

# Refracción y reflexión de la luz

# La luz en la materia

- Cuando la luz encuentra un material, esta puede interactuar con él de diferentes maneras dependiendo normalmente de su longitud de onda:
  - Reflexión
  - Absorción
  - Dispersión
- Materiales ópticamente transparentes: materiales en los que los tres efectos son depreciables en el rango de longitudes de onda de interés.
- En el rango visible ( $\lambda$  entre 380 y 740 nm), materiales como el agua o el vidrio son transparentes.

# La luz en la materia

- En medios ópticamente transparentes, la velocidad de propagación de la luz  $v$  es menor a su valor en el vacío  $c$ .
- Una cantidad importante de un material transparente es el índice de refracción  $n$ , definido como

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

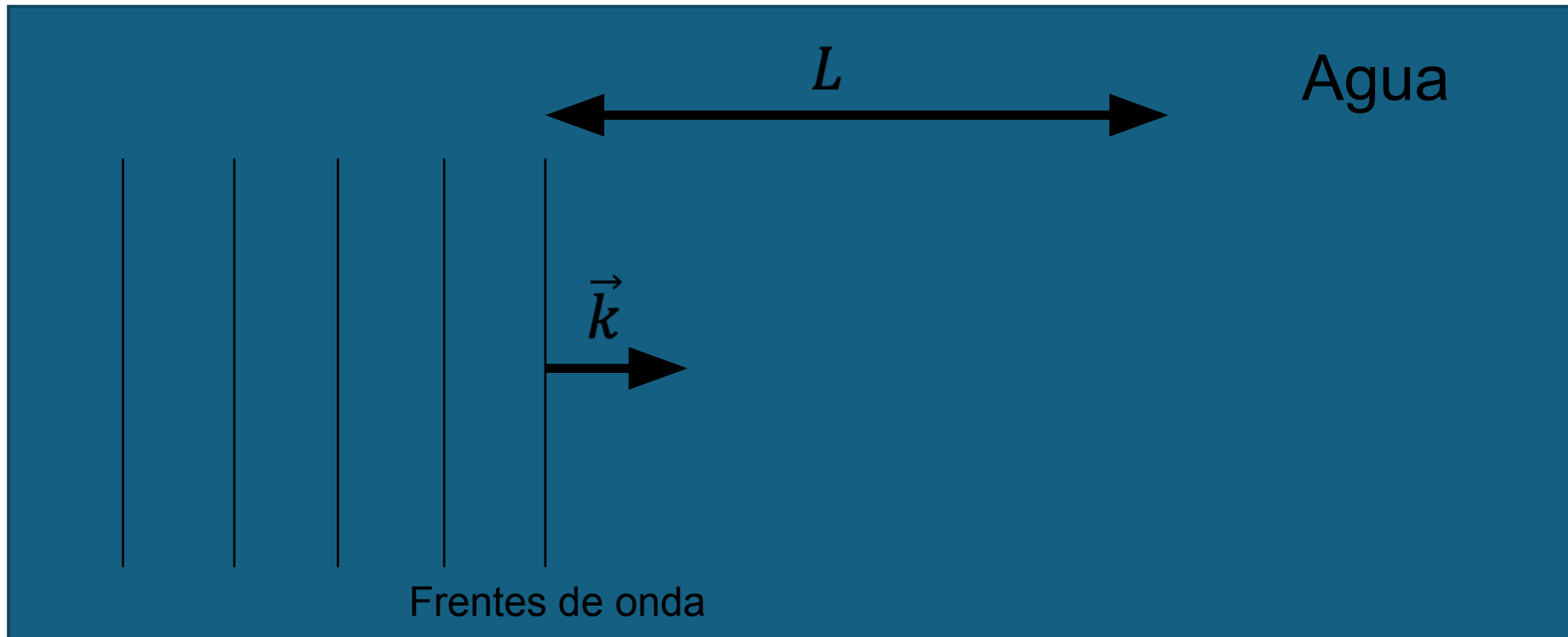
- $n$  es adimensional y  $n \geq 1$



| <b>Table 1. Index of Refraction of Various Materials.</b> |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Material</b>                                           | <b>Index of Refraction</b> |
| Vacuum                                                    | 1.0000                     |
| Air                                                       | <b>1.0003</b>              |
| Water (pure)                                              | 1.3330                     |
| Seawater (35 ppt)                                         | 1.3394                     |
| Ethyl alcohol                                             | 1.361                      |
| Sugar solution (80% sugar)                                | 1.49                       |
| Glass (soda lime)                                         | 1.510                      |
| Bromine (liquid)                                          | 1.661                      |
| Ruby                                                      | 1.760                      |
| Diamond                                                   | 2.417                      |

