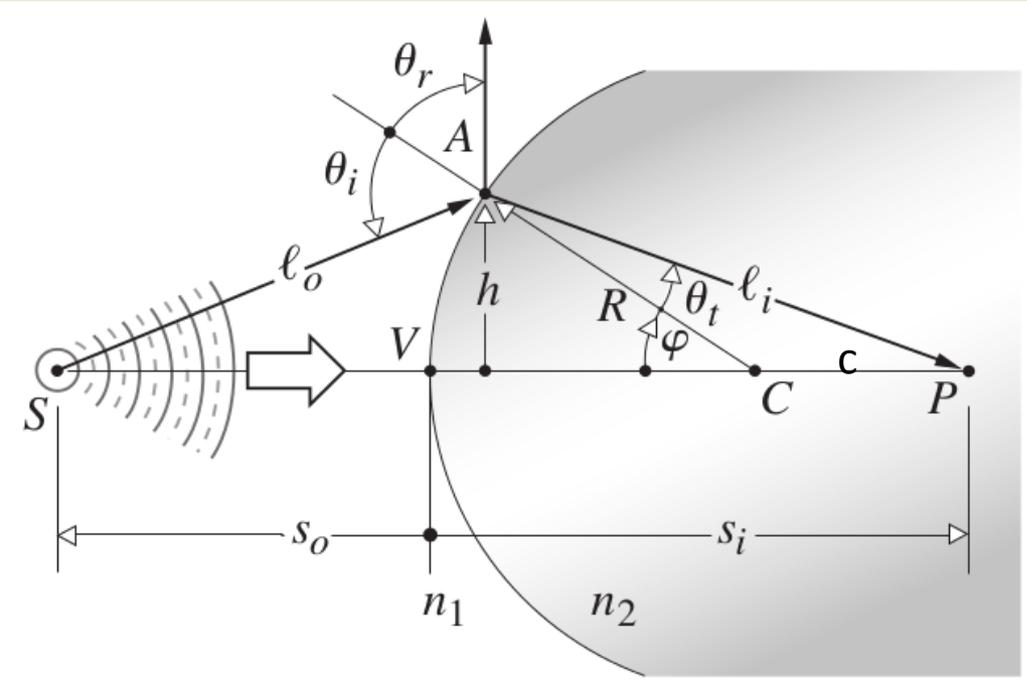
que:

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{1}{R}(n_2 - n_1)$$



En el capítulo anterior...

Dióptra Esférica aprox. paraxial



+ ← eje s_o

→ eje s_i +

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{1}{R} (n_2 - n_1)$$

↑
posiciones de
fuente e imagen

↑
Parametros de
la dioptra

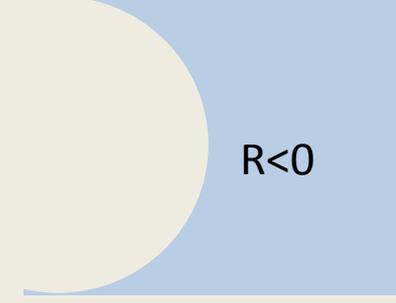
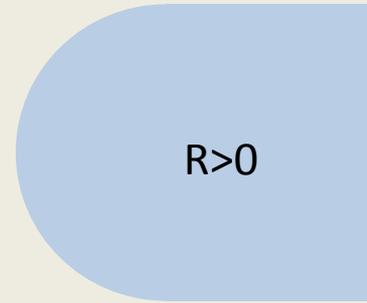
Con luz desde la izquierda...

s_o	+ izquierda de V
s_i	+ derecha de V
R	+ si C esta a la derecha de V
y_o, y_i	+ encima del eje optico

En el capítulo anterior...

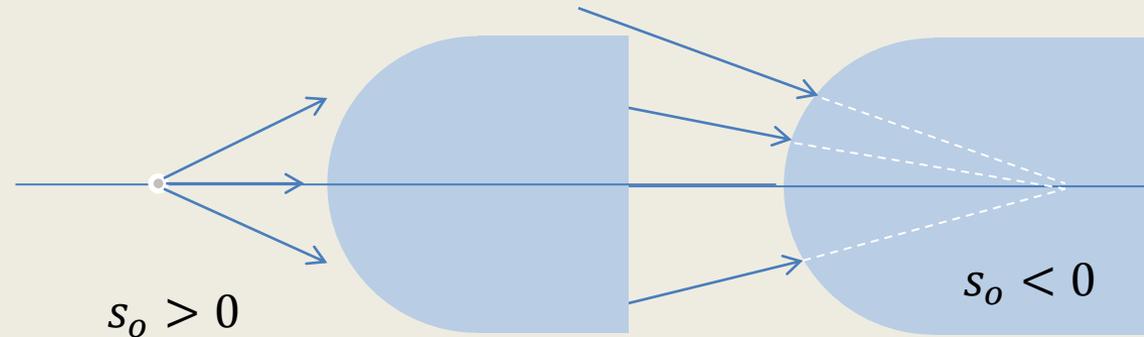
Dióptrra esférica

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{1}{R} (n_2 - n_1)$$



Con luz desde la izquierda...

s_o	+ izquierda de V
s_i	+ derecha de V
R	+ si C esta a la derecha de V
y_o, y_i	+ encima del eje optico

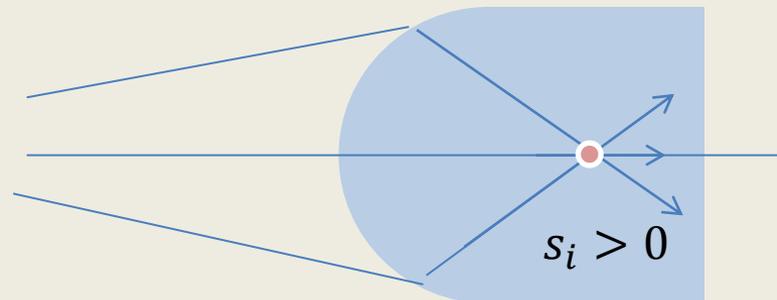


$s_o > 0$

objeto real

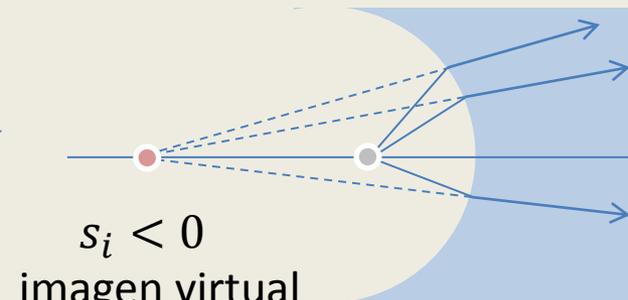
$s_o < 0$

objeto virtual



$s_i > 0$

imagen real



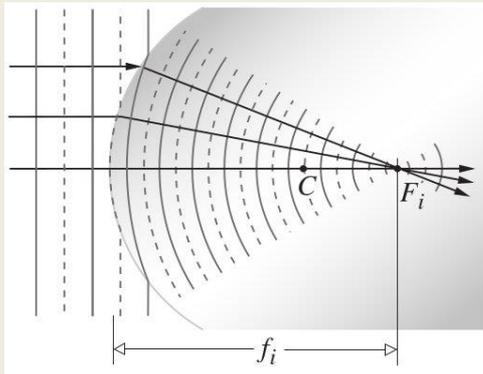
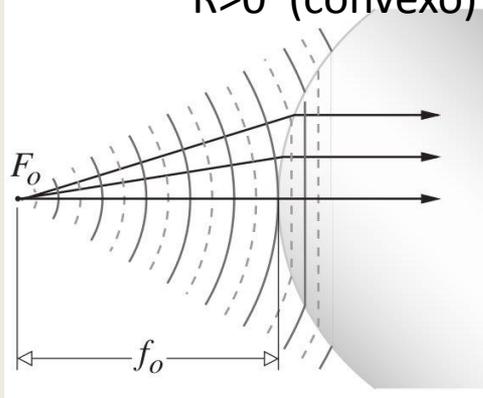
$s_i < 0$

imagen virtual

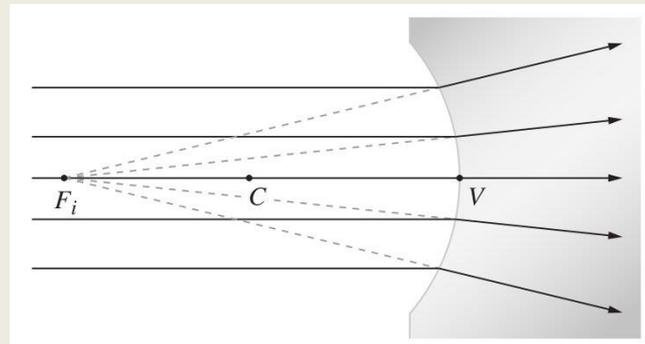
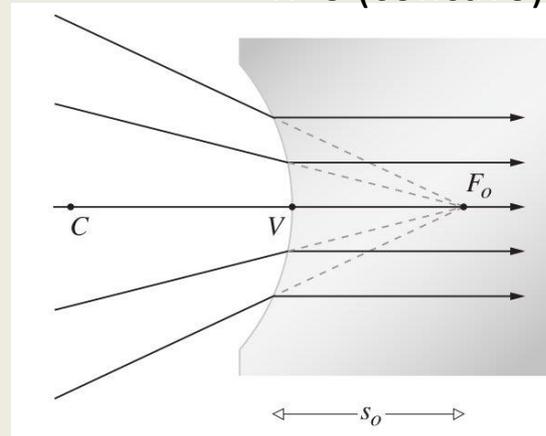
En el capítulo anterior...

Puntos especiales de la dióptrica esférica (foco imagen y foco objeto)

$R > 0$ (convexo)



$R < 0$ (concavo)



$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{1}{R} (n_2 - n_1)$$

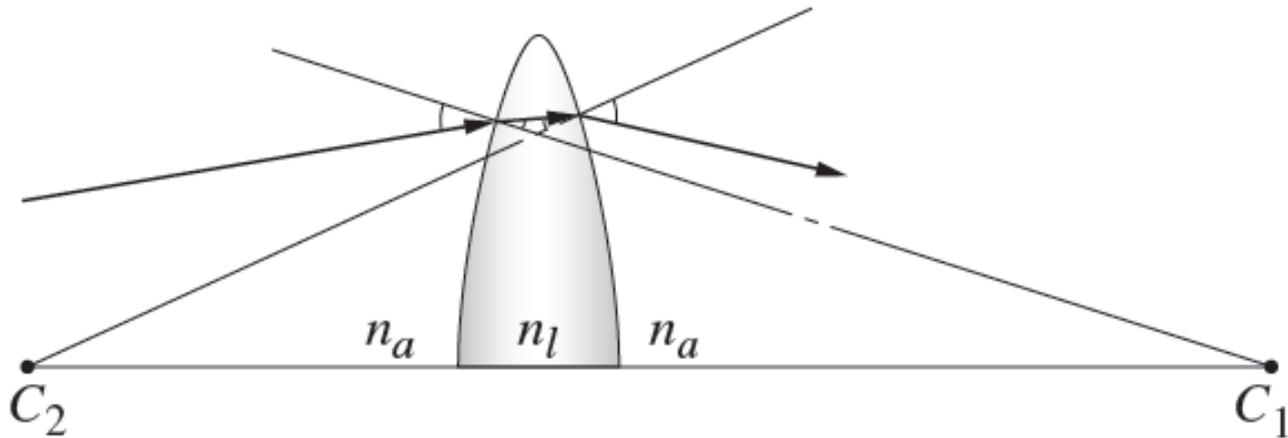
$$f_o = \frac{n_1}{(n_2 - n_1)} R$$

$$f_i = \frac{n_2}{(n_2 - n_1)} R$$

La ubicación de los puntos foco objeto e imagen de una dioptra esférica en la aproximación paraxial dependen de: n_1 , n_2 y R

Lentes (Snell x 2)

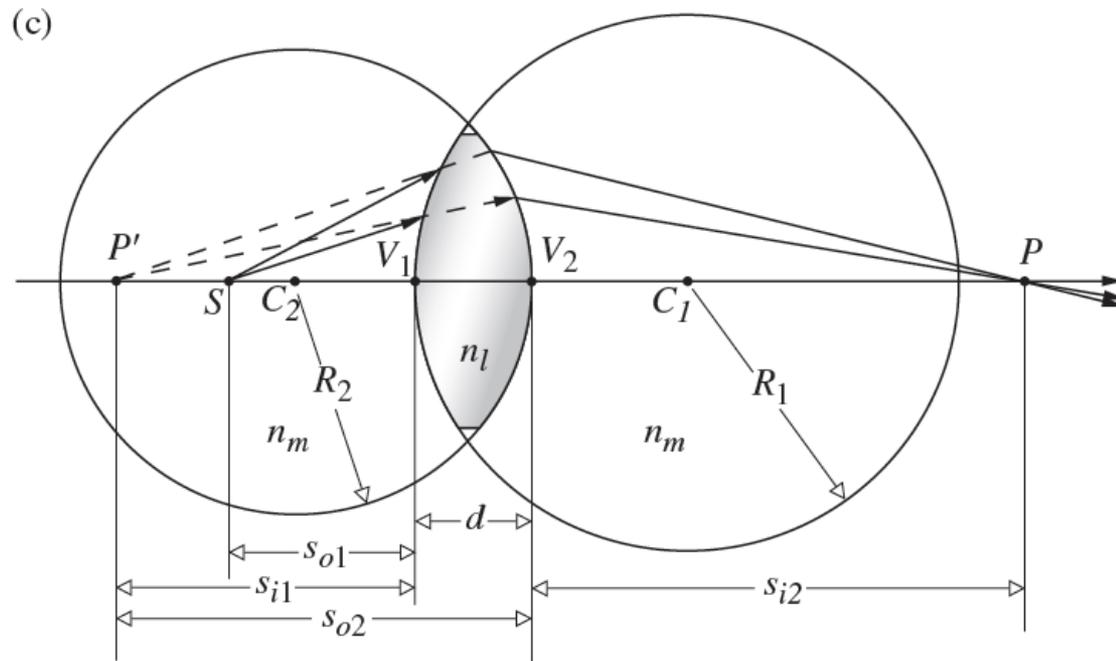
Una lente \longleftrightarrow dos interfaces
(material1-material2-material1)



Ya sabemos como encontrar analiticamente la imagen de una fuente puntual que produce una dioptra (...solo que ahora tenemos que concatenar dos veces ese procedimiento)

Lentes (Snell x 2)

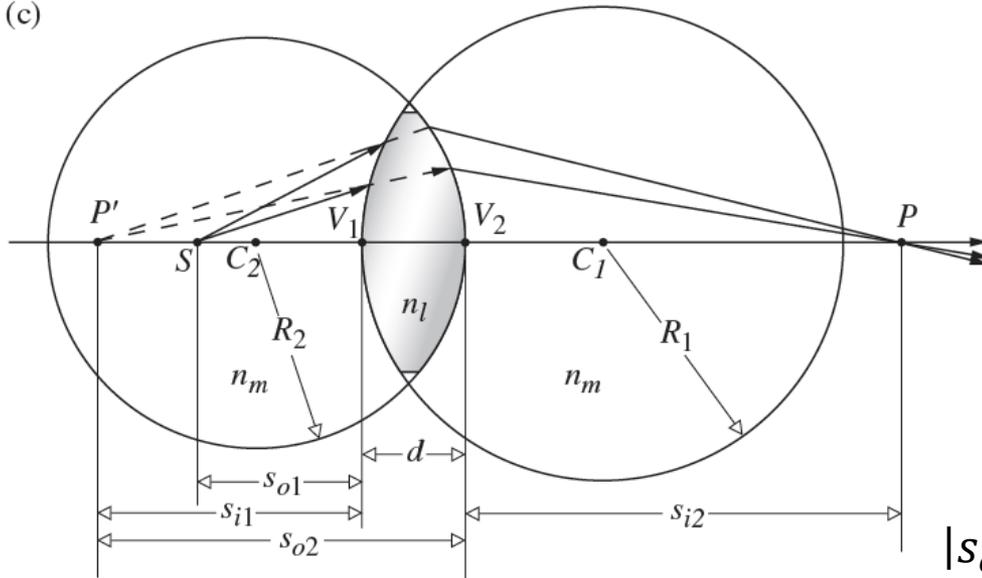
Una lente \longleftrightarrow dos interfaces
(material1-material2-material1)



Ya sabemos como encontrar analiticamente la imagen de una fuente puntual que produce una dioptra (...solo que ahora tenemos que concatenar dos veces ese procedimiento

Lentes: fórmula del constructor

(c)



La primera refracción de rayos genera la imagen primaria P' (que para este ejemplo resulta virtual)

P' actuará como fuente objeto (S_{o2}) para la refracción de la segunda interfase.

teniendo en cuenta

los signos

$$|s_{o2}| = |s_{i1}| + d \longrightarrow s_{o2} = -s_{i1} + d$$

Para la primera interfase:

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_l}{s_{i1}} = \frac{1}{R_1} (n_l - n_m)$$

Sumo miembro a miembro ambas expresiones

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_m}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_l - n_m) + \frac{n_l d}{(s_{i1} - d)s_{i1}}$$

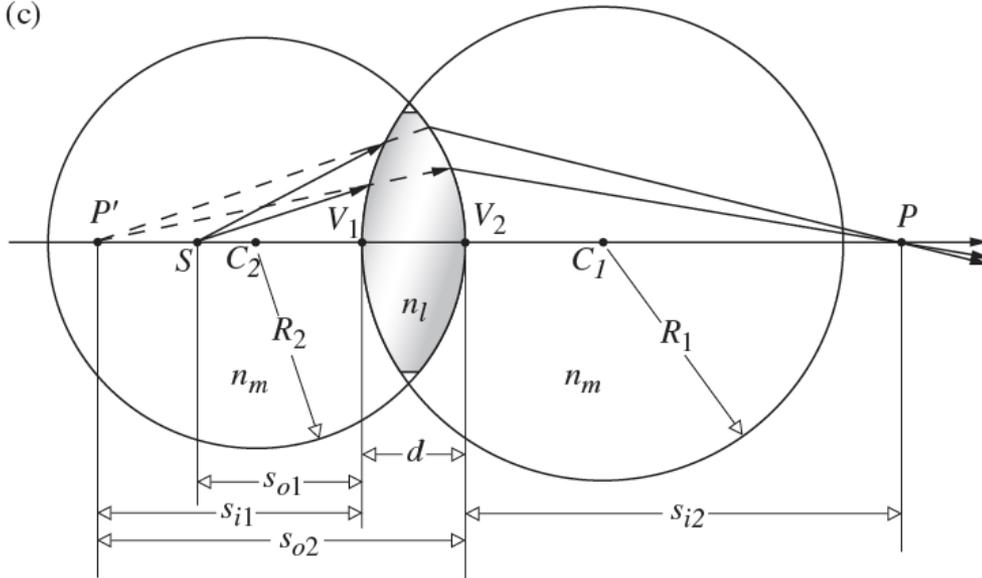
Para la segunda interfase:

$$\frac{n_l}{-s_{i1} + d} + \frac{n_m}{s_{i2}} = \frac{1}{R_2} (n_m - n_l)$$

>0 en este ejemplo

Lentes: aproximación de lente delgada

(c)



La primera refracción de rayos genera la imagen primaria P' (que para este ejemplo resulta virtual)

P' actuará como fuente objeto (S_{o2}) para la refracción de la segunda interfase.

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_m}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_l - n_m) + \frac{n_l d}{(s_{i1} - d)s_{i1}}$$

Si la lente es lo suficientemente **delgada** $d \rightarrow 0$

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_m}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_l - n_m)$$

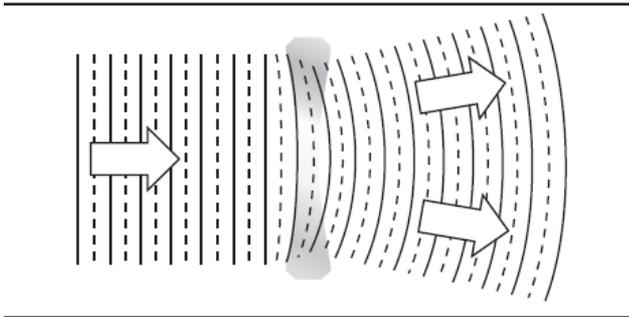
$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

$$n_{lm} \equiv \frac{n_l}{n_m}$$

Lentes delgadas: haciendo foco

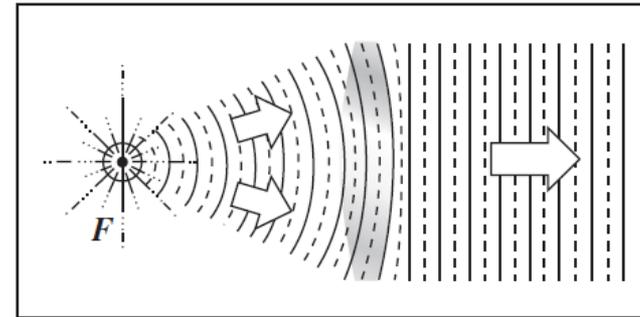
Puntos especiales:

$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$



Donde se forma la imagen cuando incide una onda plana? Llamo a ese punto **foco imagen** f_i

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$



De que punto proviene la onda incidente cuando se transmite una onda plana? Llamo a ese punto **foco objeto** f_o

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

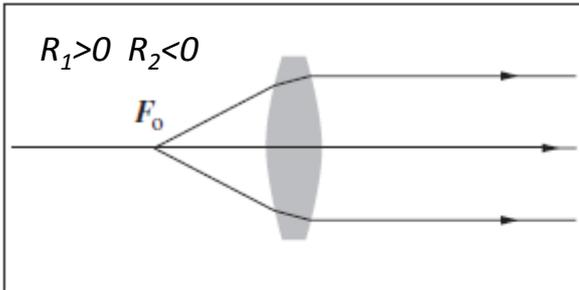
Para una lente delgada: $f_i = f_o = f$

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

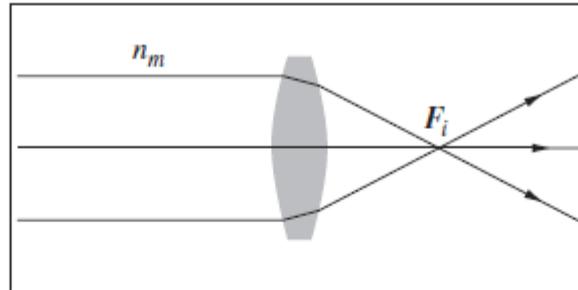
Ojo... f_i y f_o son numericamente iguales, pero estan en subespacios diferentes (convencion de signos)

Focos, geometria y n's

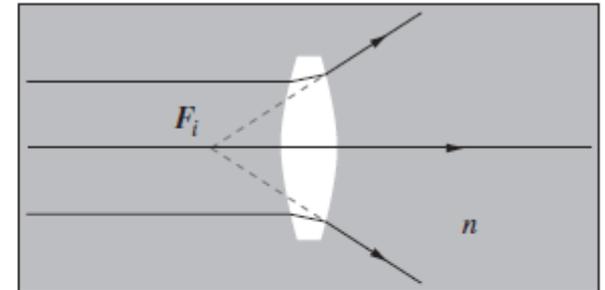
$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1) \longrightarrow \frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$



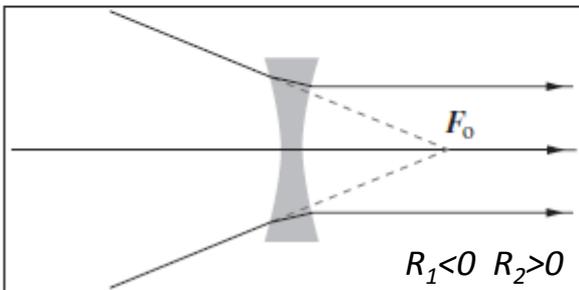
(a)



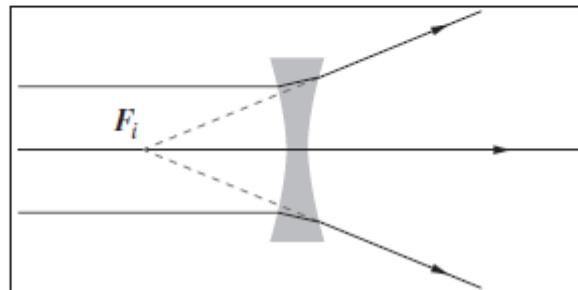
(b)



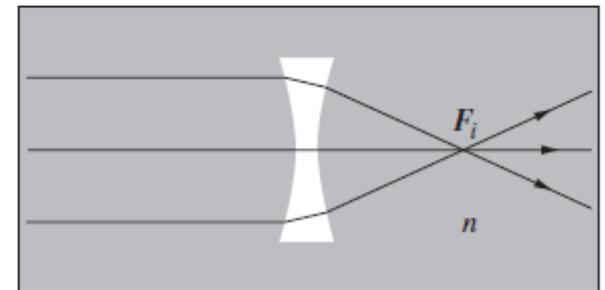
(c)



(d)



(e)

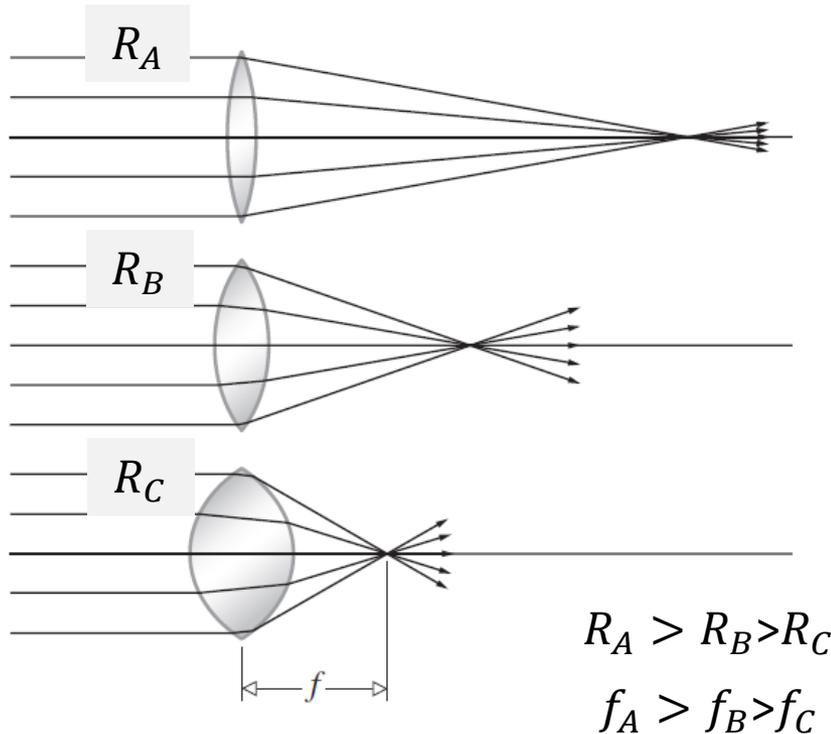


(f)

Curvatura y distancia focal

$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1) \longrightarrow \frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

En lentes biconvexas: $R_1 = -R_2 \longrightarrow \frac{1}{f} = \frac{2}{R} (n_{lm} - 1)$



Distancias focales más grandes se obtienen para curvaturas más grandes

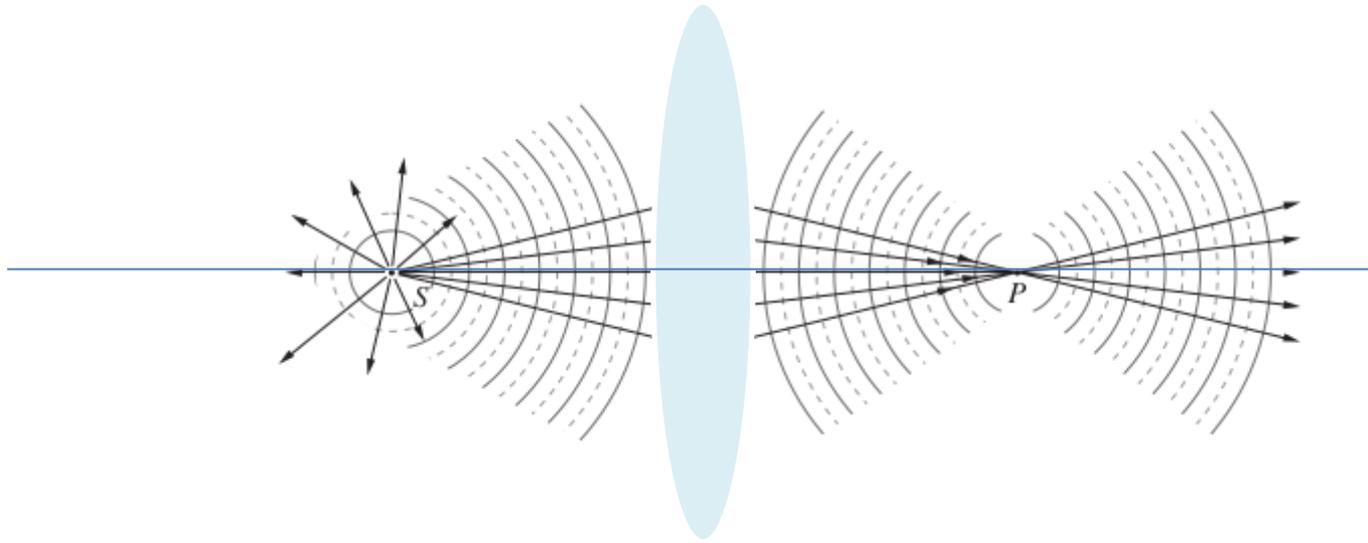
$$f \sim R$$

Potencia de una lente (dioptrias)

Capacidad de *quebrar* rayos

$$\phi = \frac{1}{f}$$

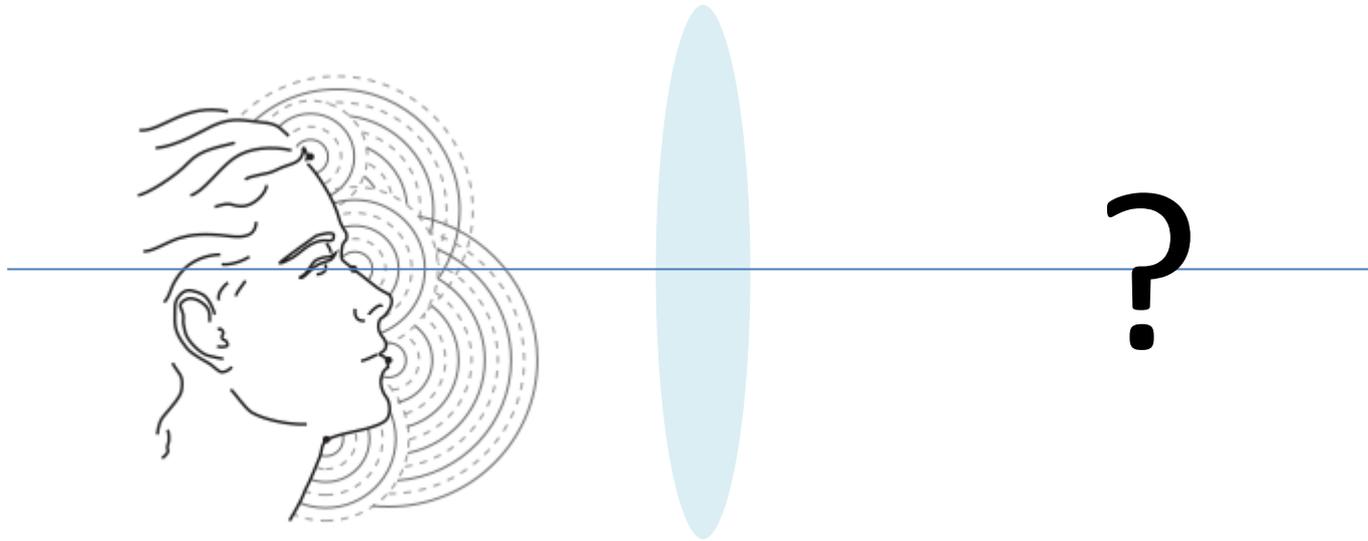
Lentes delgadas y formación de imágenes (metodo de los 3 rayos 3)



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

Hasta ahora vimos como se forman imagenes de objetos ubicados sobre el eje optico.

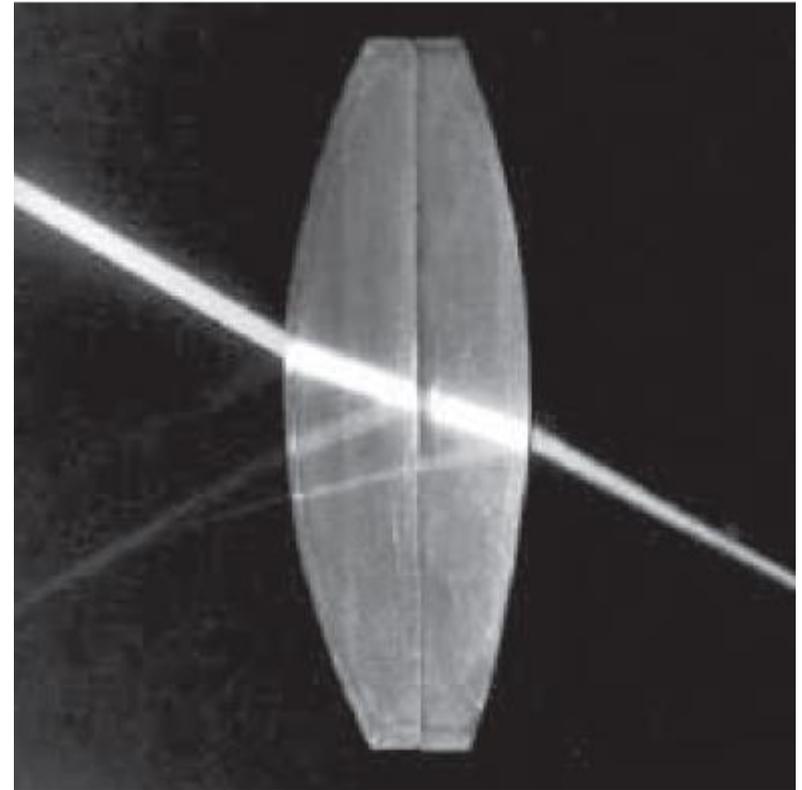
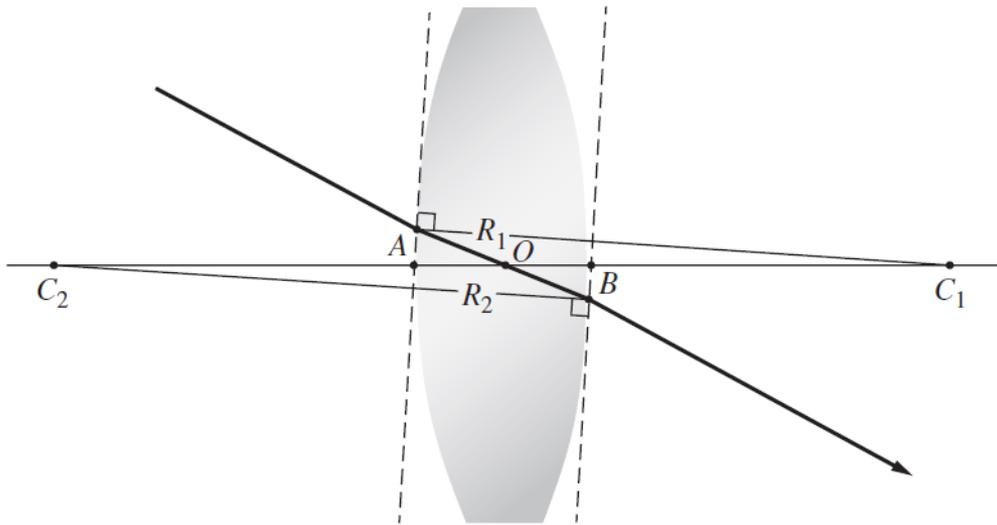
Lentes delgadas y formación de imágenes (metodo de los 3 rayos 3)



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

Hasta ahora vimos como se forman imagenes de objetos ubicados sobre el eje optico. La ecuacion de arriba nos habla sólo de posiciones sobre el eje...no de alturas...

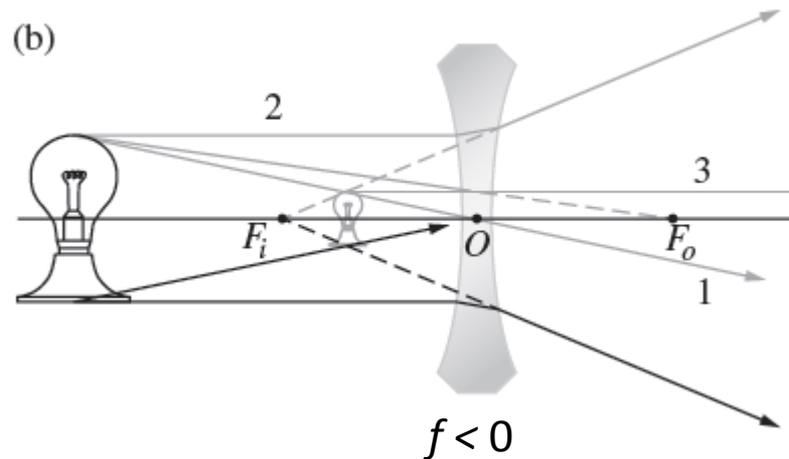
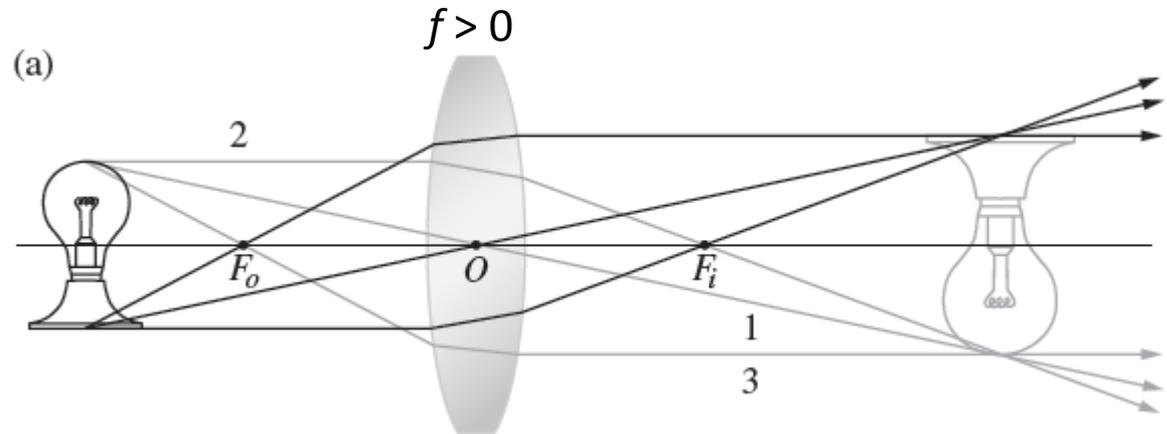
Rayos particulares (de mucha ayuda)



Para lentes **delgadas** el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.

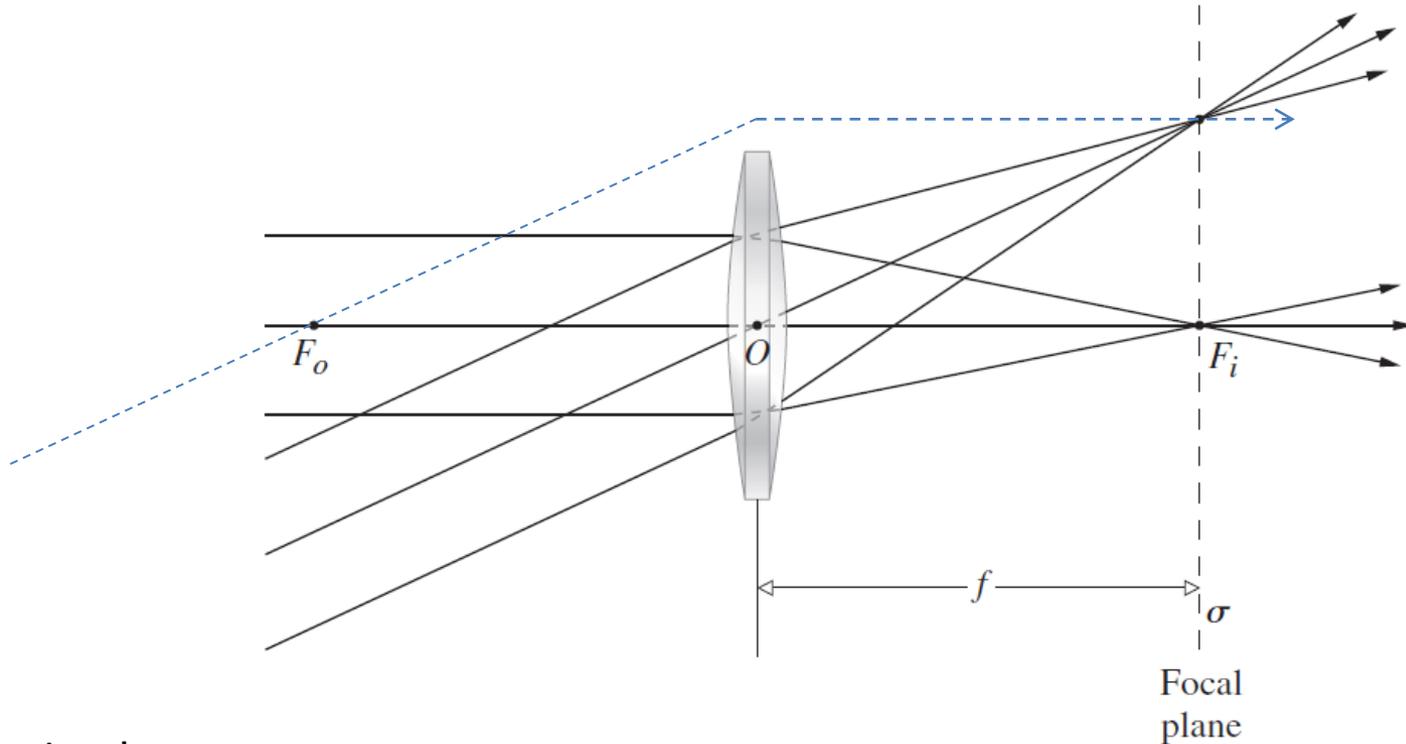
Lentes delgadas y formación de imágenes (metodo de los 3 rayos 3)

1. el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.
2. el rayo que pasa por f_o sale paralelo
3. el rayo que entra paralelo se dirige hacia f_i



$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

Y si viene del infinito y mas alla?