# Camino óptico

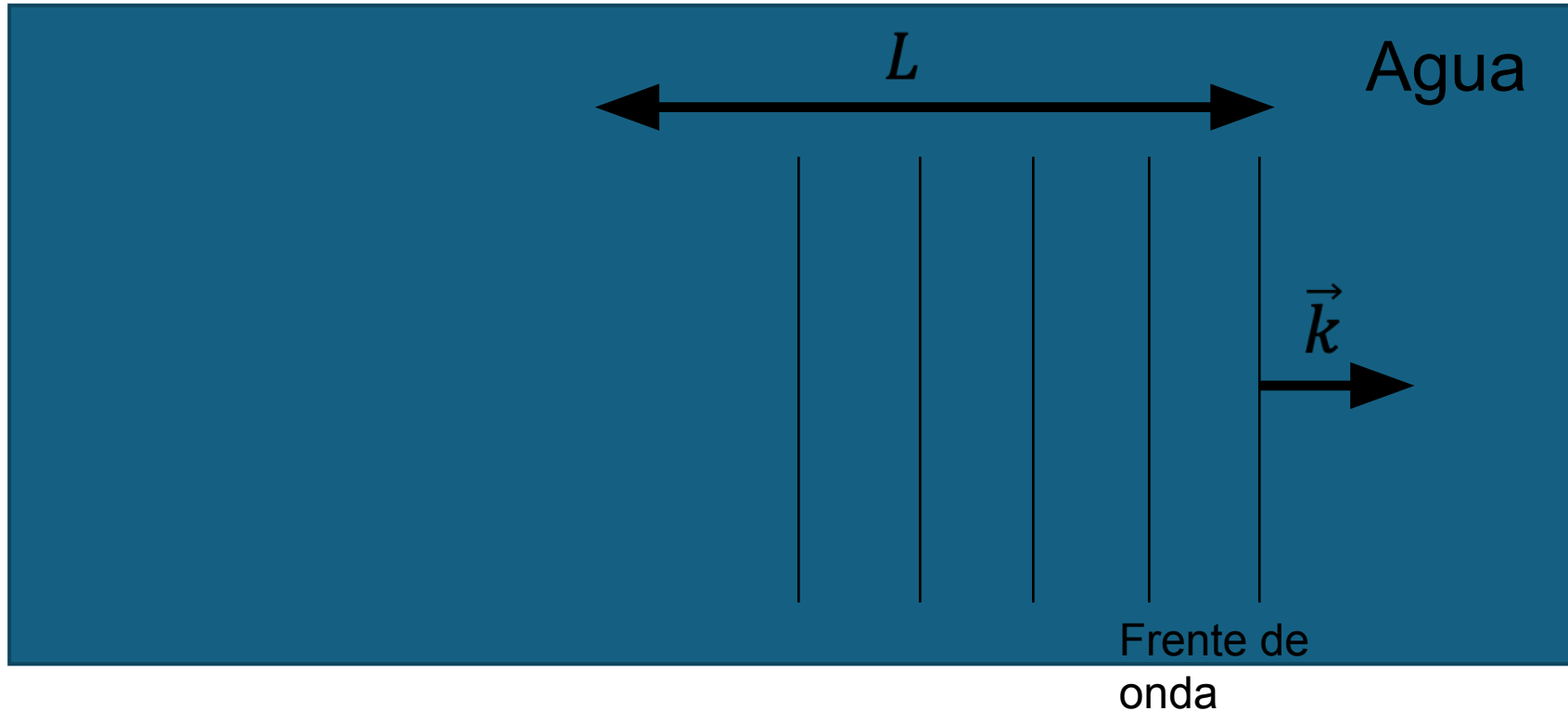
- Dada una onda EM que recorre una distancia  $L$



# Camino óptico

- Dada una onda EM que recorre una distancia  $L$ , el camino óptico se define como:

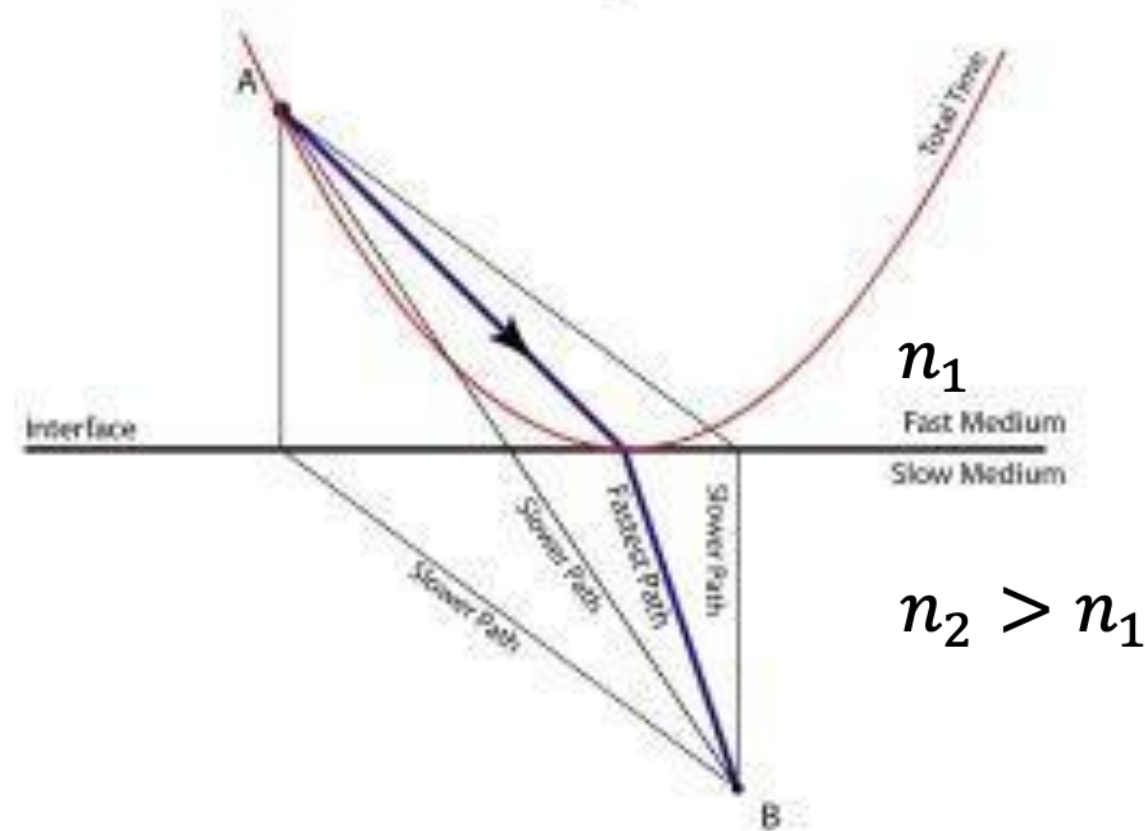
$$C.O. = nL$$



# Principio de Fermat y Ley de Snell

**El principio de Fermat**, relacionado con el principio de mínima acción, dice:

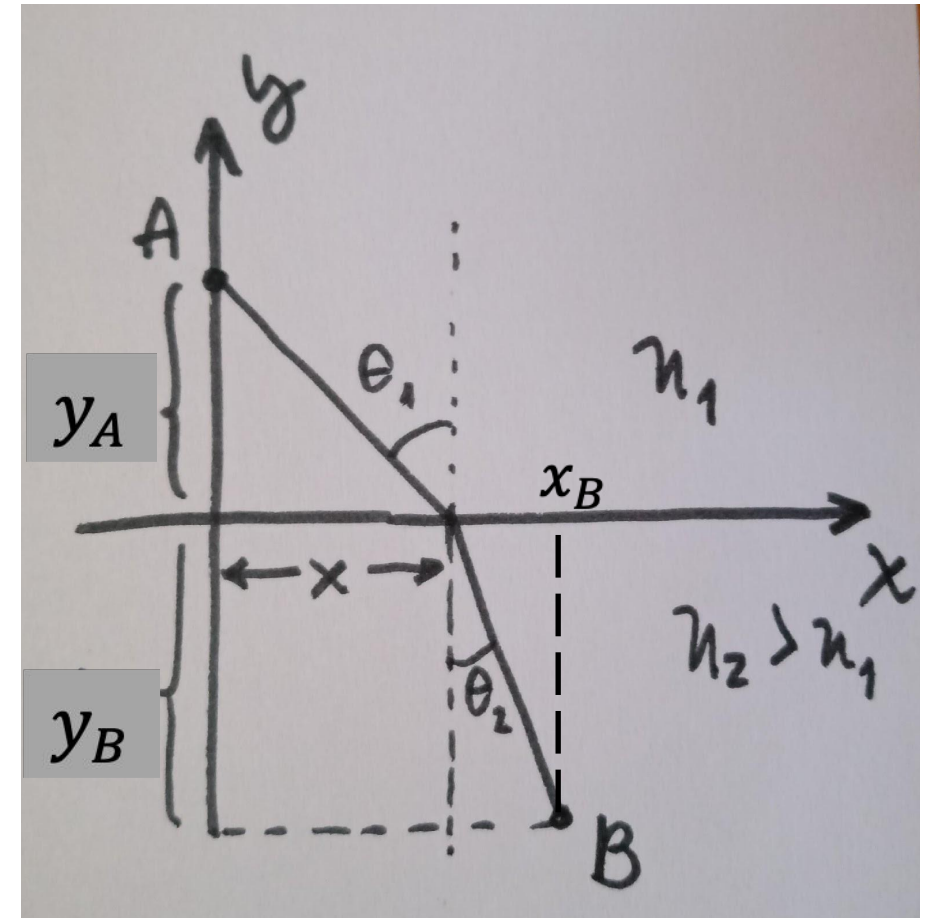
- El camino que recorre la luz entre dos puntos, es tal que minimiza el tiempo en el que realiza el recorrido
- Esto equivale a decir que el recorrido óptimo es el de menor camino óptico.



# Principio de Fermat y Ley de Snell

- Supongamos dos medios de índices  $n_1$  y  $n_2 > n_1$ .
- El camino de la onda (rayo) pasa por los puntos A  $(0, y_A)$  y B  $(x_B, y_B)$ .
- Sea  $x$  la abscisa del punto sobre la interfase donde impacta el rayo
- El camino óptico total recorrido entre A y B es C.O.

$$= n_1 \sqrt{x^2 + y_A^2} + n_2 \sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}$$





# Principio de Fermat y Ley de Snell

$$C.O. = n_1 \sqrt{x^2 + y_A^2} + n_2 \sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}$$

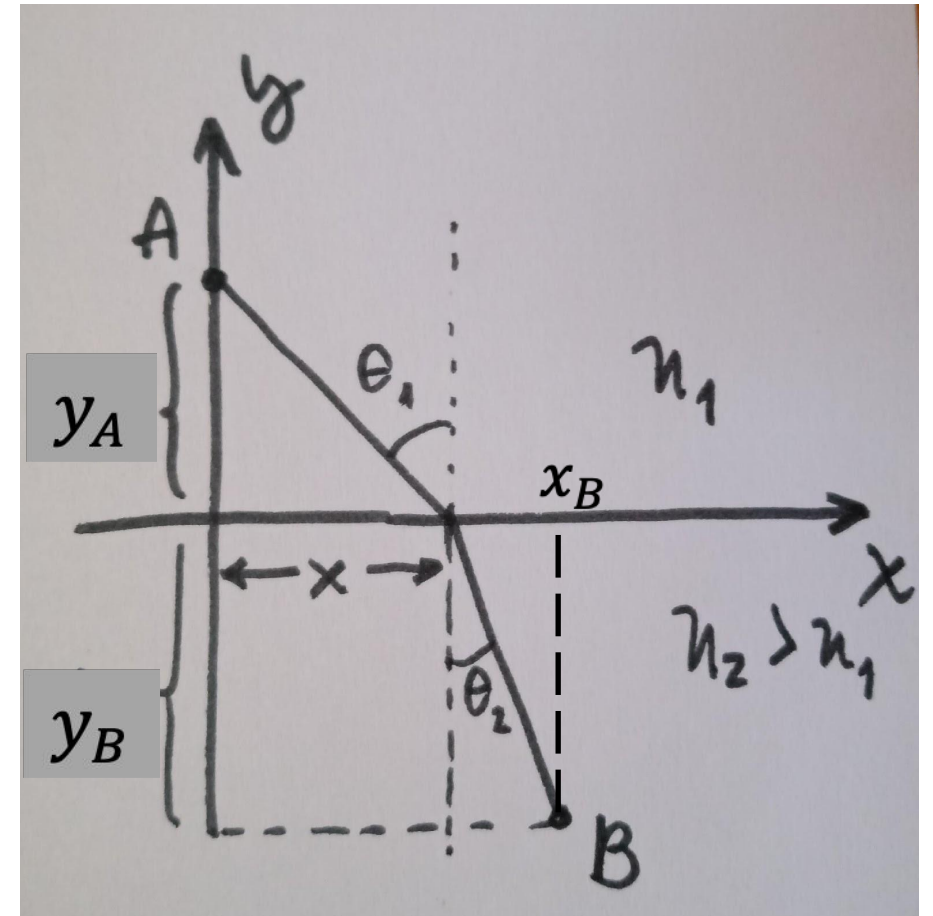
$$\frac{\partial C.O.}{\partial x} = \frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + y_A^2}} - n_2 \frac{(x_B - x)}{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}$$

Busco mínimo

$$\frac{\partial C.O.}{\partial x} = 0$$

luego

$$\frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + y_A^2}} = \frac{n_2 (x_B - x)}{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}$$



# Principio de Fermat y Ley de Snell

$$C.O. = n_1 \sqrt{x^2 + y_A^2} + n_2 \sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}$$

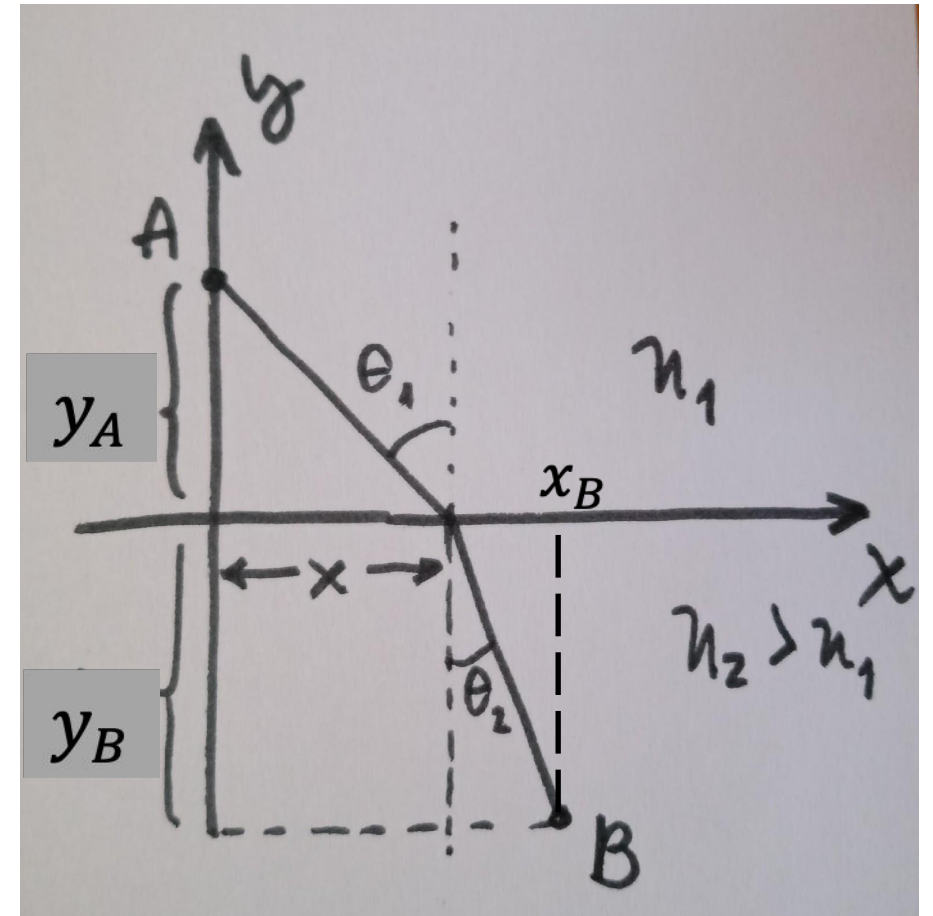
$$\frac{\partial C.O.}{\partial x} = \frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + y_A^2}} - n_2 \frac{(x_B - x)}{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}$$