Teniendo en cuenta que:

Para lentes delgadas el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.

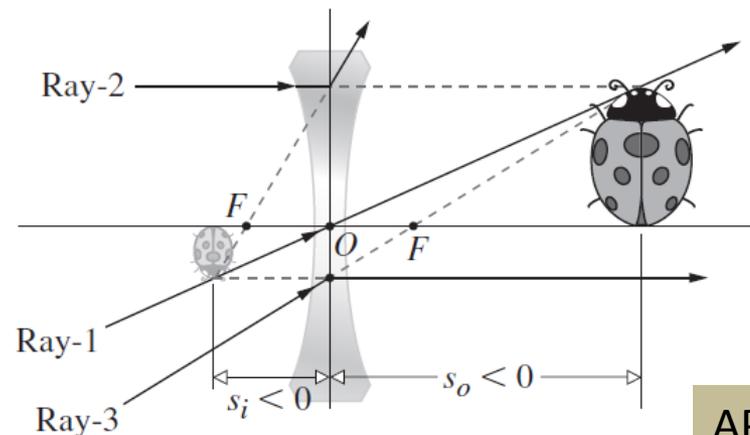
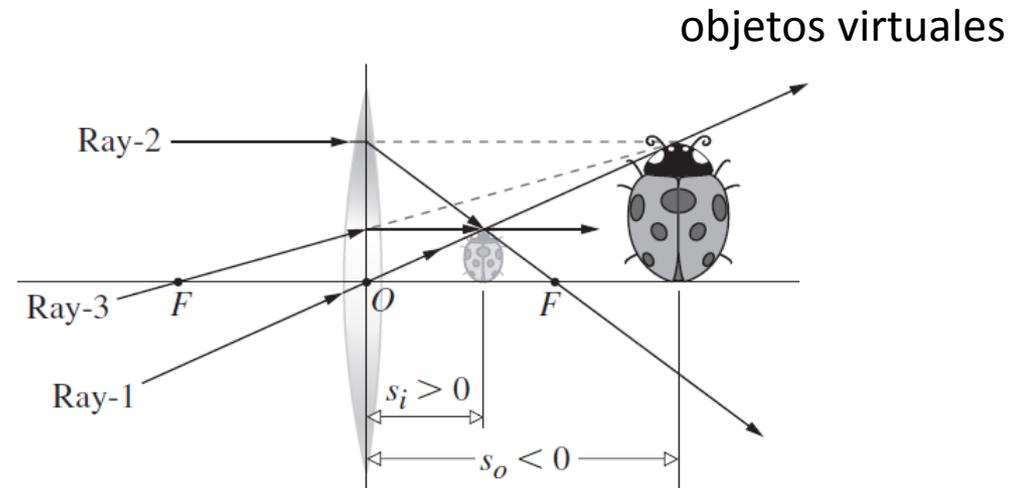
El rayo que pasaría por f_o debe salir paralelo

Un haz de rayos paralelos no alineado con el eje óptico converge a un punto sobre el **plano focal** de la lente

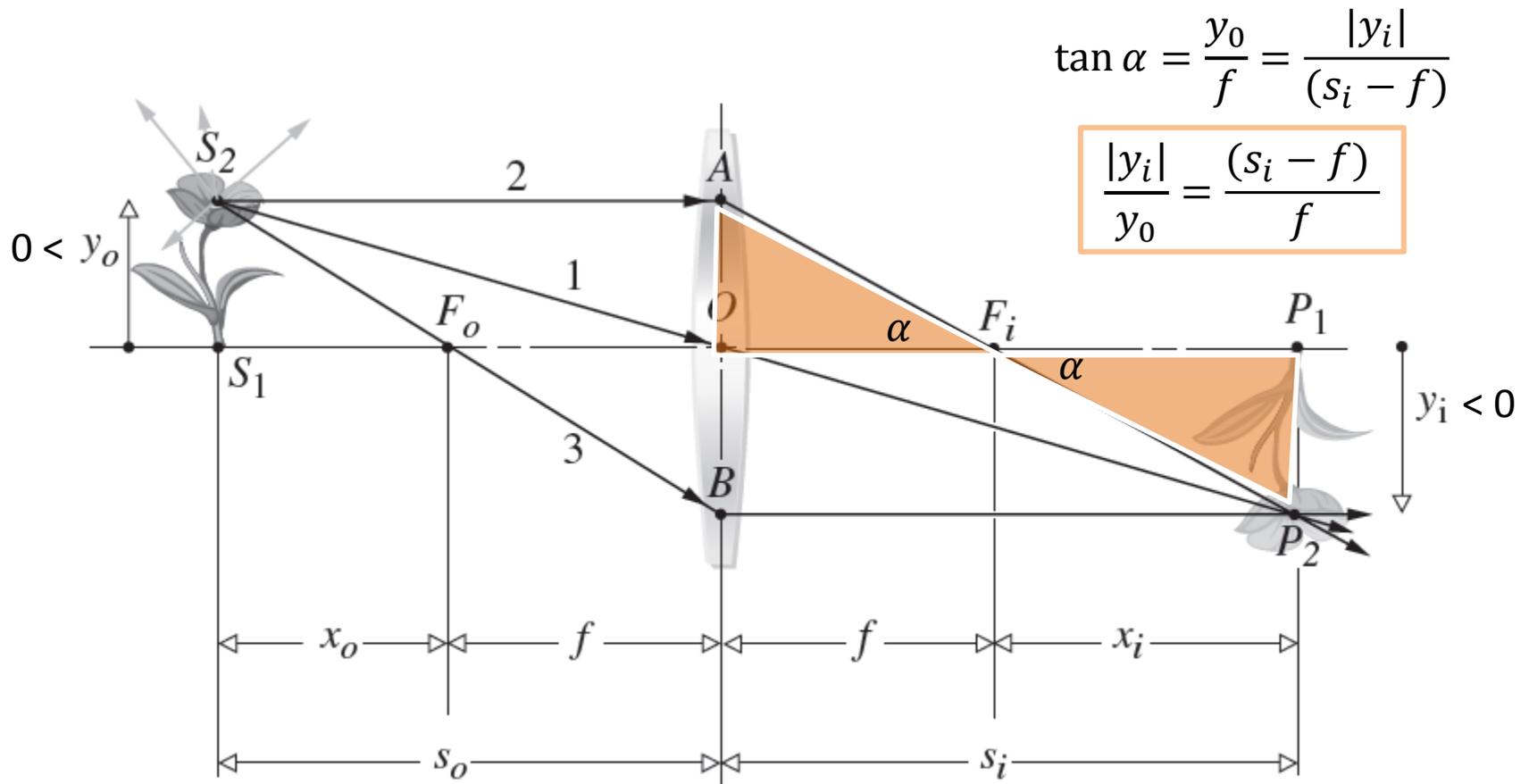
Lentes delgadas y formación de imágenes (ejs. con objetos virtuales)

1. el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.
2. el rayo que entra paralelo se dirige hacia f_i
3. el rayo que pasa por f_o sale paralelo

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

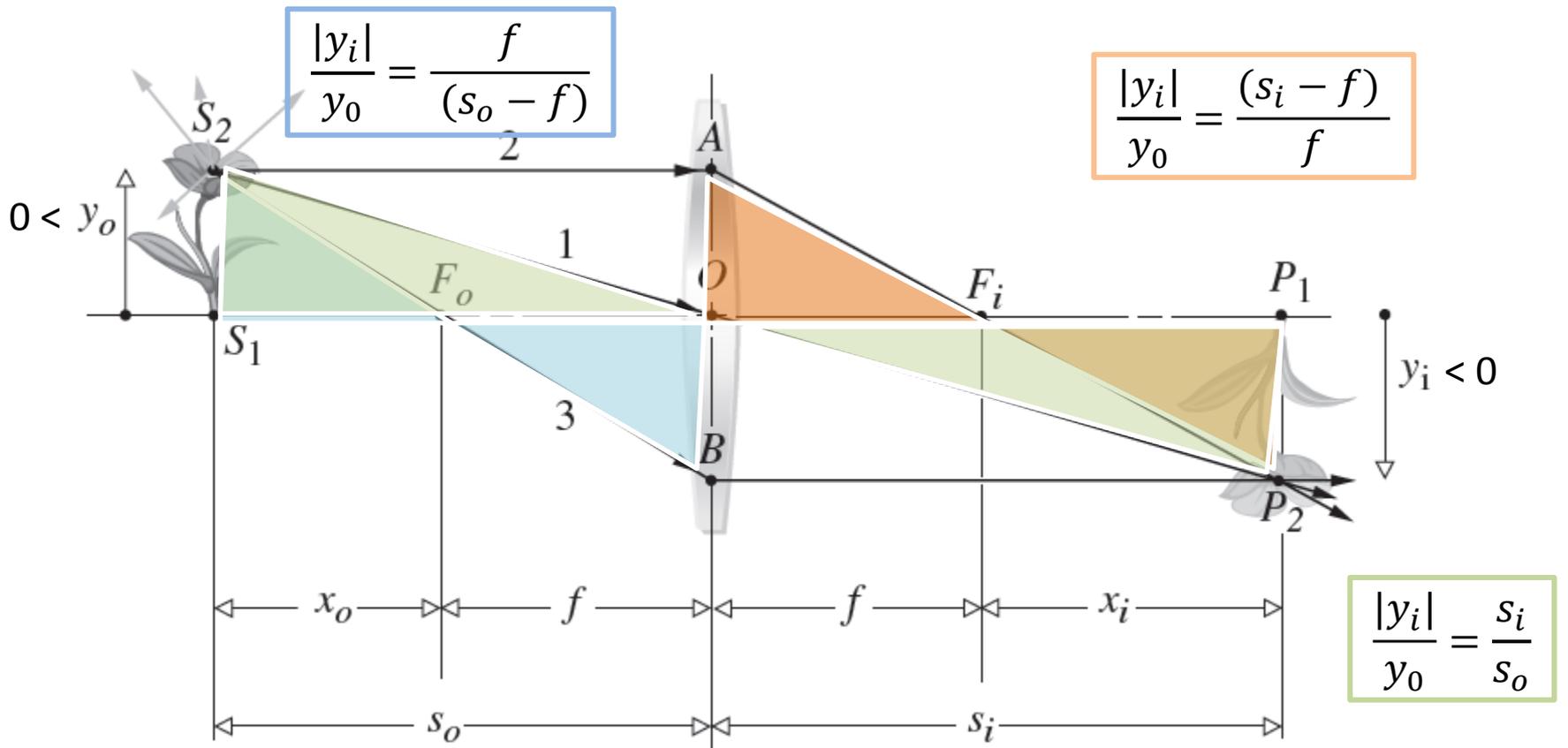


Aumento Lateral de una lente



Buscando los triangulos que me sirvan

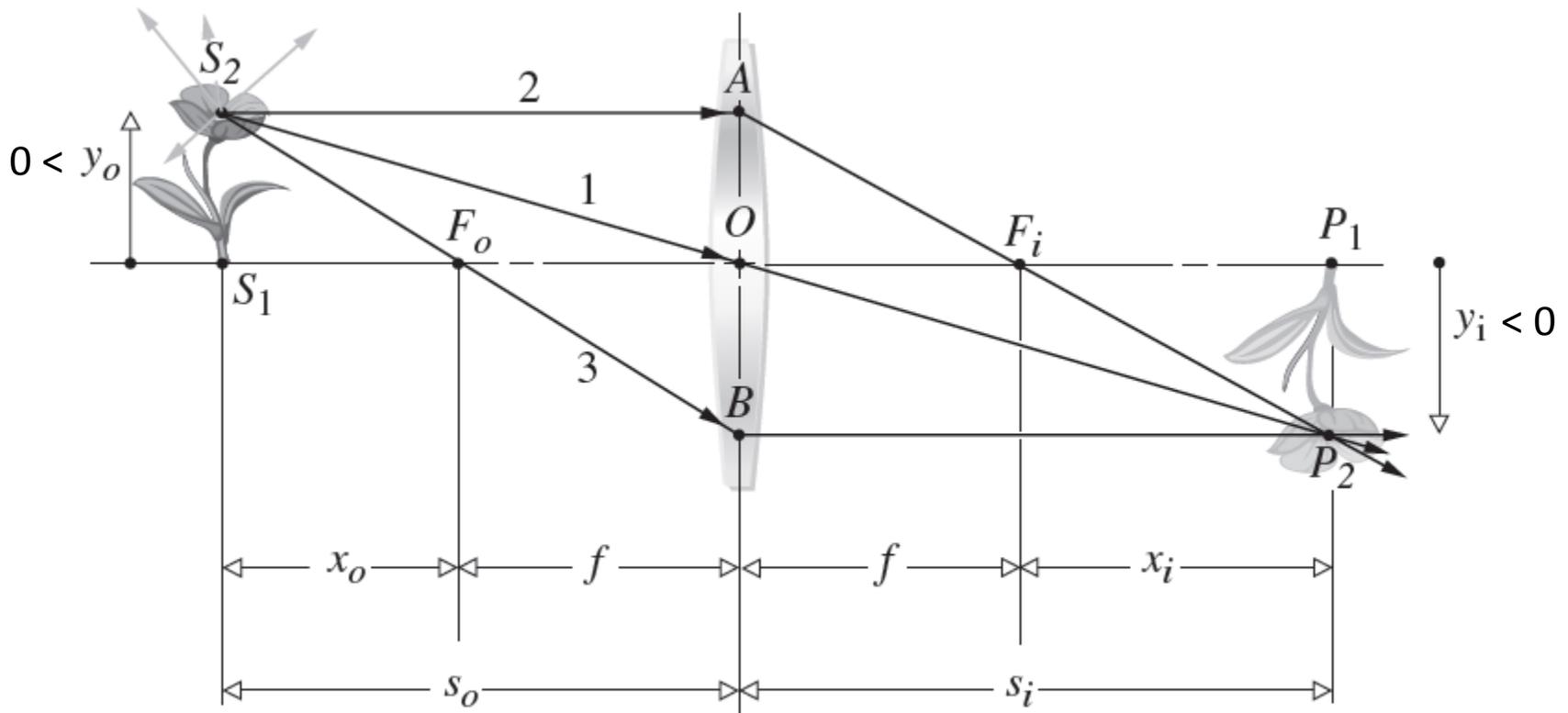
Aumento Lateral de una lente



notar que $|y_i| = -y_i$

Definimos aumento lateral como $\longrightarrow M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{(f - s_i)}{f} = \frac{f}{(f - s_o)}$

Aumento Lateral de una lente



$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{(f - s_i)}{f} = \frac{f}{(f - s_o)}$$

- $M_T < 0$ indica imagen invertida
- Notar: no habrá inversión sólo cuando objeto e imagen estén en el mismo sem-espacio

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{(f - s_i)}{f} = \frac{f}{(f - s_o)}$$

Aumento Lateral

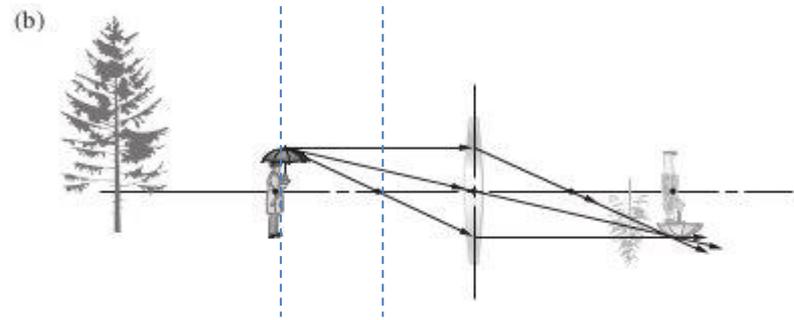
Si $s_o > 2f$ $-1 < M_T < 0$

Si $s_o = 2f$ $M_T \equiv \frac{f}{(f - 2f)} = -1$

Si $f < s_o < 2f$ $M_T < -1$

Si $s_o < f$

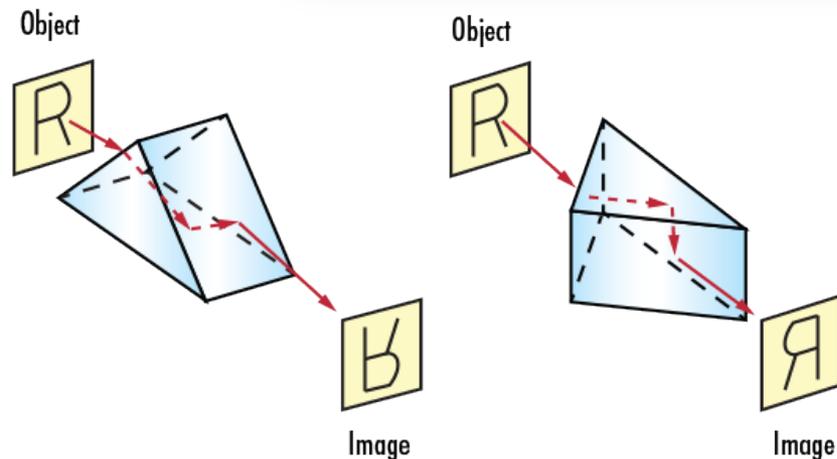
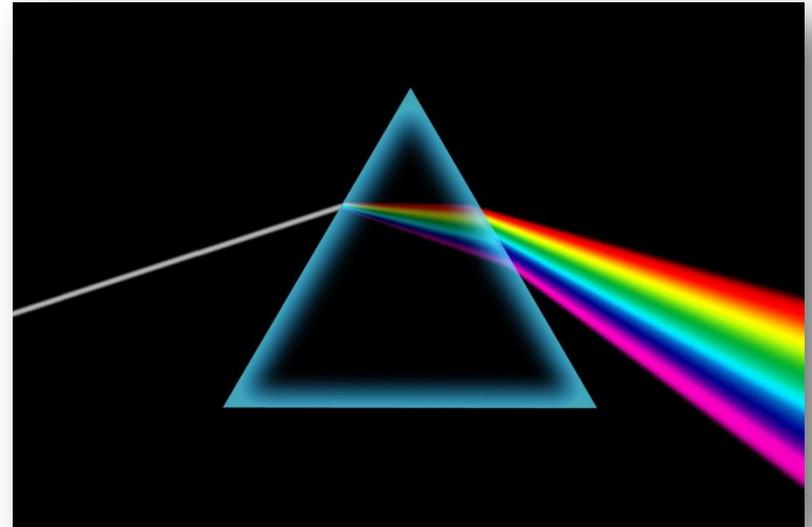
$$M_T \equiv \frac{f}{(f - s_o)} > 1$$



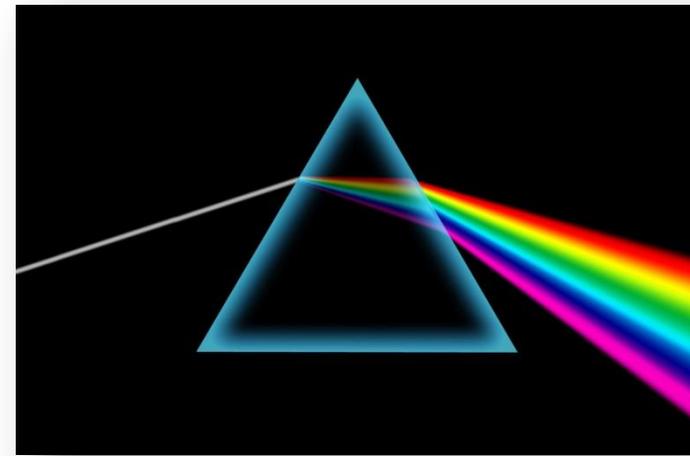
Prismas

Son dispositivos ópticos utilizados como

- Elementos **dispersores** de haces de luz policromática (por ejemplo en analizadores de espectro).
- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos



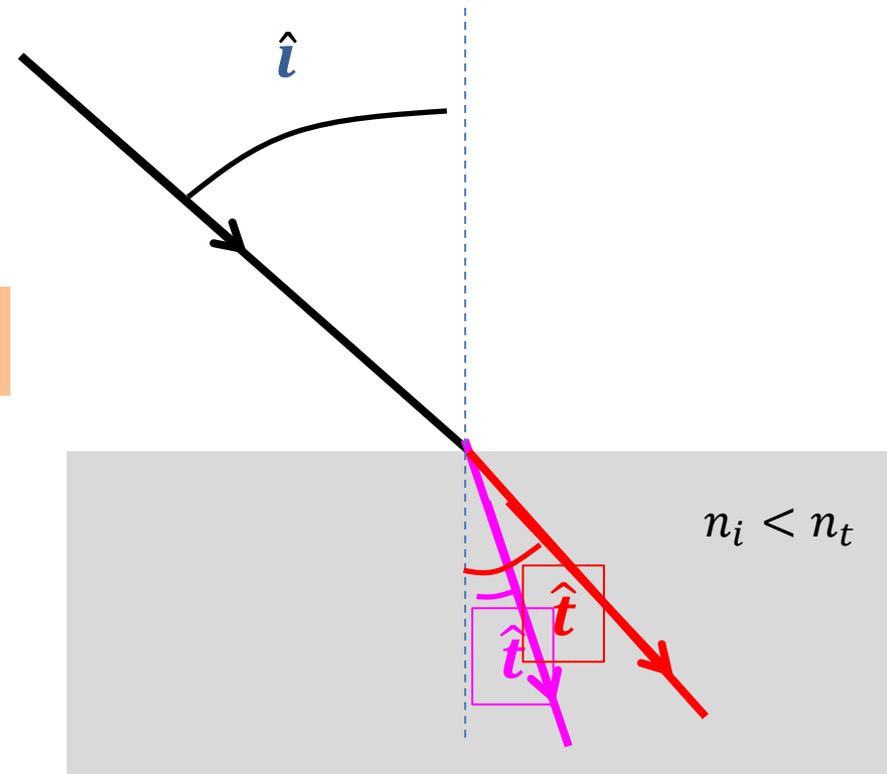
Prismas dispersores



- La razón del comportamiento dispersivo reside en que el índice de refracción de un material no es constante sino que depende de la frecuencia de la onda que lo atraviesa: $n = n(\omega)$.