Busco mínimo

$$\frac{\partial C.O.}{\partial x} = 0$$

luego

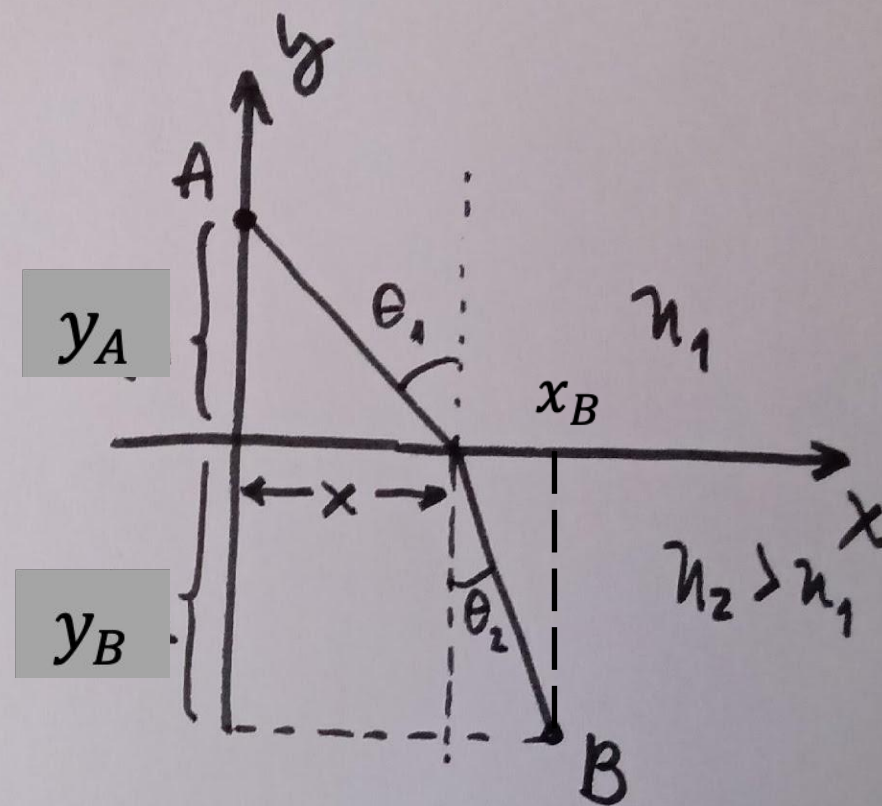
$$\frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + y_A^2}} = \frac{n_2 (x_B - x)}{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}$$



pero:

$$\sin \theta_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y_A^2}}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{x_B - x}{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}$$



Entonces, la condición que minimiza el c.o. entre A y B es

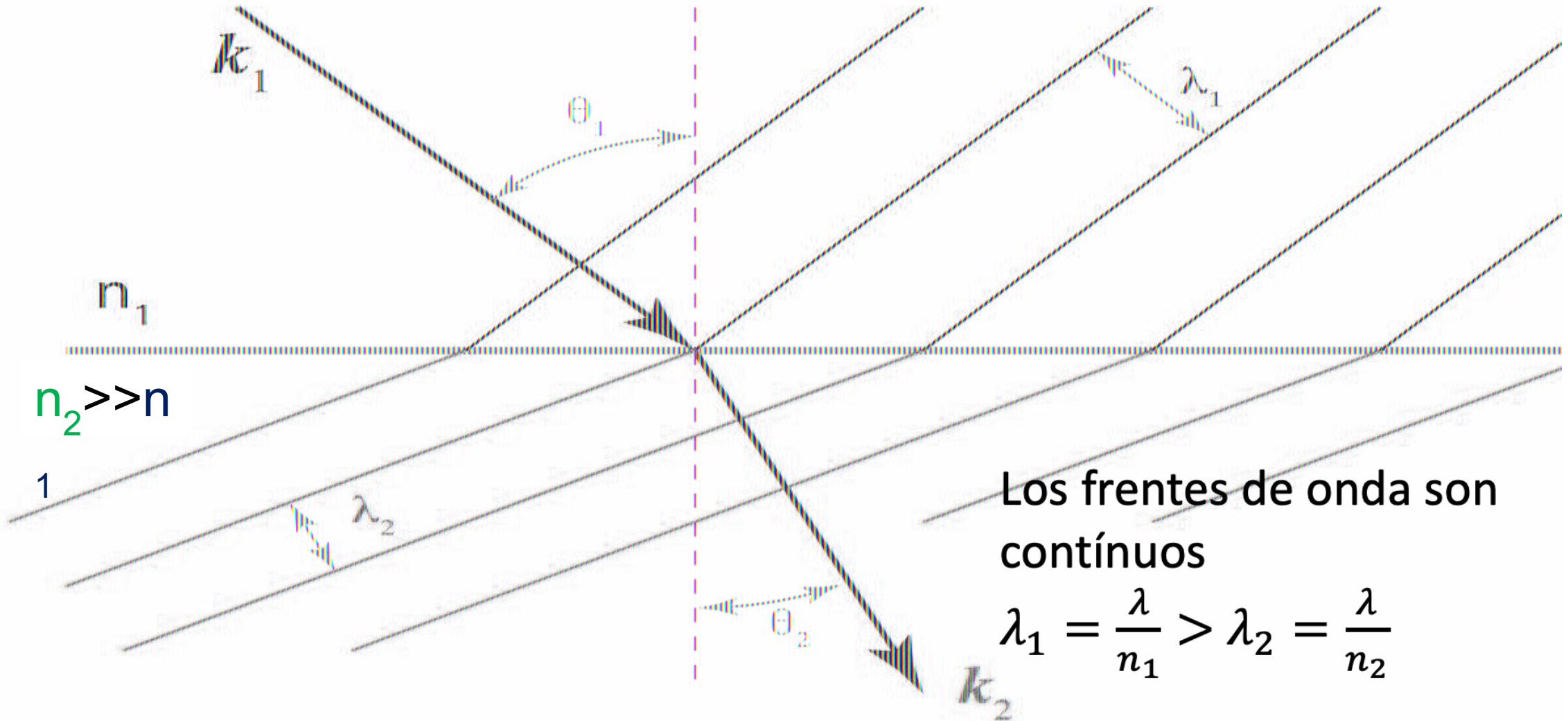
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Ley de  
Snell



# Snell's Law

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



# Placas plano paralelas

Supongamos una placa de caras paralelas planas de vidrio en aire.

Aire:  $n_1$

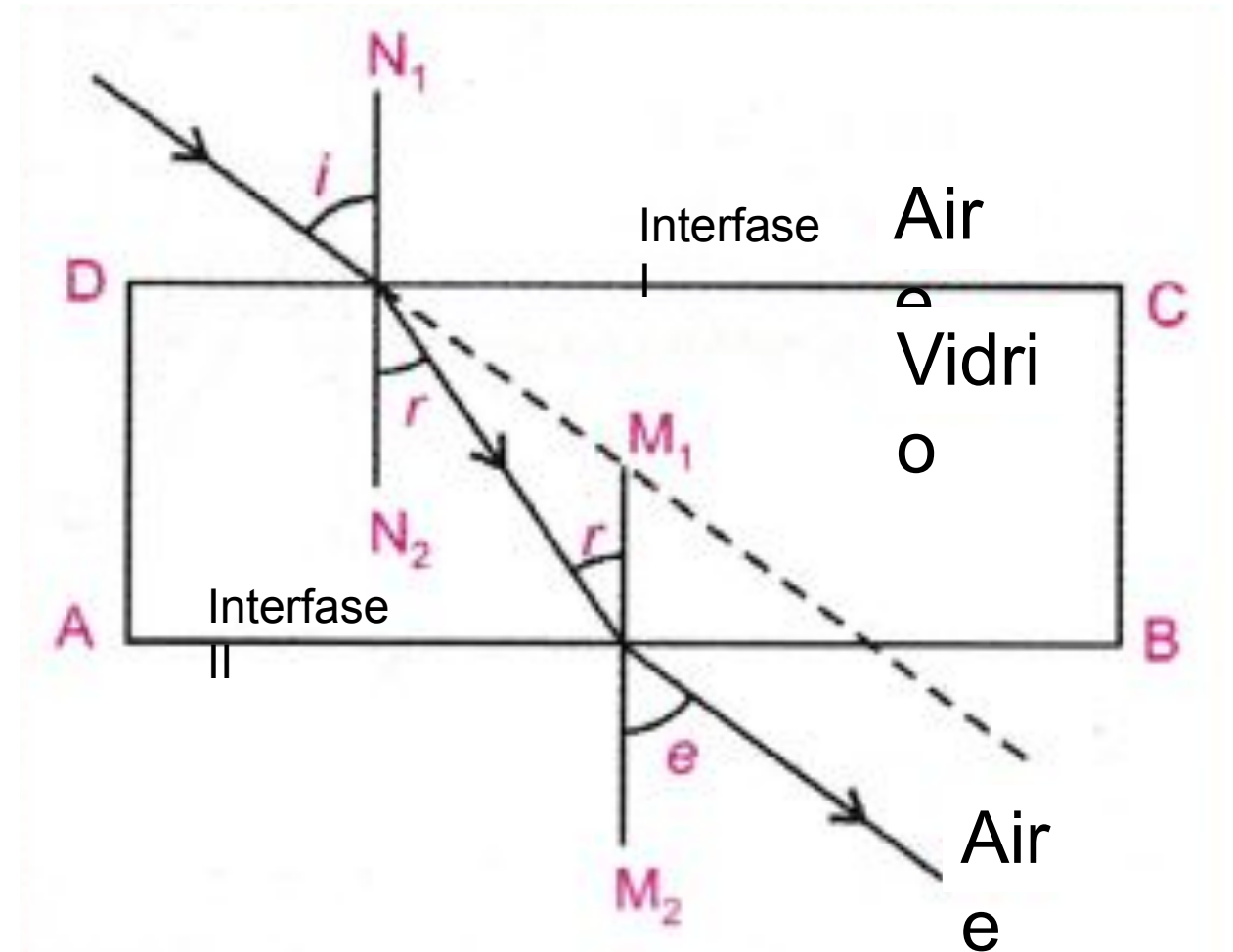
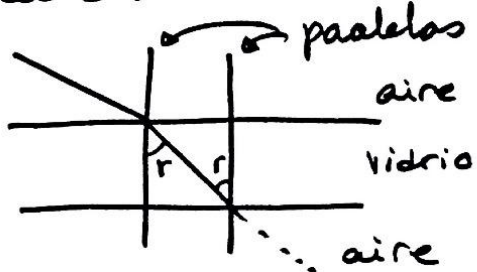
Vidrio:  $n_2$

Interfase I:

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r)$$

Interfase II

ángulo de incidencia igual a  $r$   
por ángulos alternos internos entre  
paralelas