- Snell hace el resto.

$$n_i \sin \hat{i} = n_t(\omega) \sin \hat{t}(\omega)$$



Dispersion: $n = n(\omega)$

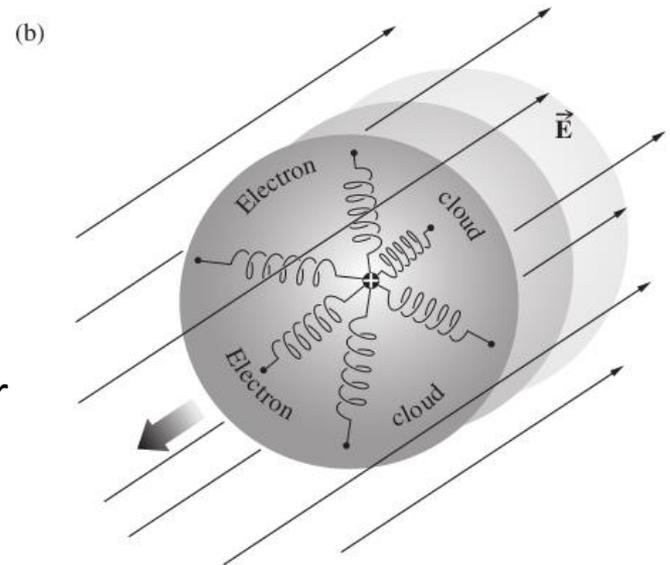
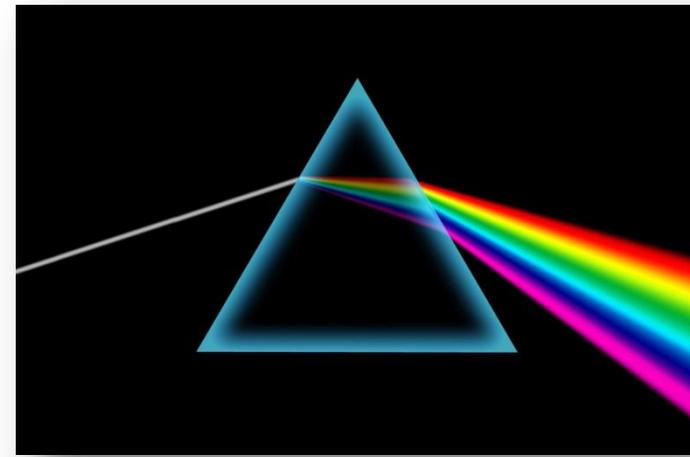
- La onda electromagnética incidente interactúa con las cargas (electrones) del material y las acelera, por lo que emiten también. La onda que atraviesa el material es la superposición de las dos clases de radiación
- Podemos pensar en un movimiento forzado para esas cargas...lo que introduce la dependencia con ω , la frecuencia del forzado.

Modelo de Drude (hamacando electrones o el Oscilador armónico forzado Física 1):

$$F_E + F_k = m_e \frac{d^2 x}{dt^2}$$

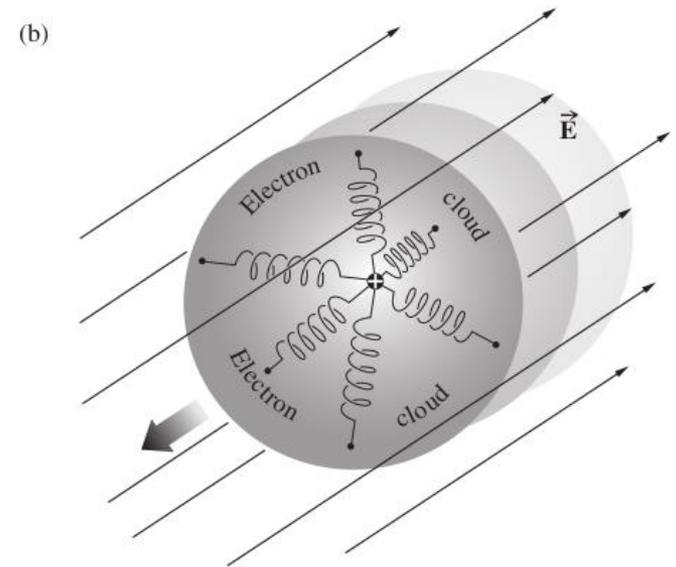
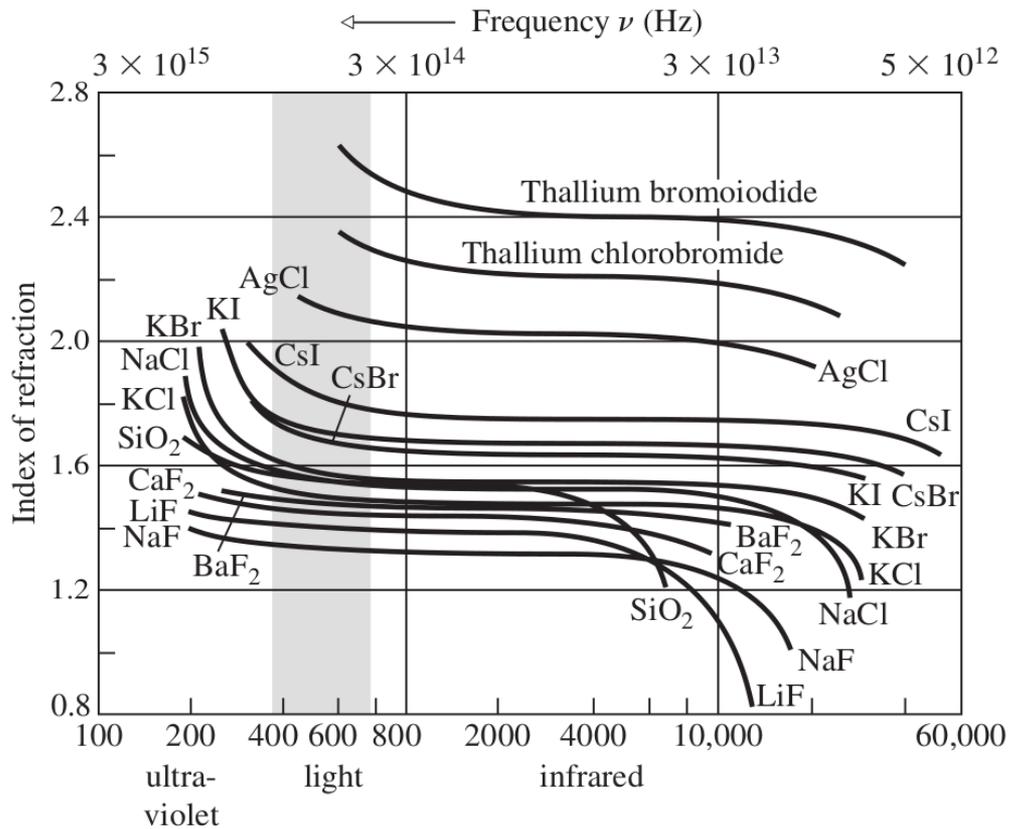
$$q_e E_0 \cos \omega t - m_e \omega_0^2 x = m_e \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$x(t) = \frac{q_e/m_e}{(\omega_0^2 - \omega^2)} E_0 \cos \omega t \quad \longrightarrow \quad n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

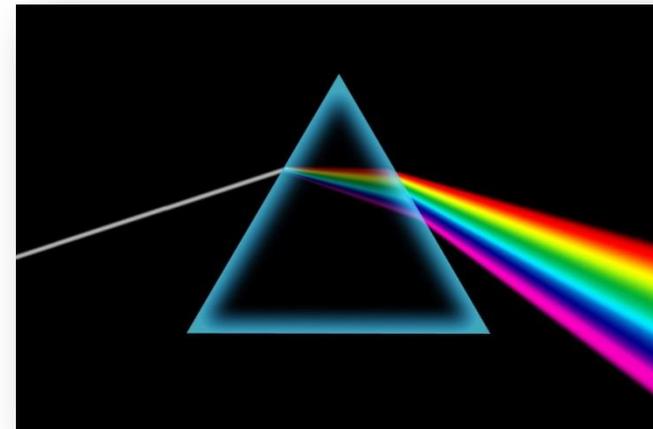


Dispersion: $n = n(\omega)$

- Indice de refracción para diferentes cristales ópticos

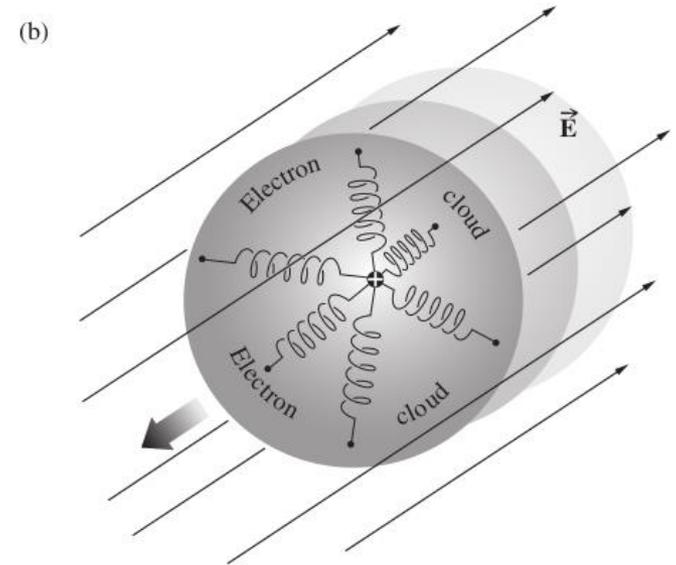
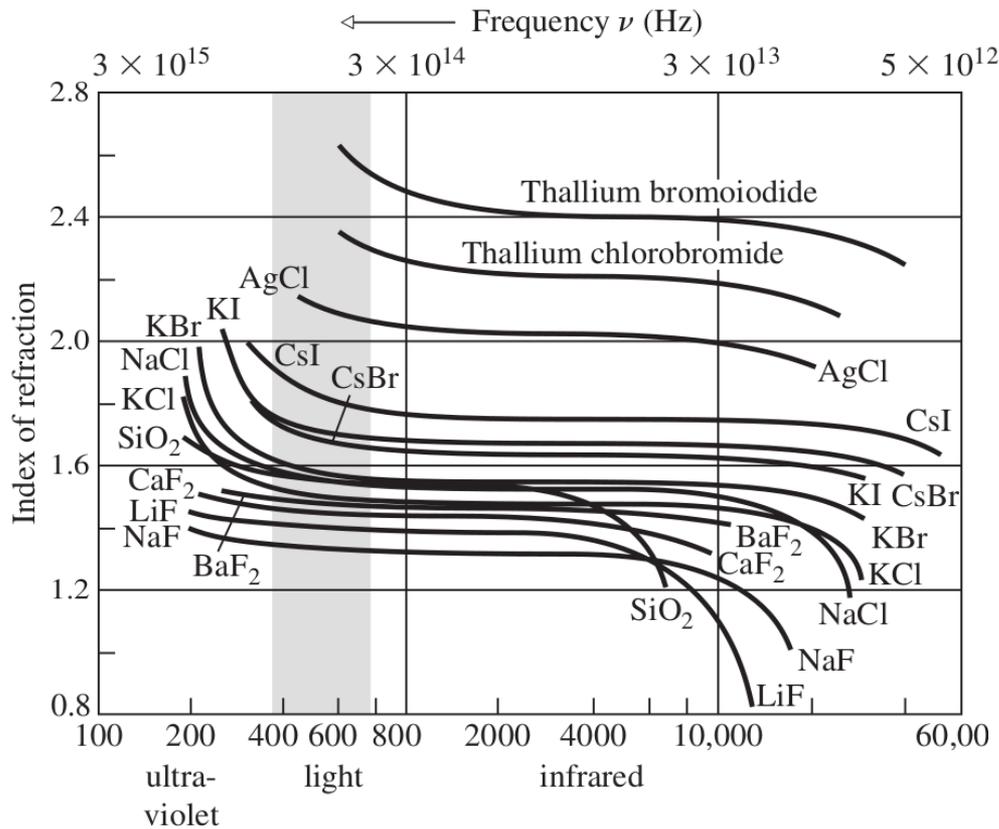


$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

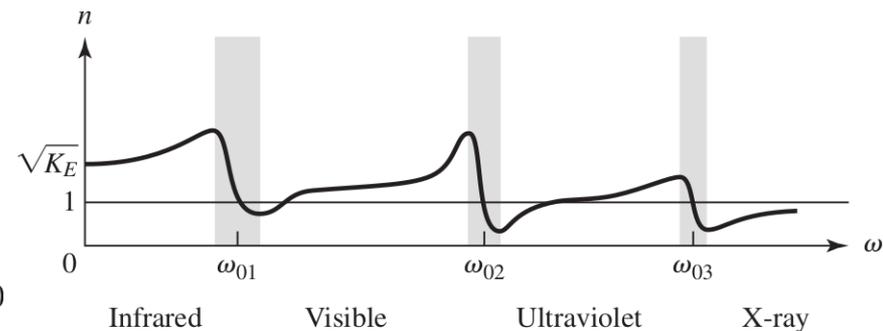


Dispersion: $n = n(\omega)$

- En un material real hay mas de una frecuencia caracteristica ω_0 (varios tipo de resortes)

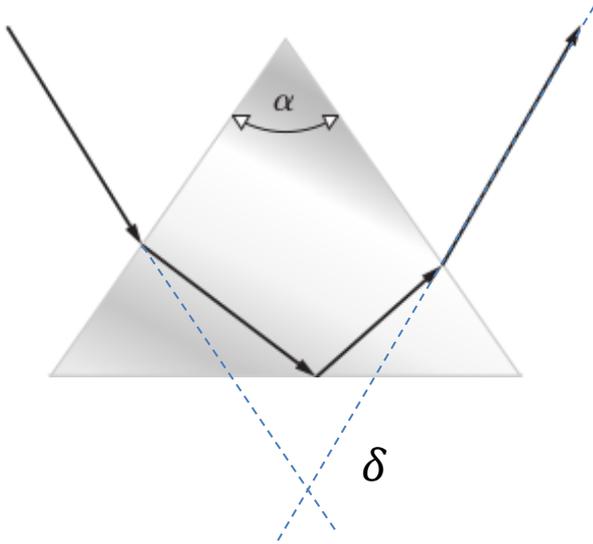


$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e} \sum \frac{f_i}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)}$$



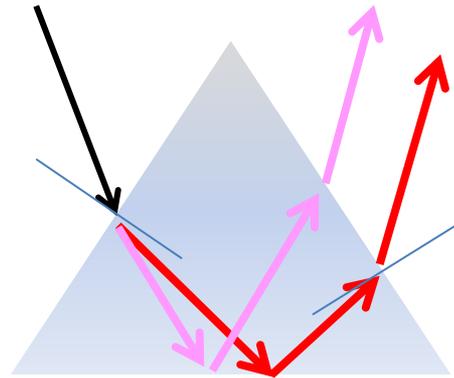
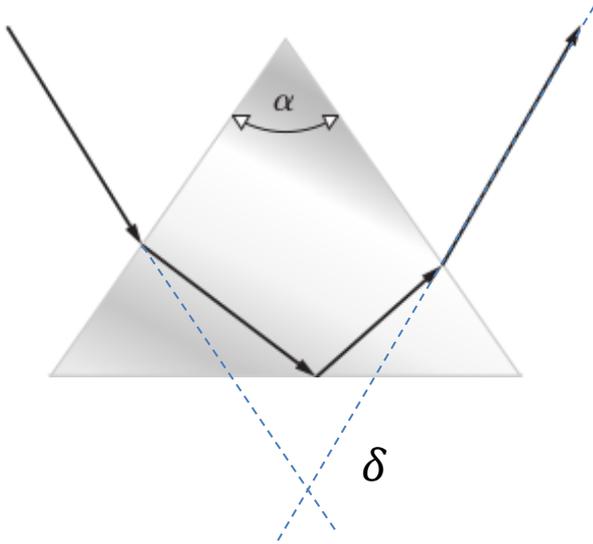
Prismas Reflectores

- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida, δ , resulta independiente de w



Prismas Reflectores

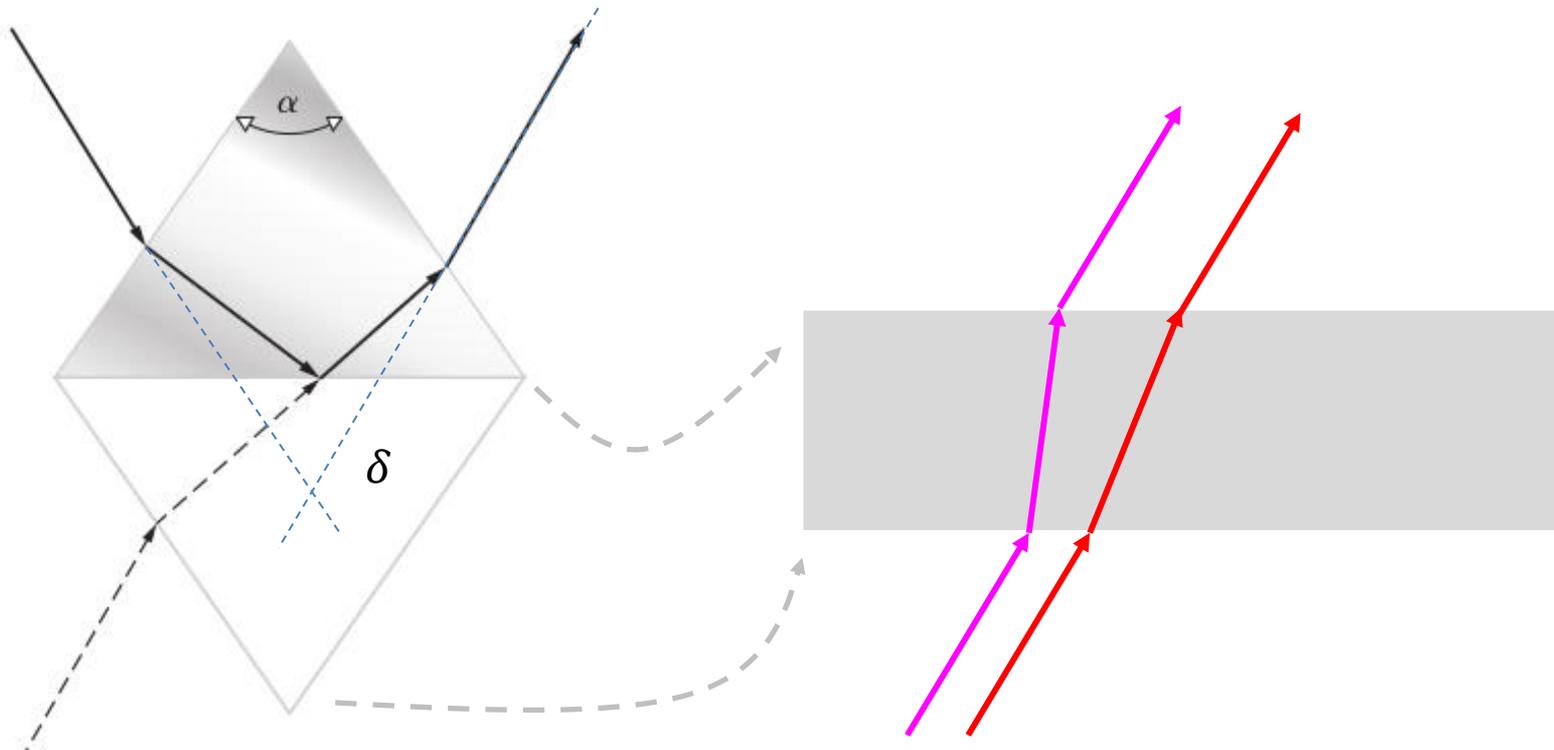
- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida, δ , resulta independiente de w



$$n_i \sin \hat{i} = n_t(w) \sin \hat{t}(w)$$

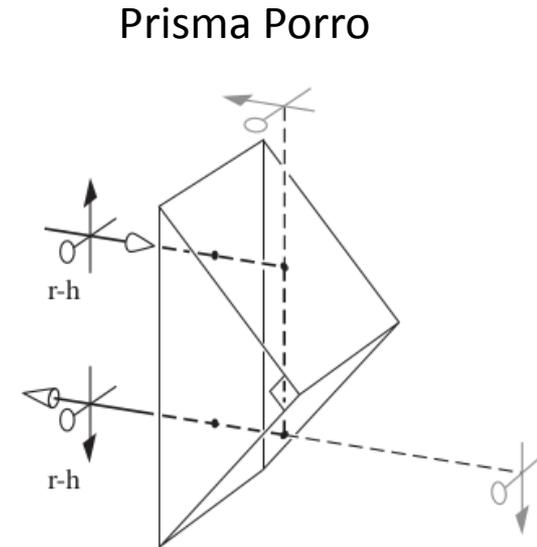
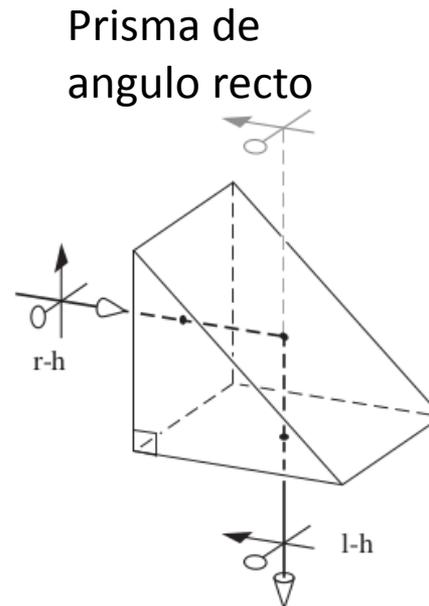
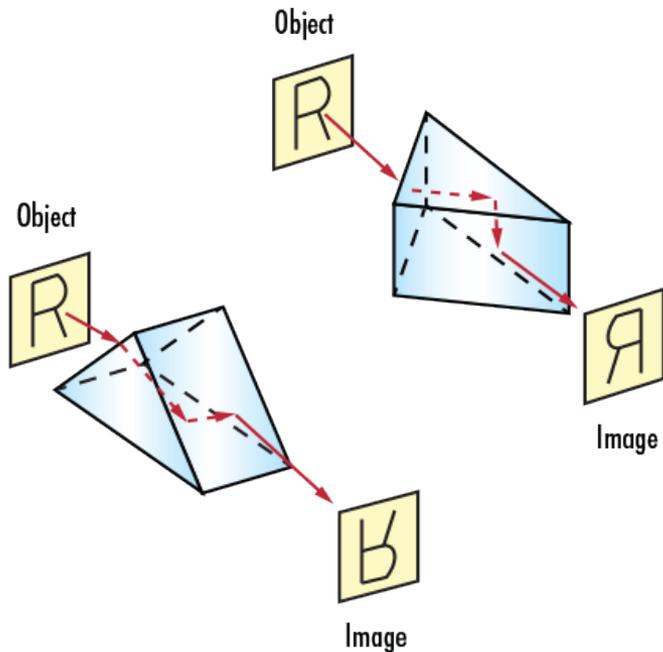
Prismas Reflectores

- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida, δ , resulta independiente de w



Prismas Reflectores

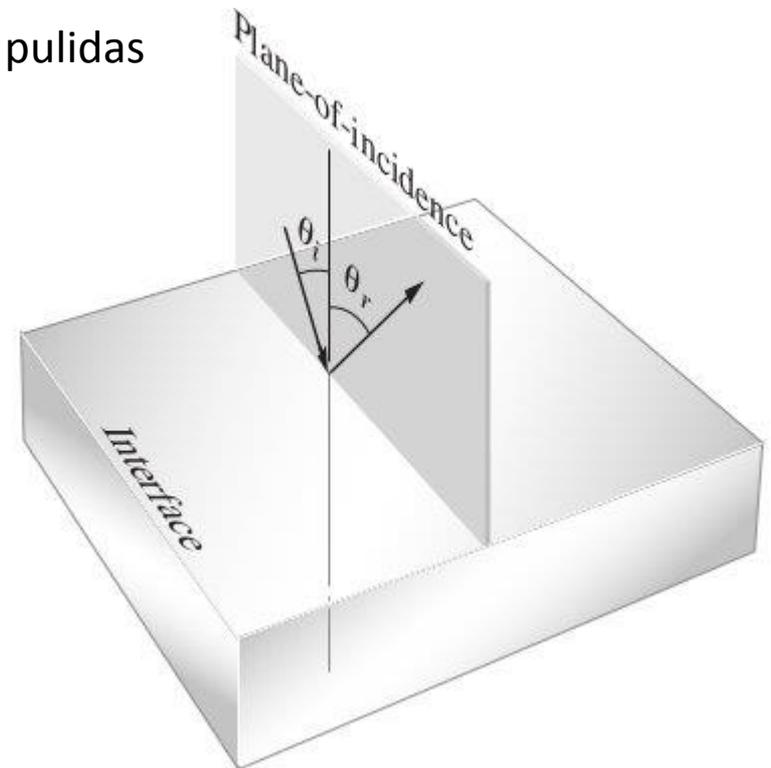
- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida, δ , resulta independiente de w



Espejos

o como escapar del karma de la dispersion

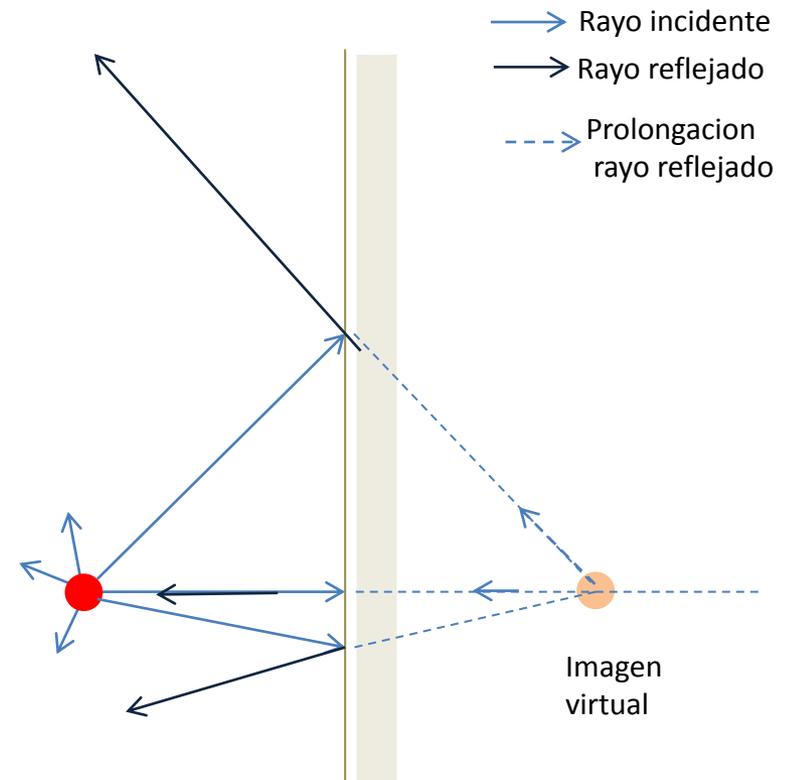
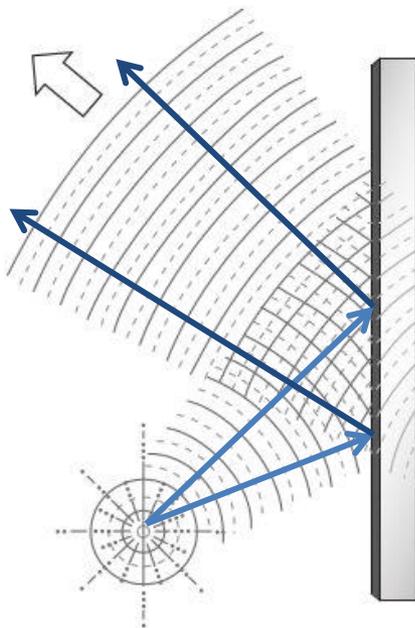
- Tienen la ventaja de no sufrir efectos dispersivos
- La regla de oro es la ley de reflexión
- Construidos utilizando superficies metálicas pulidas



Espejos planos: formación de imágenes

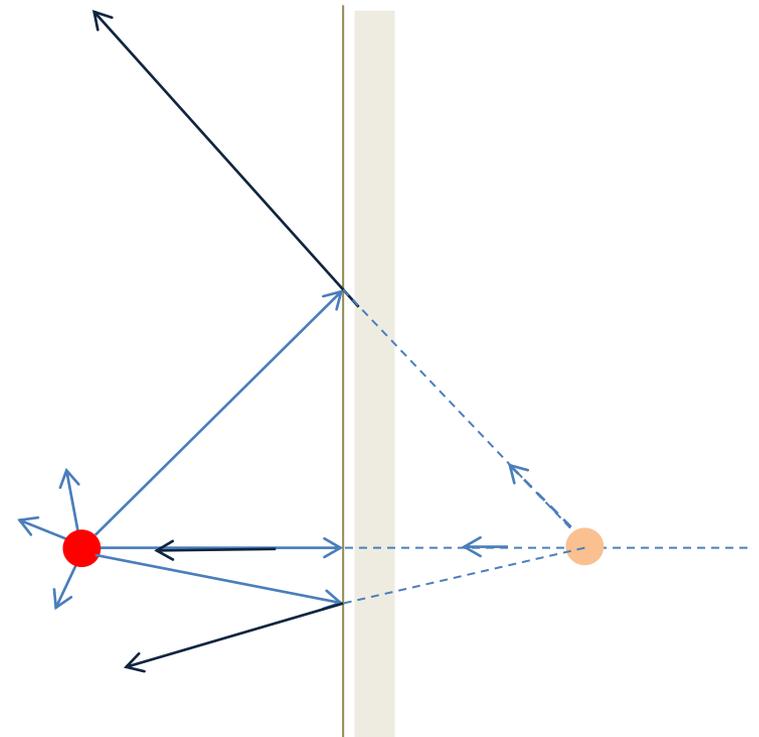
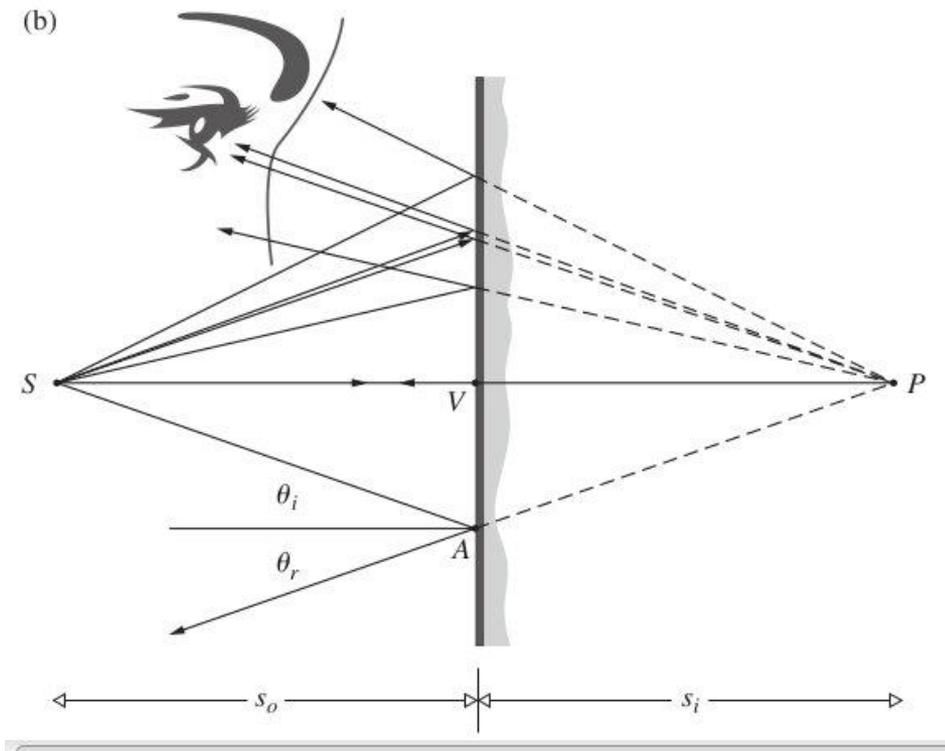
- Para obtener la imagen de una fuente puntual producida por reflexión sobre una superficie plana aplicamos la ley de reflexión sobre los rayos emitidos por la fuente puntual S.

(a)



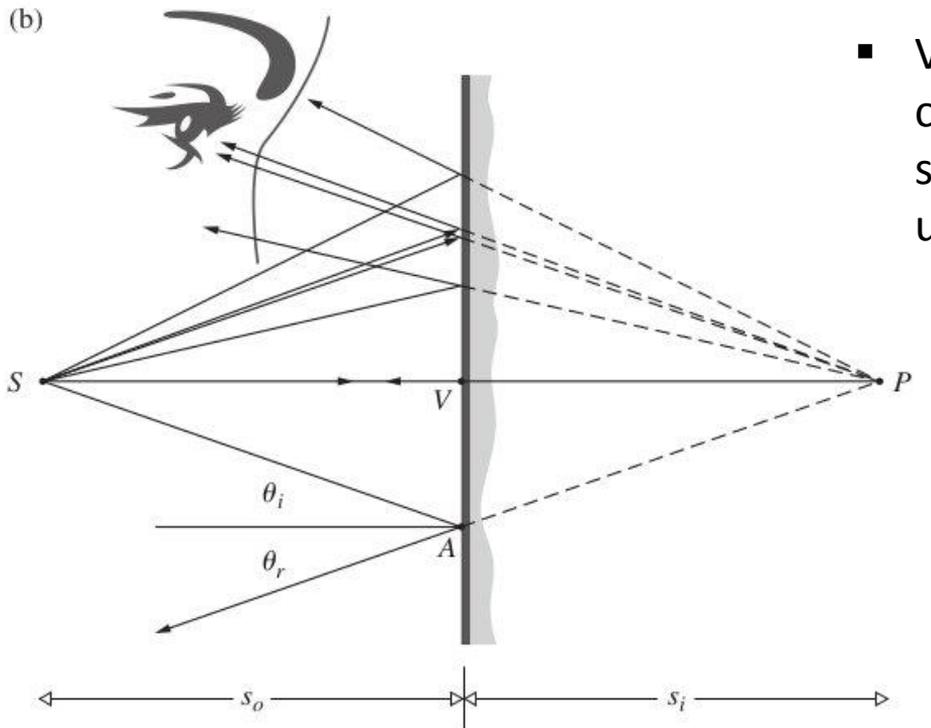
Espejos planos: formación de imágenes

- Los rayos reflejados emitidos por la fuente puntual S parecen provenir de P
- Decimos que la imagen de la fuente puntual S , es la fuente **virtual** P
- P esta ubicada a la misma distancia de la superficie del espejo que S , pero en un espacio virtual



Espejos: convención de signos

- Los rayos reflejados emitidos por la fuente puntual S parecen provenir de P
- Decimos que la imagen de la fuente puntual S , es la fuente **virtual** P
- P esta ubicada a la misma distancia de la superficie del espejo que S , pero en un espacio virtual



- Vamos a seguir la convención de que las coordenadas de objeto e imágenes virtuales sean negativas (eso pasaba con la que usamos para las lentes)

- En este ejemplo

$$s_o > 0 \quad s_i < 0$$

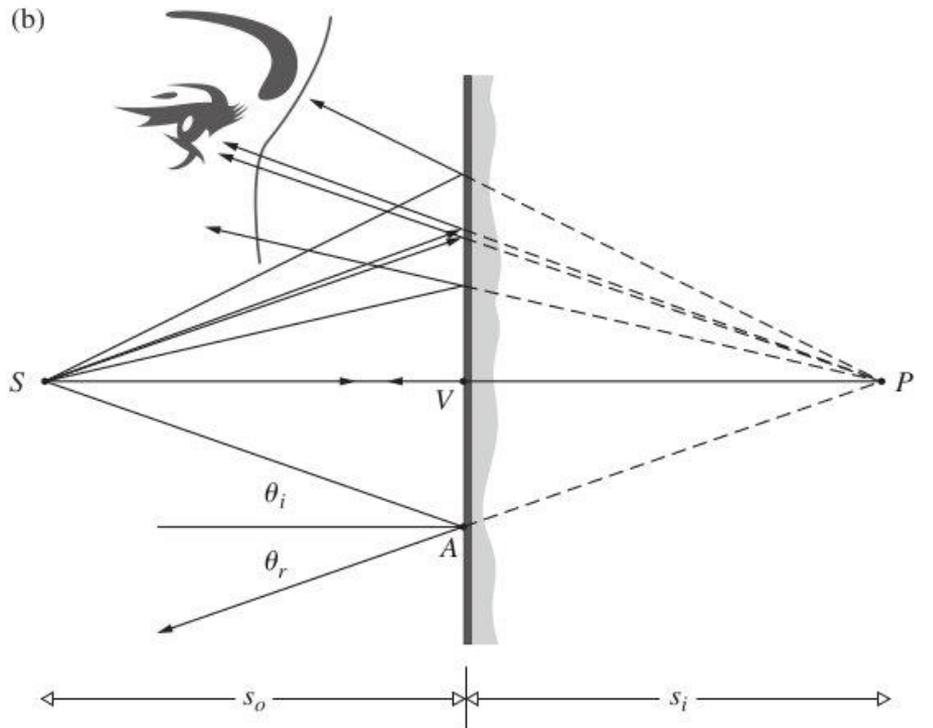
$$|s_o| = |s_i|$$

$$s_o = -s_i$$

+ ← eje s_o —————
+ ← eje s_i —————

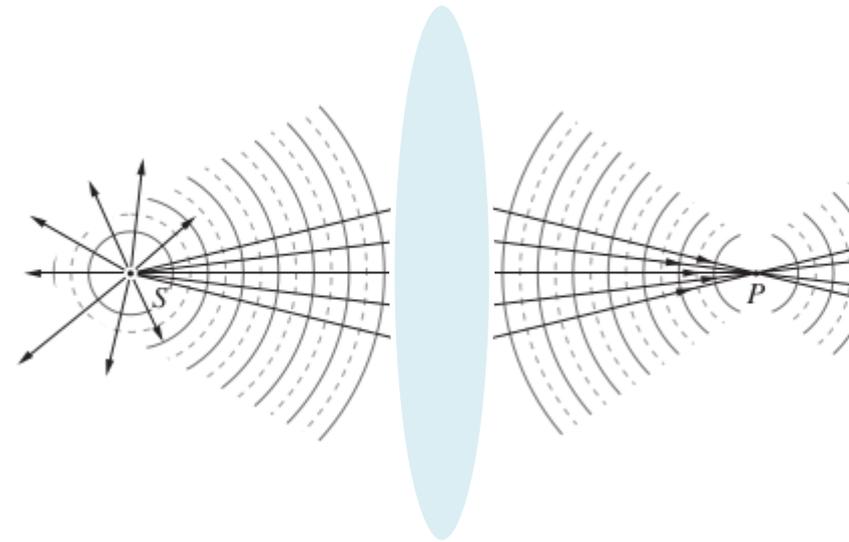
Espejos: convención de signos

- Vamos a seguir la convención de que lo que las coordenadas de objeto e imágenes virtuales sean negativas (eso pasaba con la que usamos para las lentes)



+ ← eje s_o —————
+ ← eje s_i —————

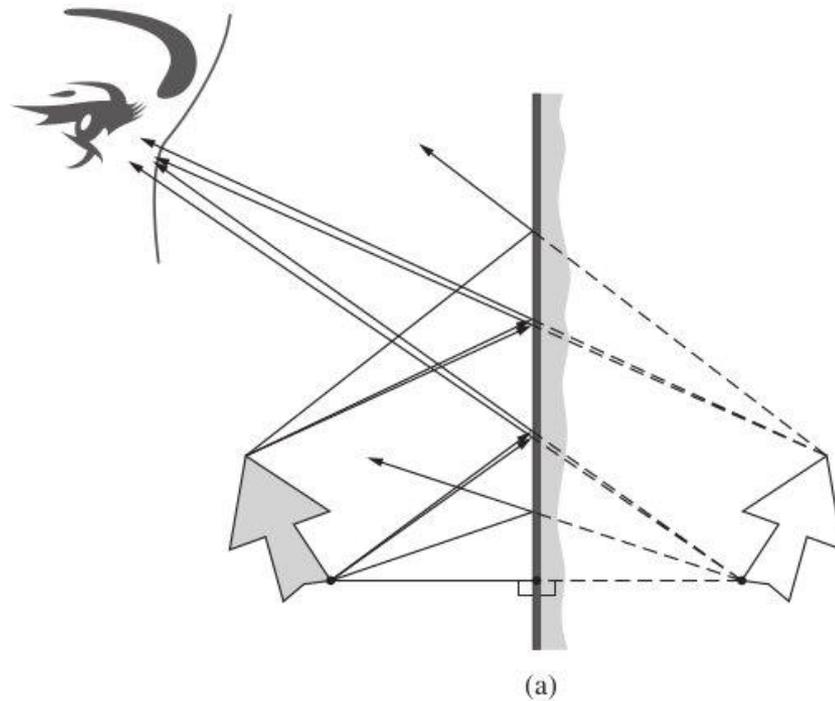
Recordemos...