# Placas plano paralelas

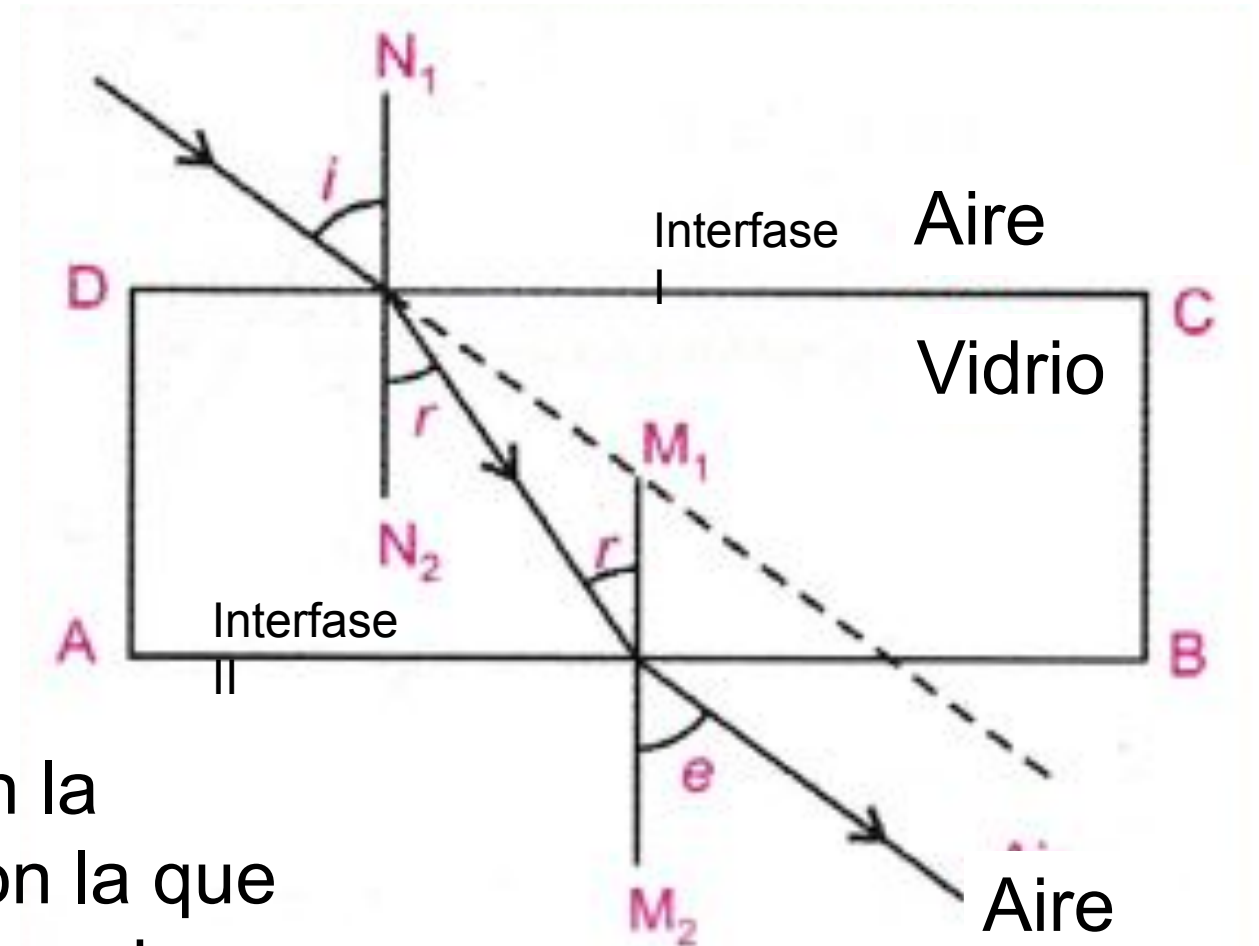
Entonces  $n_2 \sin(r) = n_1 \sin(e)$

luego, de las interfaces I y II:

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r) = n_1 \sin(e)$$

$$\Rightarrow \boxed{i = e}$$

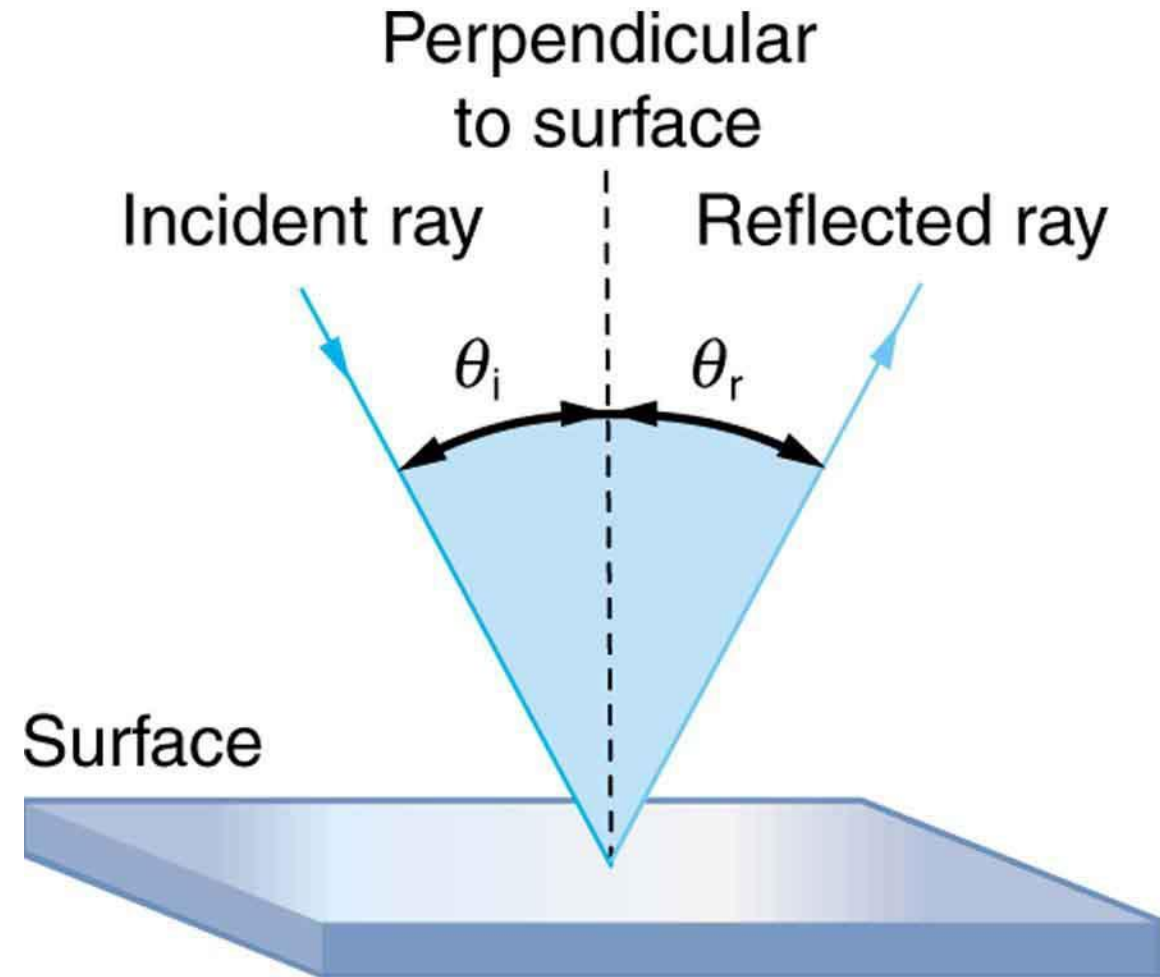
El rayo emerge con la misma dirección con la que ingresó pero desplazado.