+ ← eje s_o —————
————— eje s_i → +

Espejos planos: formación de imágenes

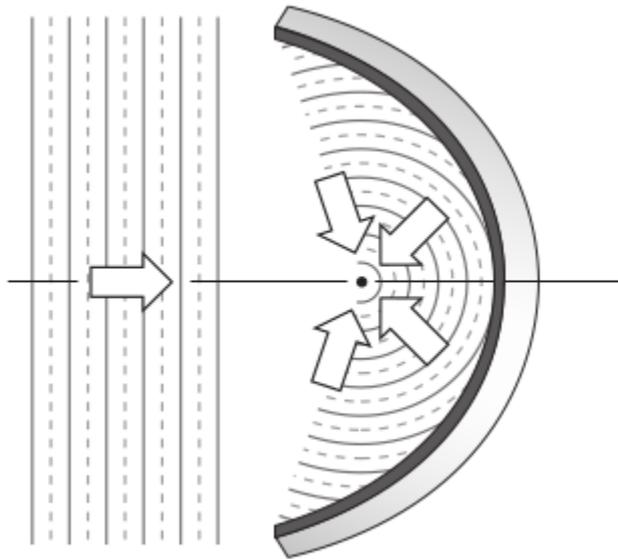
- Para obtener la imagen de un objeto extendido cada punto del mismo se lo considera una fuente puntual que producirá su imagen puntual correspondiente



Espejos curvos (mas no esféricos)

Todo lo que aprendimos para lentes nos va a servir ahora tambien...

Análogamente a lo que hicimos con dioptras (elementos refractores) nos interesa ver qué geometría de **elementos reflectores** permite transformar una onda plana en una onda esférica

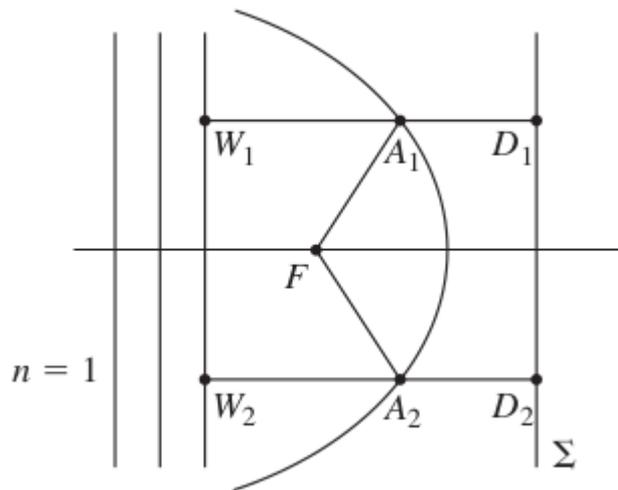


Puntos que definen un frente de onda plano se *reacomodan* en frentes de ondas esféricas que convergen a un punto...para luego seguir como si emanaran del mismo

Espejos curvos (mas no esféricos)

Todo lo que aprendimos para lentes nos va a servir ahora tambien...

Análogamente a lo que hicimos con dioptras (elementos refractores) nos interesa ver qué geometría de **elementos reflectores** permite transformar una onda plana en una onda esférica



Mantra de los caminos opticos:
La LCO de rayos que conectan puntos de dos frentes de ondas es siempre la misma

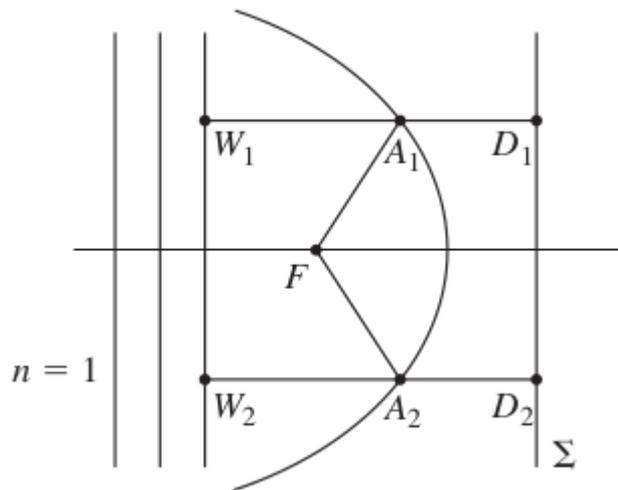
$$LCO|_{W_1A_1F} = LCO|_{W_2A_2F}$$

$$t|_{W_1A_1F} = t|_{W_2A_2F}$$

Espejos curvos (mas no esféricos)

Todo lo que aprendimos para lentes nos va a servir ahora tambien...

Análogamente a lo que hicimos con dioptras (elementos refractores) nos interesa ver qué geometría de **elementos reflectores** permite transformar una onda plana en una onda esférica



Notemos que queda definido tb un plano Σ tal que

$$|A_1F| = |A_1D_1| \quad |A_2F| = |A_2D_2|$$

y en general cualquier punto A de la superficie tiene que cumplir que

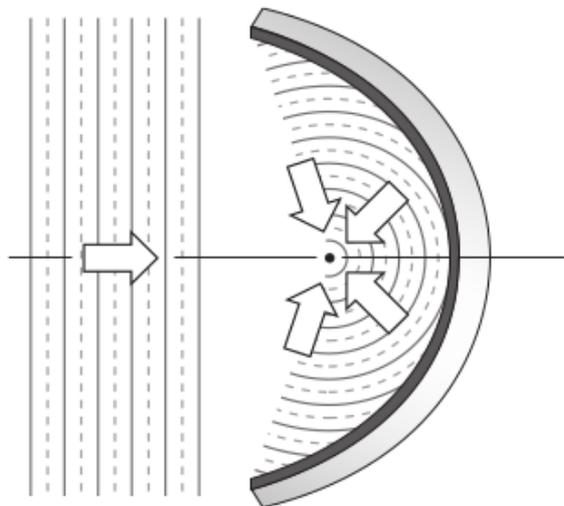
$$|AF| = |AD|$$

que es de la forma de una parabola
(me lo dijo mi primo matematico)

puntos se encuentran a la misma distancia del foco F , que de la recta directriz Σ

$$LCO|_{W_1A_1F} = LCO|_{W_2A_2F}$$

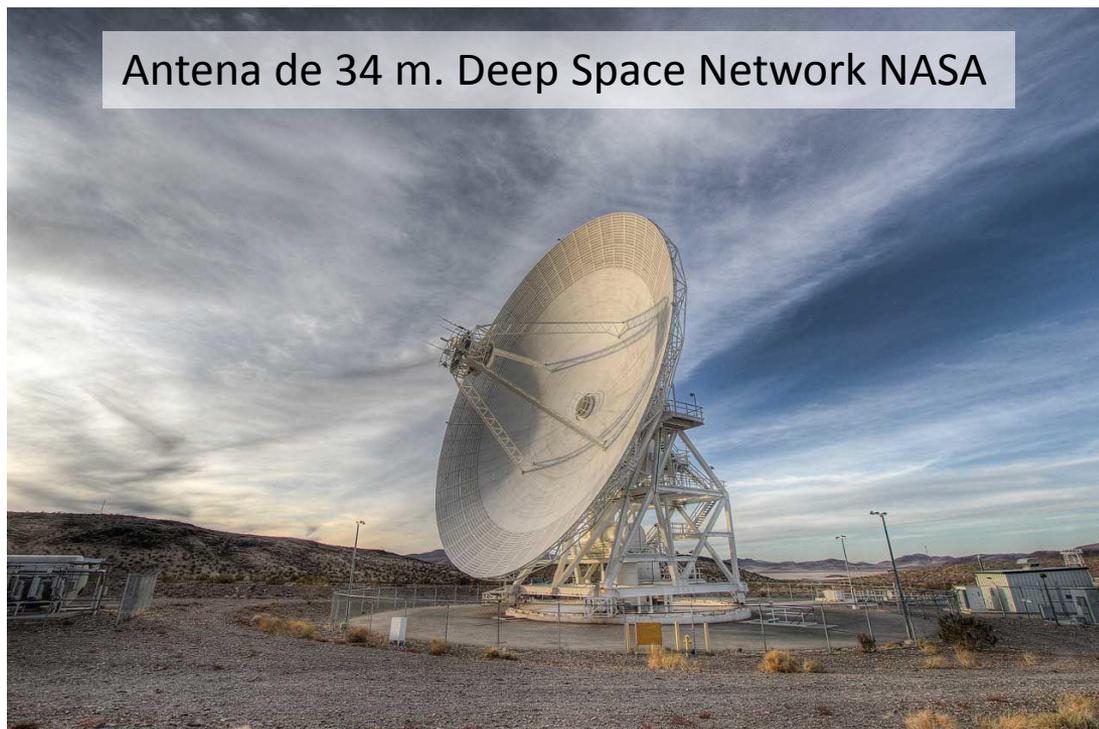
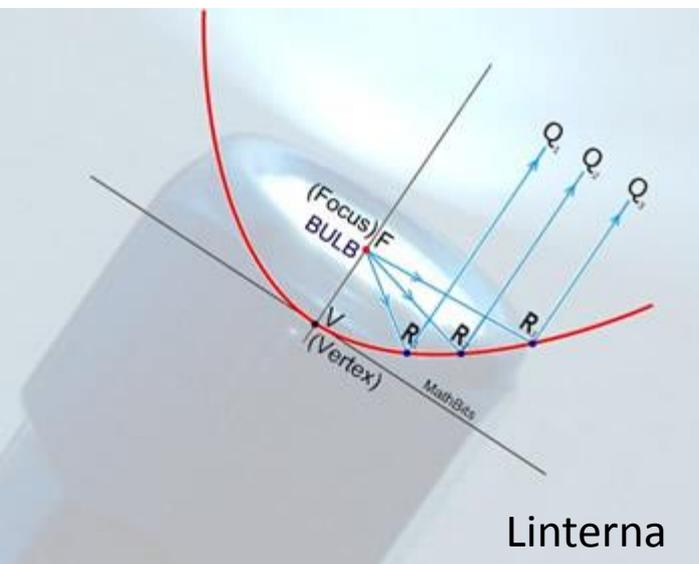
Espejos parabólicos



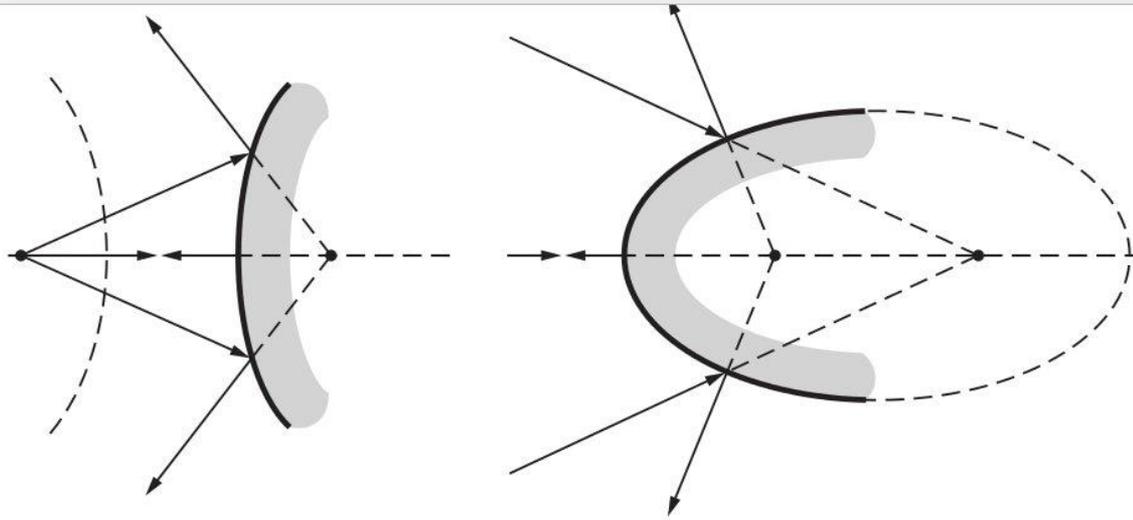
Frente de ondas plano



Frente de ondas esférico

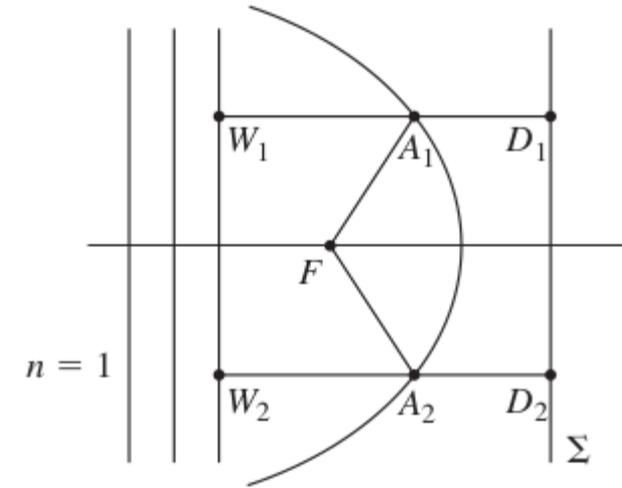


Otros espejos curvos (mas no esféricos)



(a) Convex hyperbolic

(b) Convex elliptical

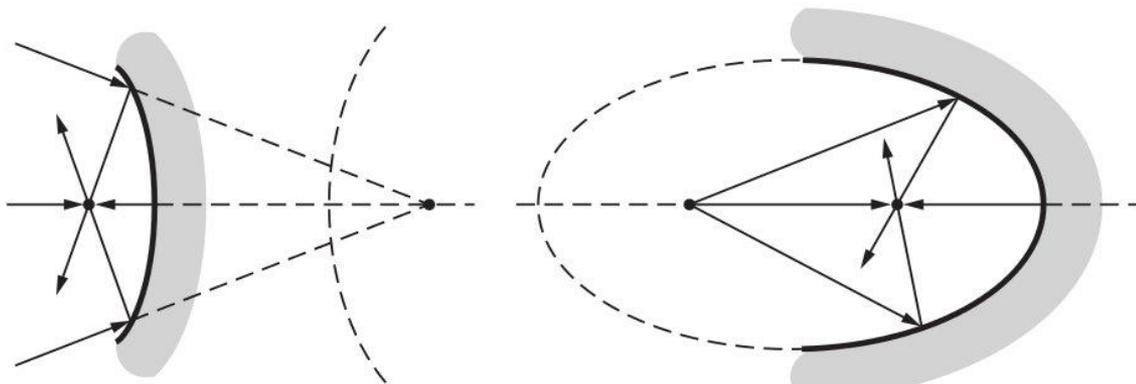


$$|AF| = e|AD|$$

$e=1$ paraboloide

$e<1$ elipsoide

$e>1$ hiperboloide



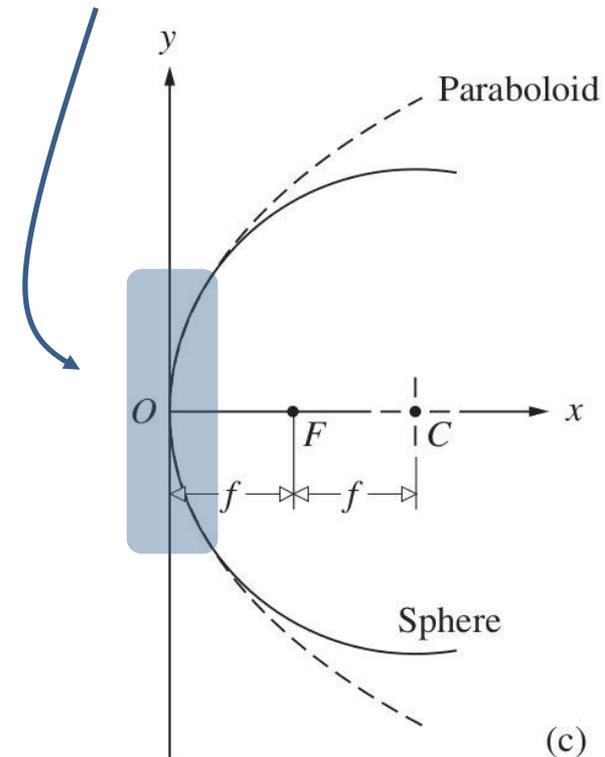
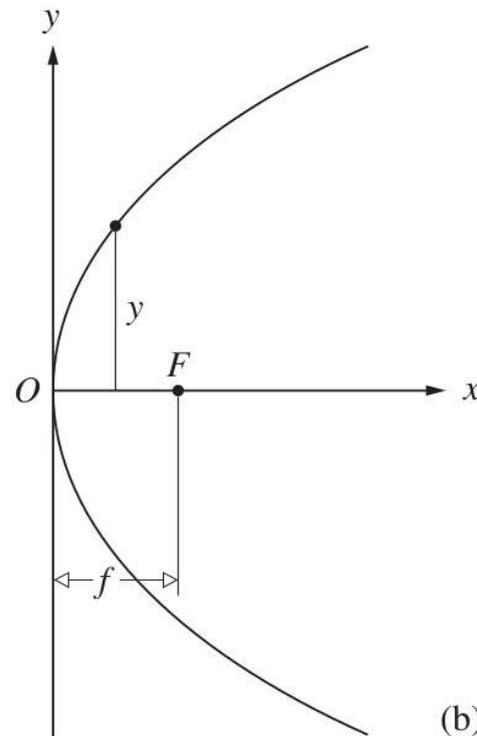
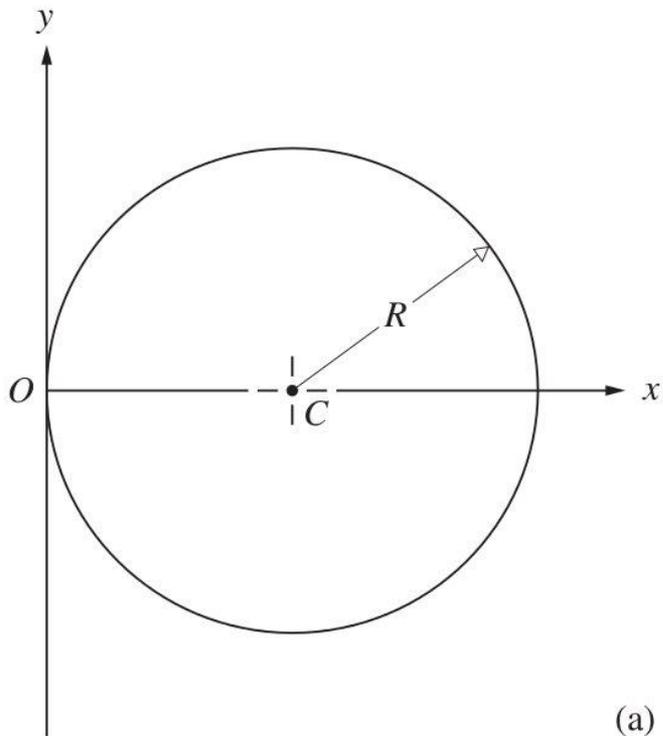
(c) Concave hyperbolic

(d) Concave elliptical

Espejos esféricos

Si, ok. Los espejos parabolicos son lo que necesitamos...pero es que los esfericos son taaanto mas faciles de fabricar!

Todo deberia funcionar bien si nuestro sistema optico esta diseñado para trabajar sólo con **rayos paraxiales**

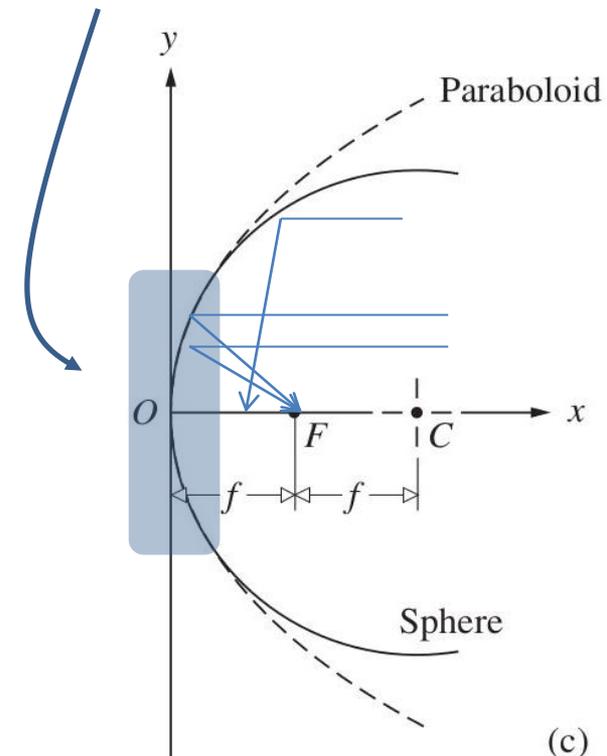


Espejos esféricos

Si, ok. Los espejos paraboloides son lo que necesitamos...pero es que los esféricos son taaanto mas faciles de fabricar!

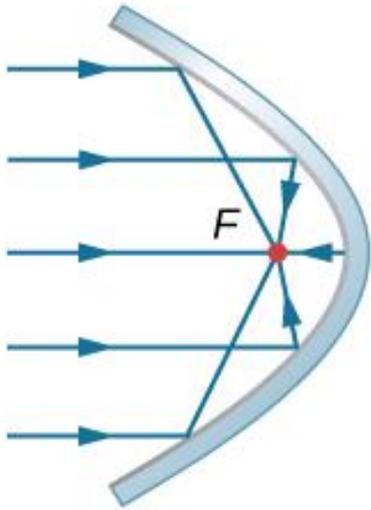
- En la aproximación paraxial los espejos esféricos podrian actuar como los espejos paraboloides.
- Si mi sistema óptico esférico no está bien diseñado (por ejemplo no bloquea rayos no-paraxiales) van a aparecer aberraciones en las imágenes producidas (la imagen de un punto sera un manchon, por ejemplo)

Todo debería funcionar bien si nuestro sistema optico esta diseñado para trabajar sólo con **rayos paraxiales**



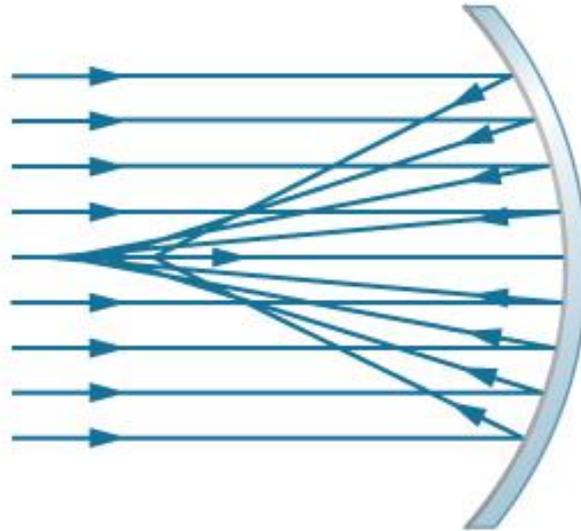
Ejemplo

Parabolic mirror



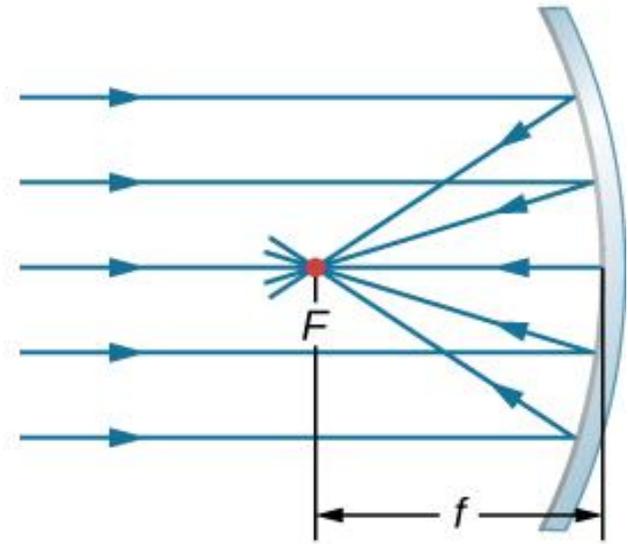
(a)

Large spherical mirror



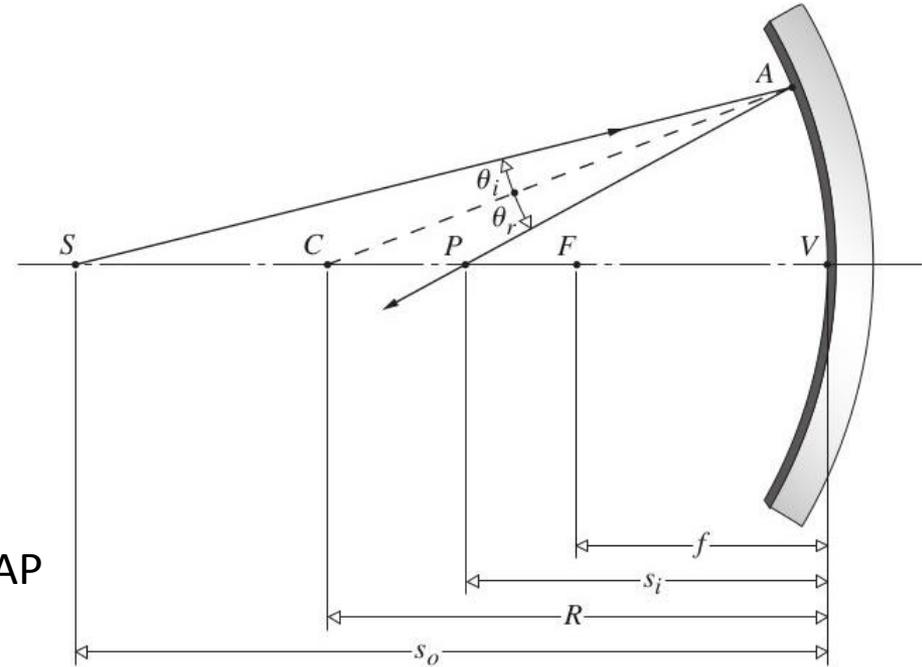
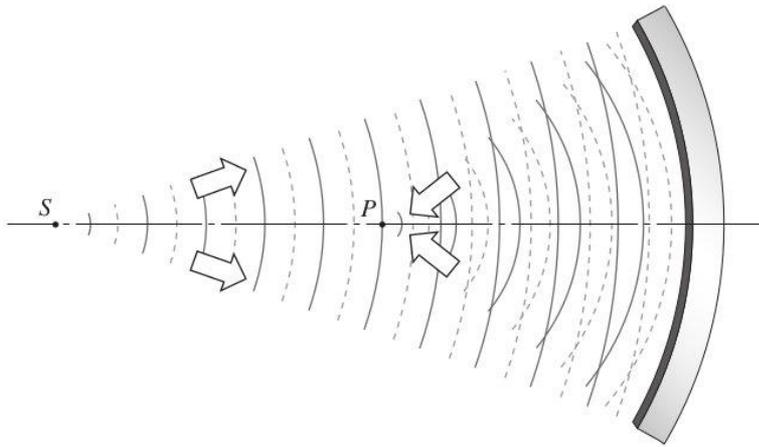
(b)

Small spherical mirror



(c)

Espejos esféricos en aprox. paraxial



- El segmento CA es bisectriz del ángulo SAP
- Por lo tanto los lados SC y CP de los triángulos SAC y CAP, resultan proporcionales a SA y PA respectivamente (obvio)

$$\frac{\overline{SC}}{\overline{SA}} = \frac{\overline{CP}}{\overline{PA}}$$



- En aprox paraxial:

$$\overline{SA} \approx s_0$$

$$\overline{PA} \approx s_i$$

$$\frac{s_0 + R}{s_0} = -\frac{s_i + R}{s_i}$$

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{R} = -\frac{1}{s_i} - \frac{1}{R}$$

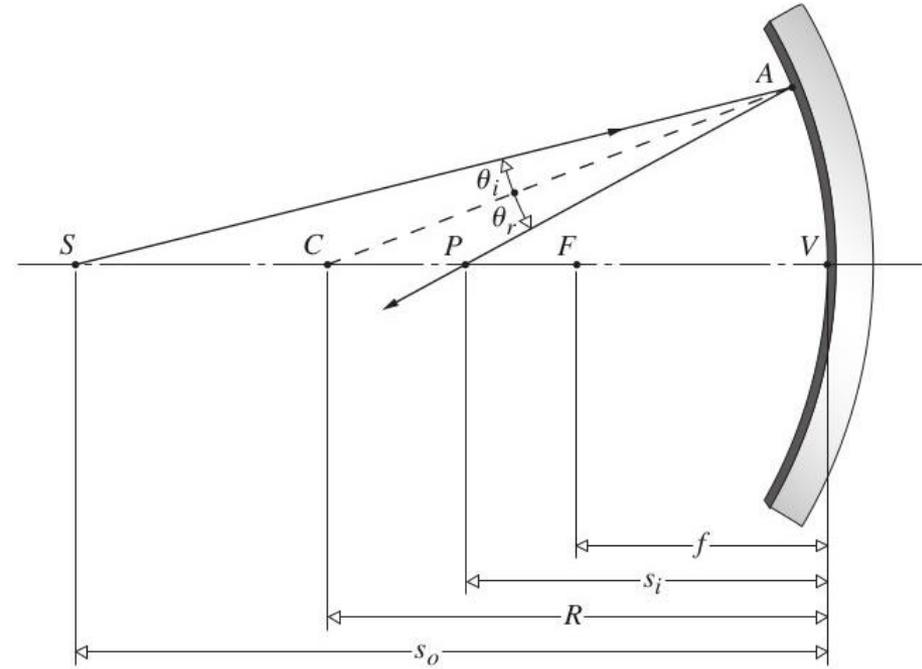
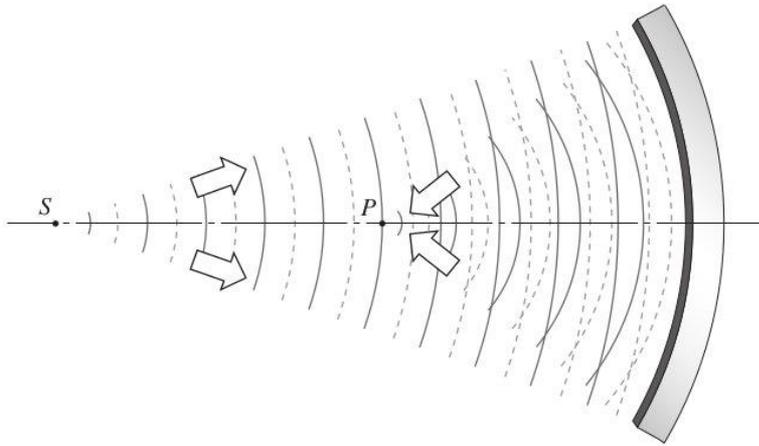
- Además:

$$\overline{SC} = s_0 - |R| \stackrel{R < 0}{=} s_0 + R$$

misma convencion que con lentes

$$\overline{CP} = |R| - s_i = -(R + s_i)$$

Espejos esféricos en aprox. paraxial



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R}$$

- En aprox paraxial: $\overline{SA} \approx s_o$
 $\overline{PA} \approx s_i$

$$\frac{s_o + R}{s_o} = -\frac{s_i + R}{s_i}$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{R} = -\frac{1}{s_i} - \frac{1}{R}$$

notar que para espejos cóncavos: $R < 0$

convexos: $R > 0$

y espejos planos?

Puntos especiales

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R}$$

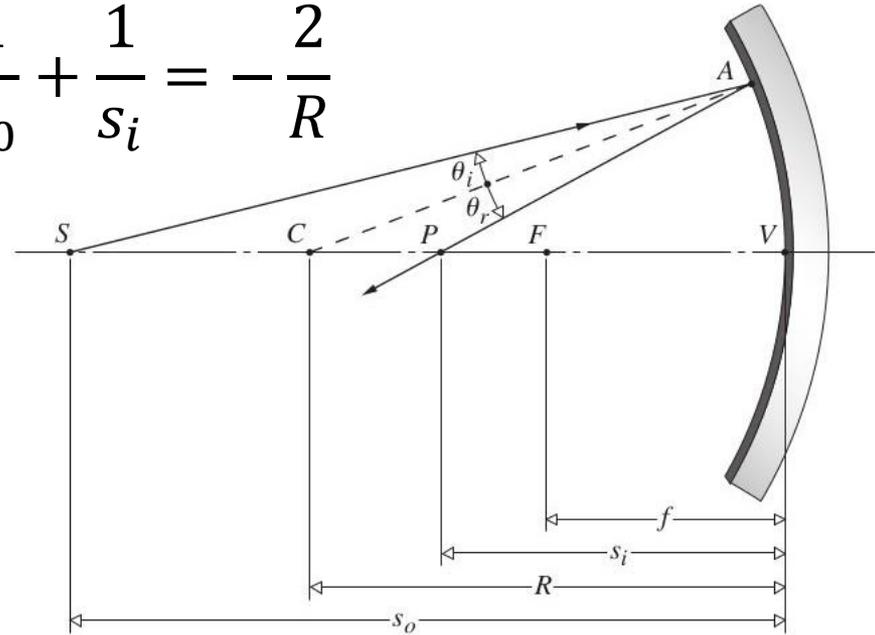
- **Foco imagen, f_i** , es el punto donde se forma la imagen cuando incide una onda plana (objeto se encuentra muy lejos, en el infinito)

~~$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f_i} = -\frac{2}{R}$$~~

- **Foco objeto, f_o** , se encuentra en la posición que produce una imagen en el infinito

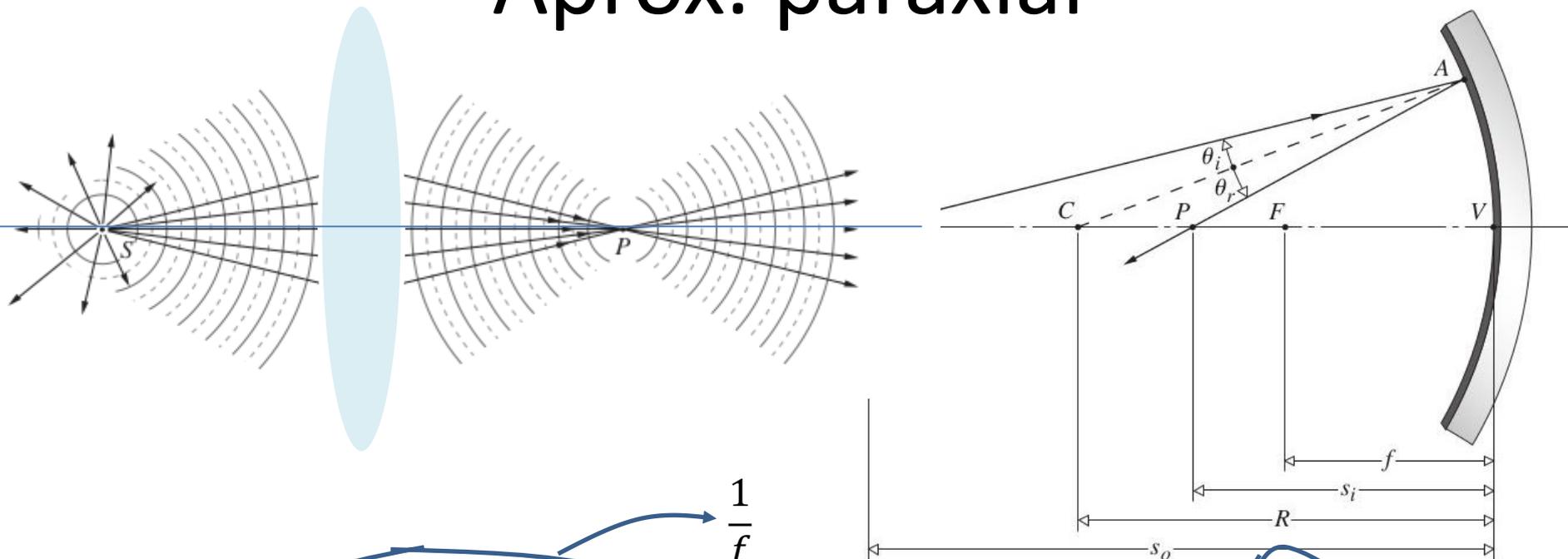
~~$$\frac{1}{f_o} + \frac{1}{\infty} = -\frac{2}{R}$$~~

$$f_i = f_o = -\frac{R}{2}$$



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Aprox. paraxial



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

$$\frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R}$$

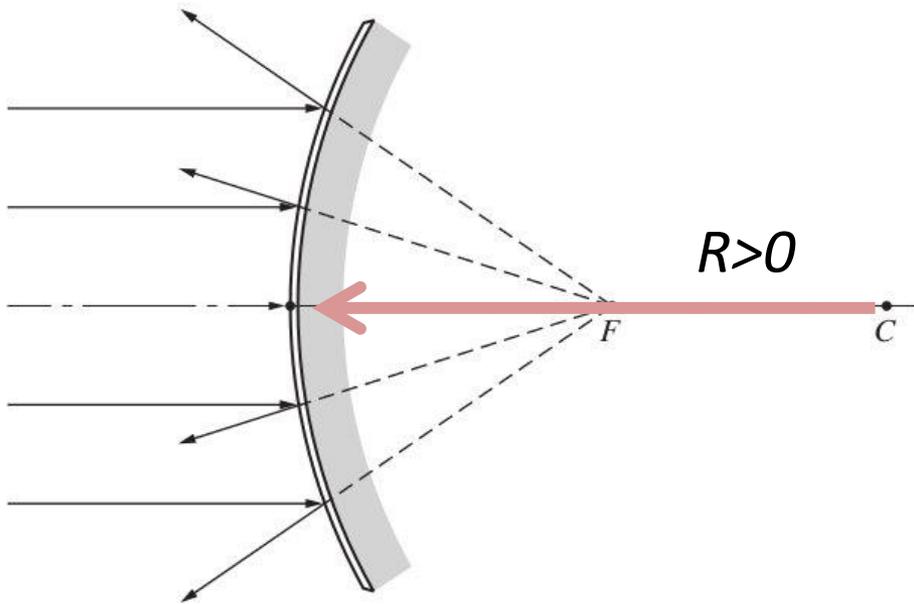
$$\frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

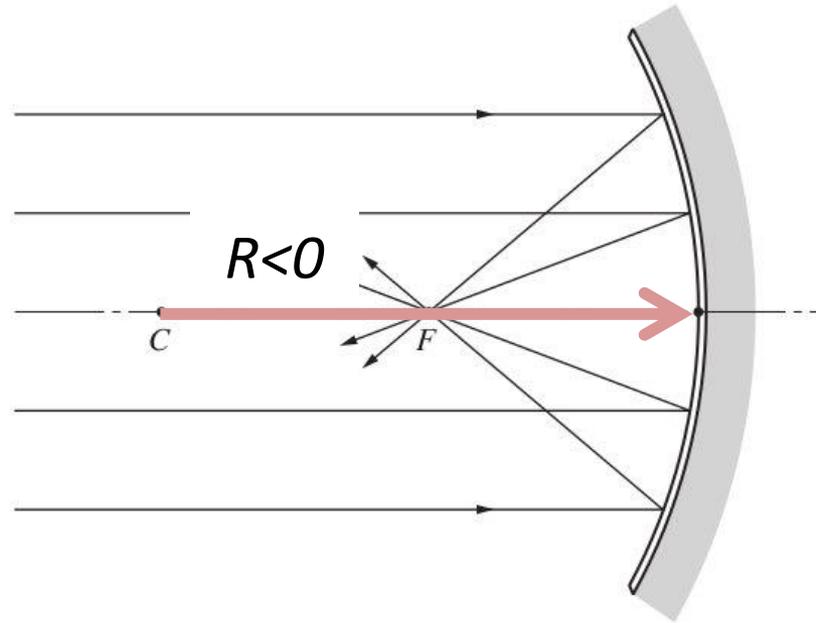
La optica paraxial de espejos se rige por la misma ecuacion que la de lentes, cuando expreso las propiedades del sistema en términos de f

Puntos especiales

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



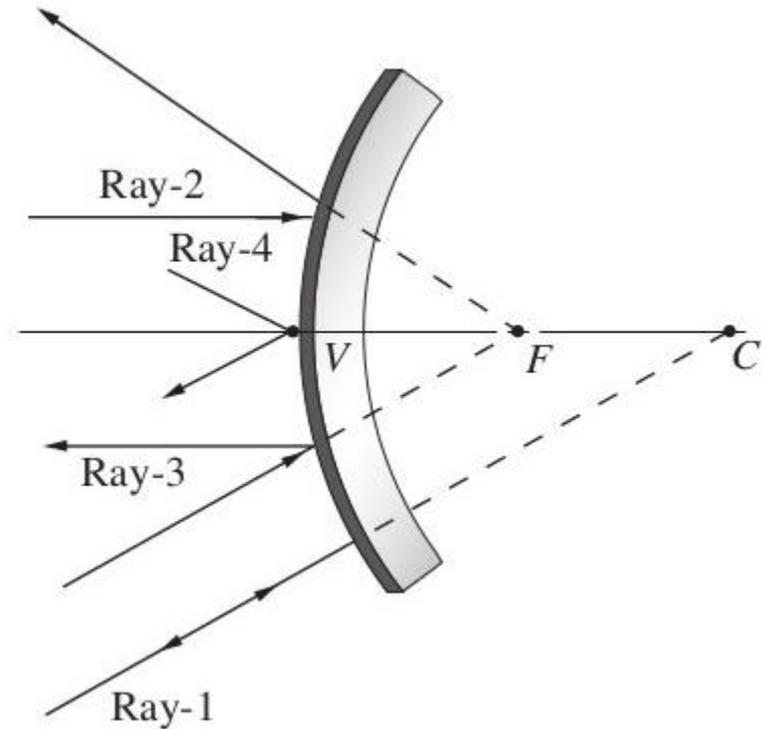
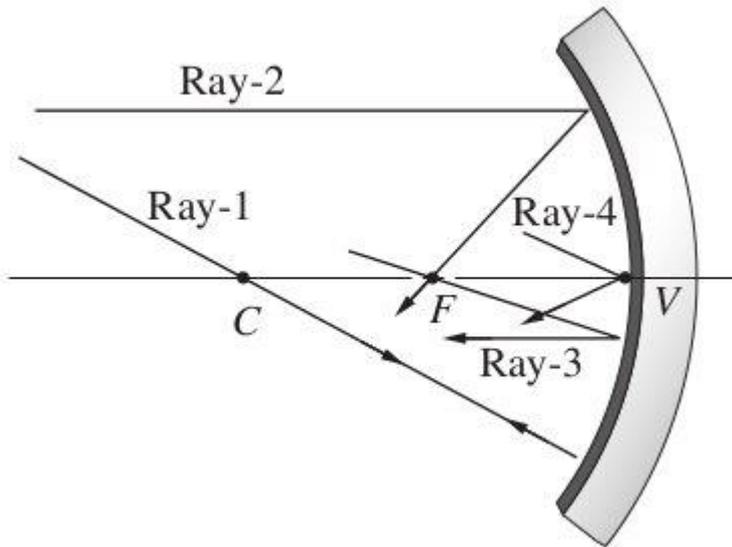
Espejo convexo



Espejo cóncavo

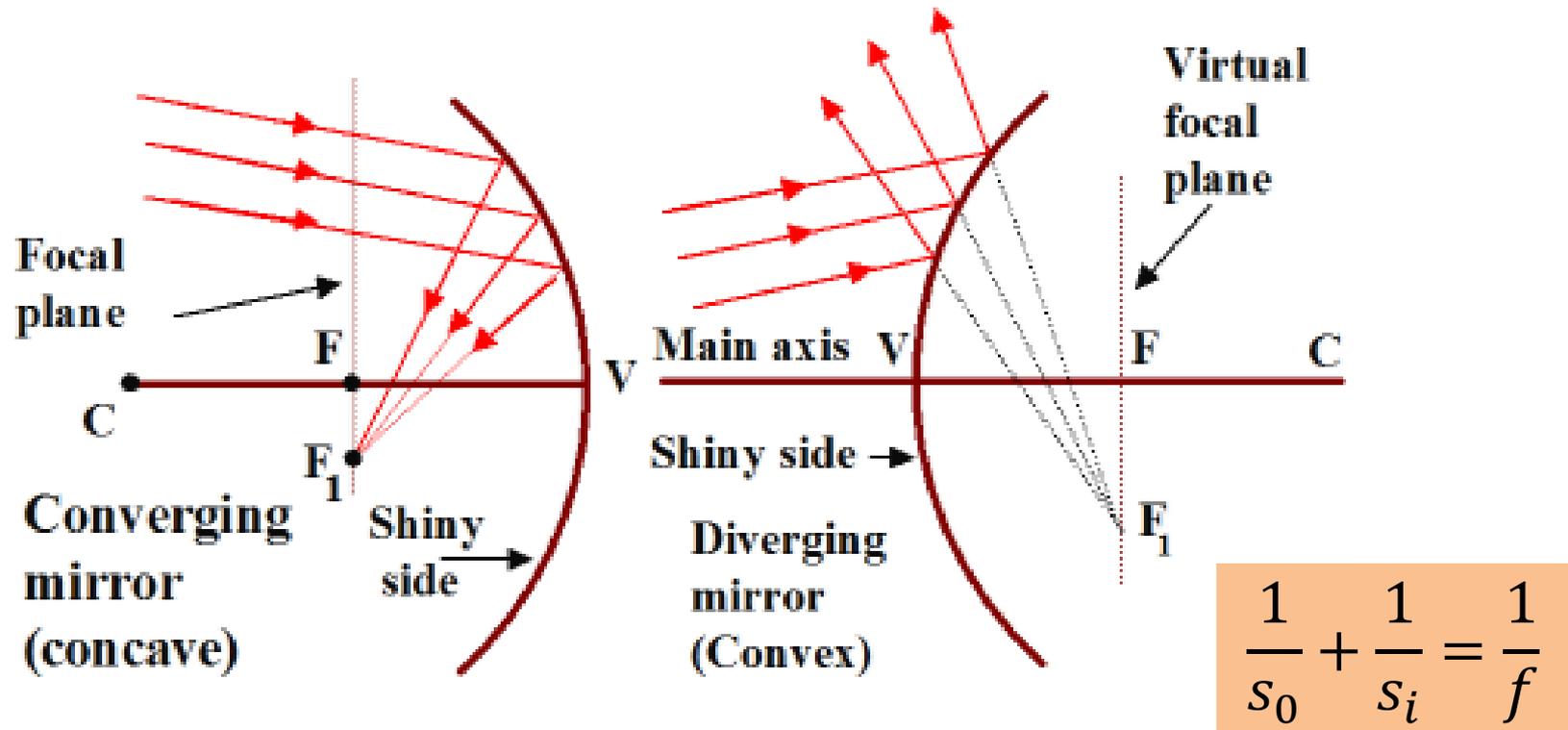
Trazado de rayos

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



1. Rayo que pasa por centro de curvatura (C), vuelve sobre sí mismo
2. Rayo incidente paralelo al eje óptico *pasa* por el foco
3. Rayo incidente que pasa por el foco emerge paralelo al eje.
4. Rayo que incide en el vertice V (es facil)

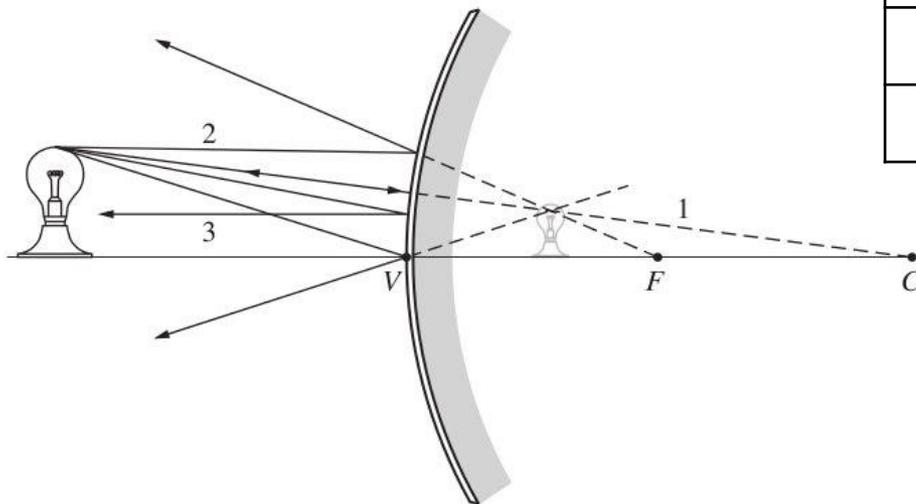
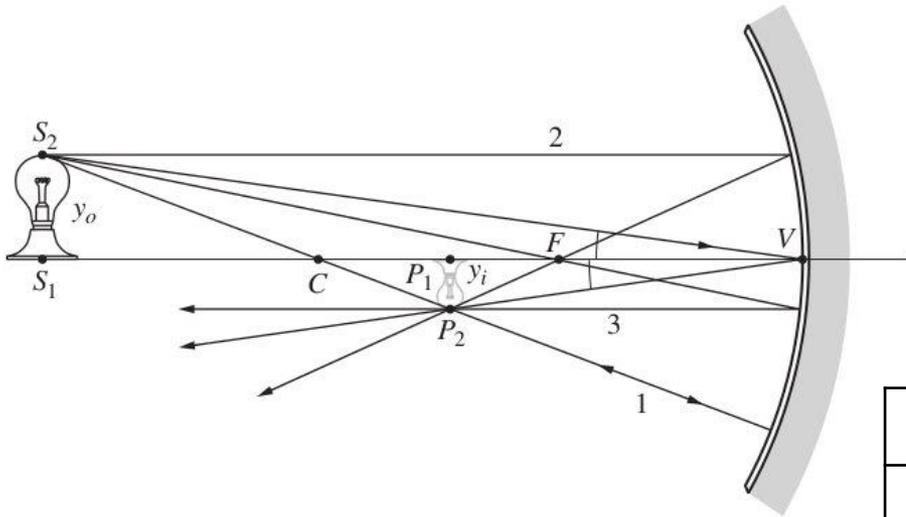
Desde el infinito y mas alla



- Manoj de rayos paralelos convergen en el **plano focal**.

Formación de imágenes

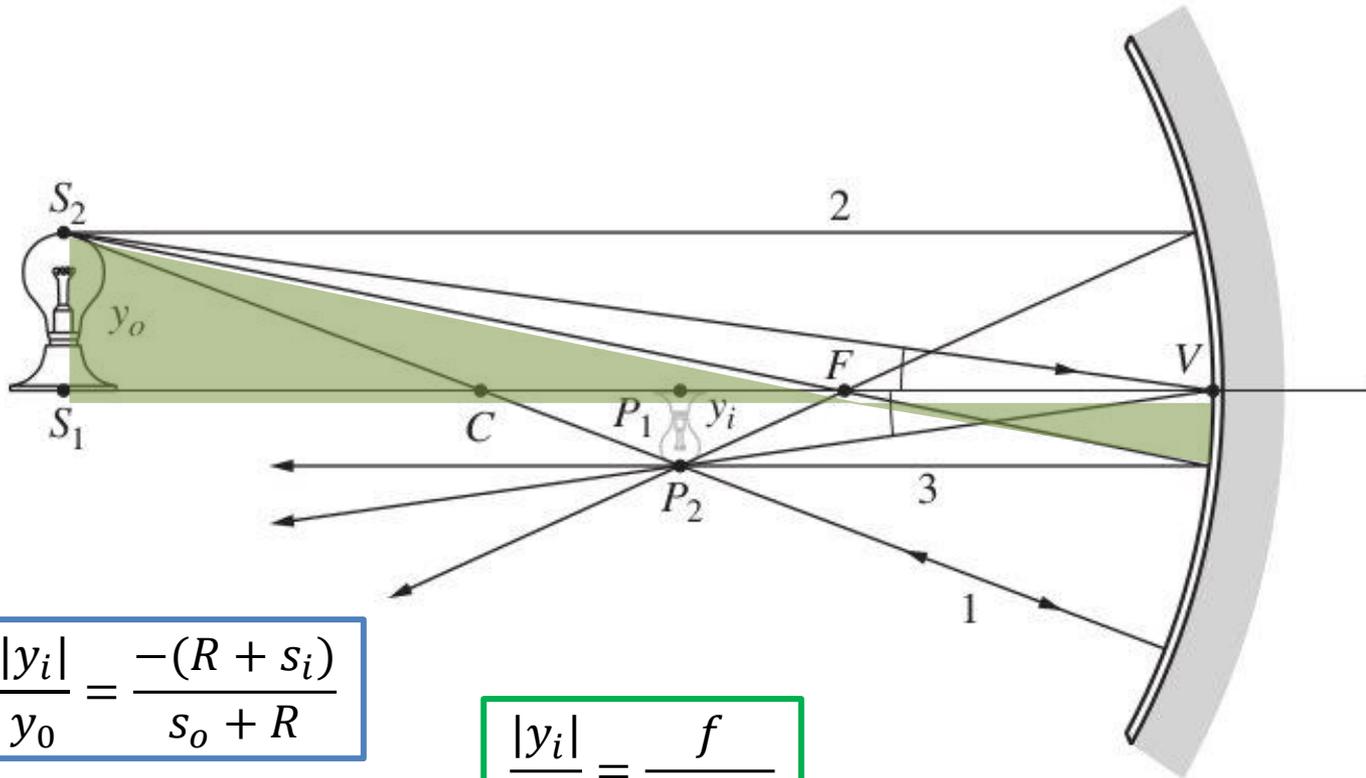
$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



s_0, f_0	+ izquierda de V
s_i, f_i	+ izquierda de V
R	+ si C esta a la derecha de V
y_0, y_i	+ encima del eje optico

Aumento lateral

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

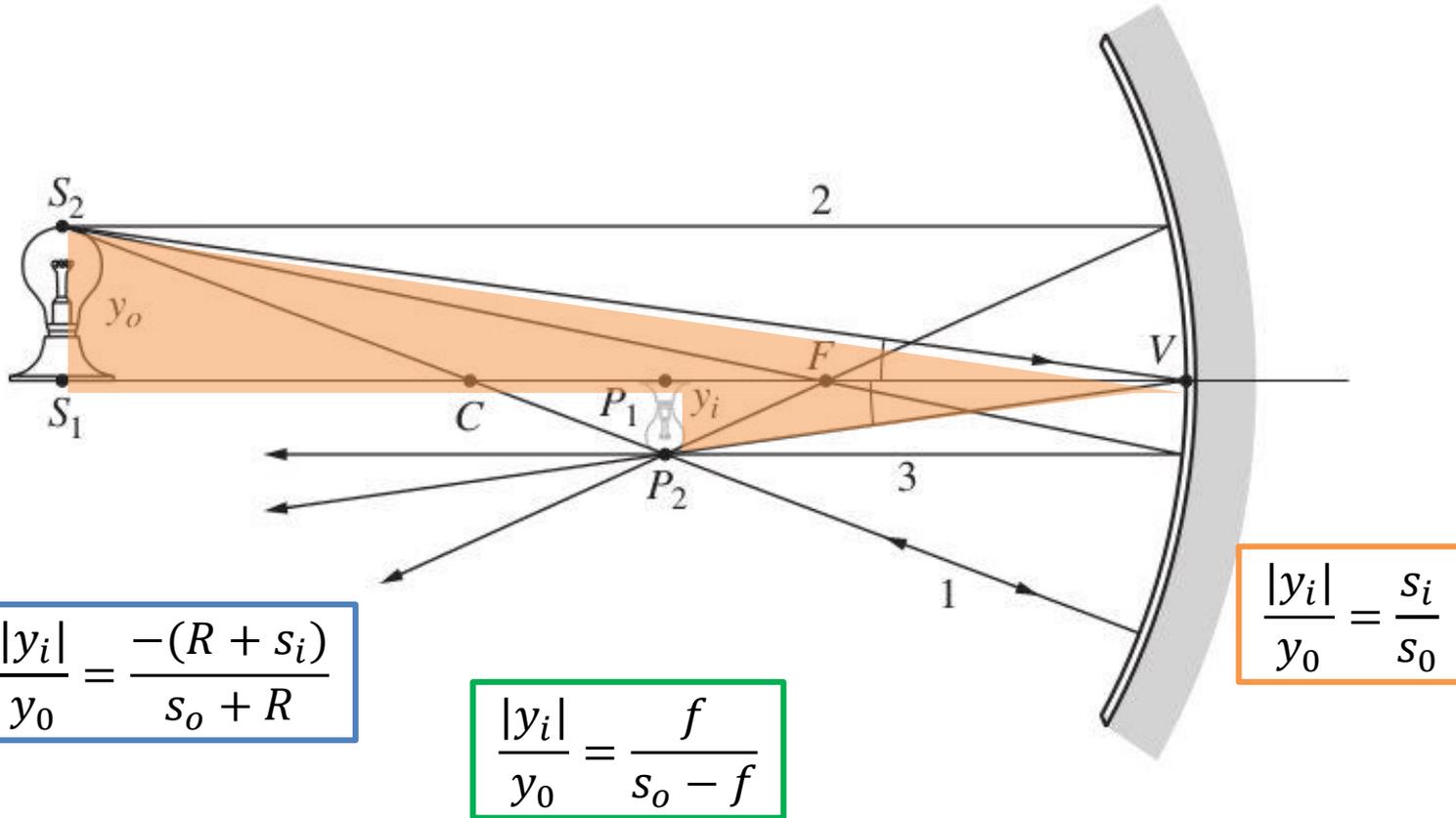


$$\frac{|y_i|}{y_o} = \frac{-(R + s_i)}{s_o + R}$$

$$\frac{|y_i|}{y_o} = \frac{f}{s_o - f}$$

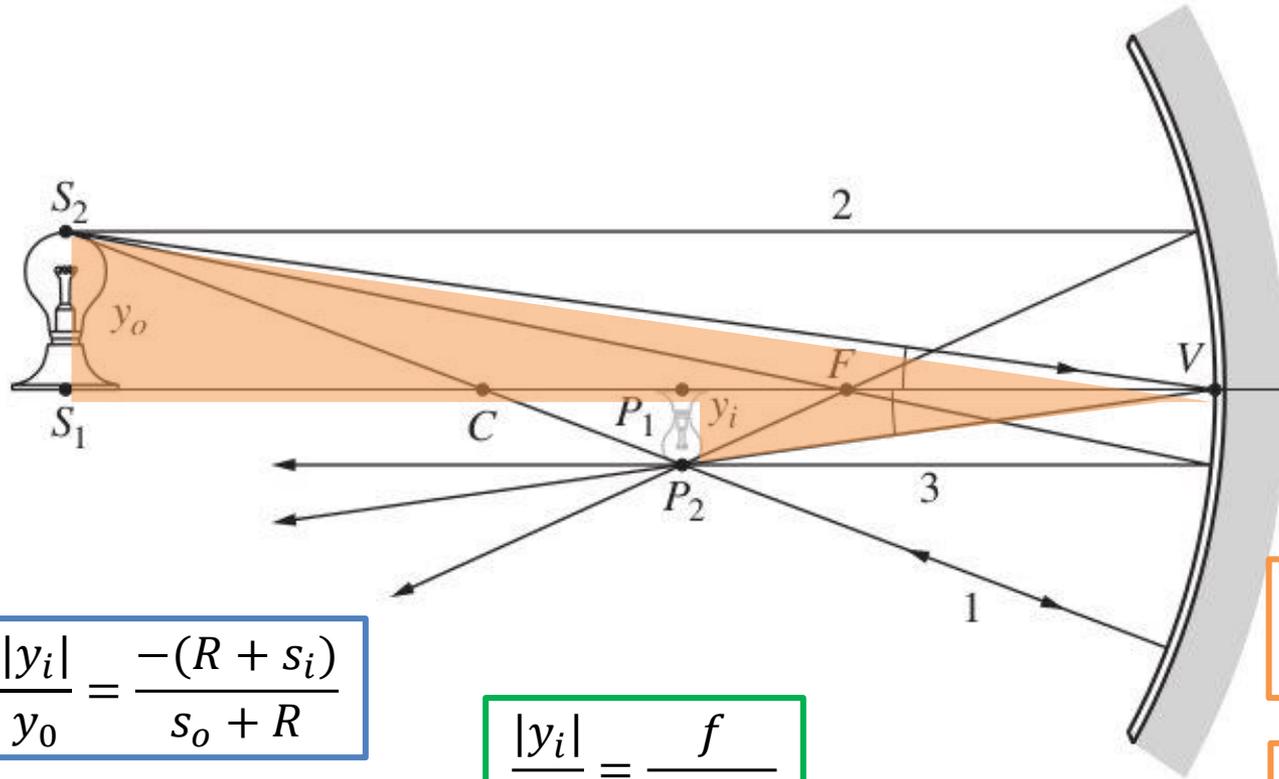
Aumento lateral

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



Aumento lateral

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



$$\frac{1}{s_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s_i}$$

$$s_o = \frac{f s_i}{s_i - f}$$

$$\frac{|y_i|}{y_o} = \frac{-(R + s_i)}{s_o + R}$$

$$\frac{|y_i|}{y_o} = \frac{f}{s_o - f}$$

$$\frac{|y_i|}{y_o} = \frac{s_i}{s_o}$$

$$\frac{|y_i|}{y_o} = \frac{s_i - f}{f}$$

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{f}{f - s_o} = \frac{s_i - f}{f}$$

Aumento Lateral

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{f}{f - s_o} = \frac{s_i - f}{f}$$