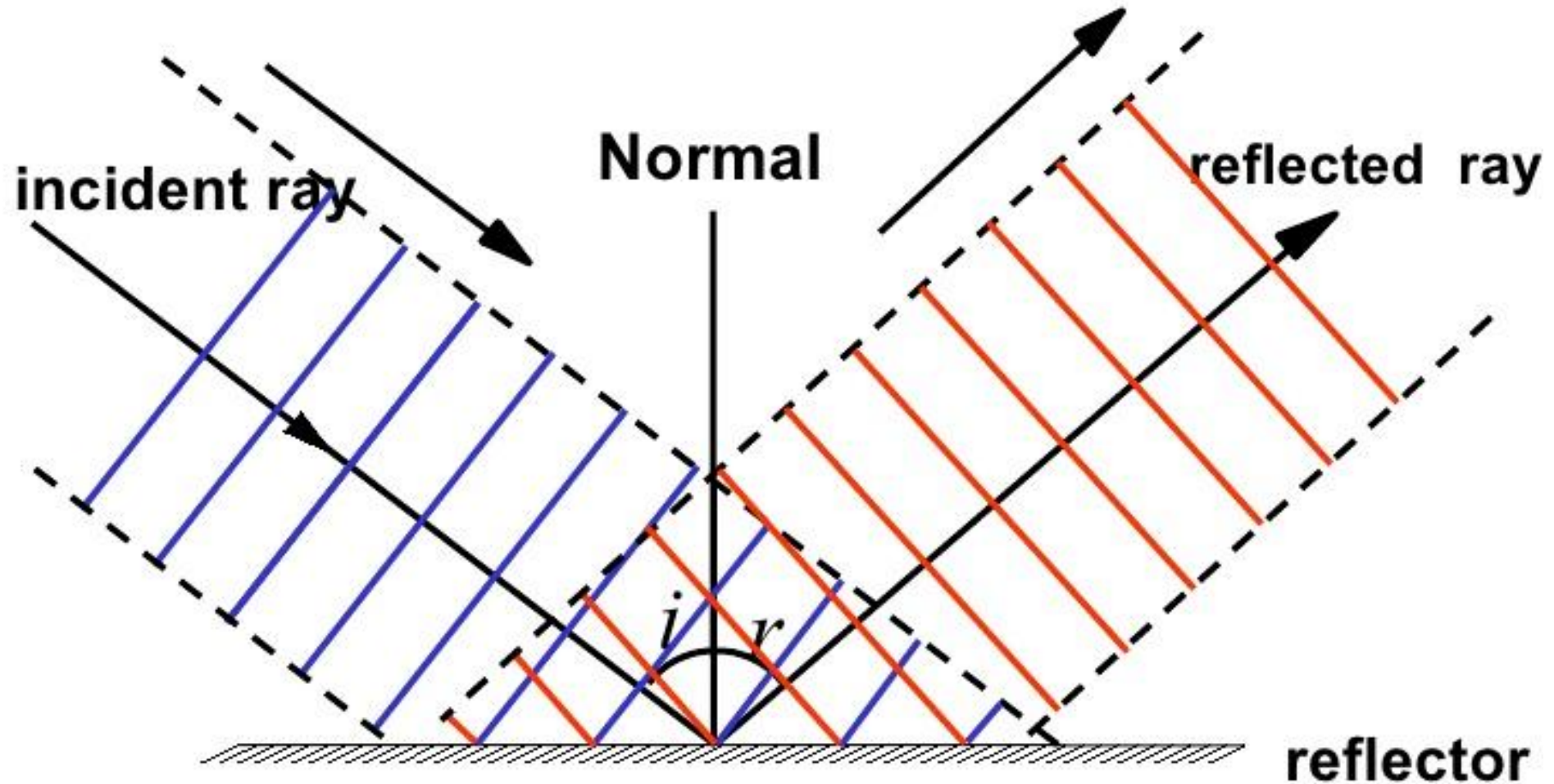
# Ley de Reflexión

- Cuando una onda electromagnética propagándose en un medio de índice  $n_1$  llega a una interfase con otro medio de índice  $n_2$  además de refractarse, hay una porción que se refleja:
- Si el rayo (en la dirección del vector  $\vec{k}$ ) incidente forma un ángulo  $\theta_i$  con la normal a la interfase, la ley de reflexión dice que si  $\theta_r$  es el ángulo del rayo reflejado :

$$\theta_i = \theta_r$$



# Ley de reflexión y frentes de onda





# Reflexión y Refracción en el plano de incidencia

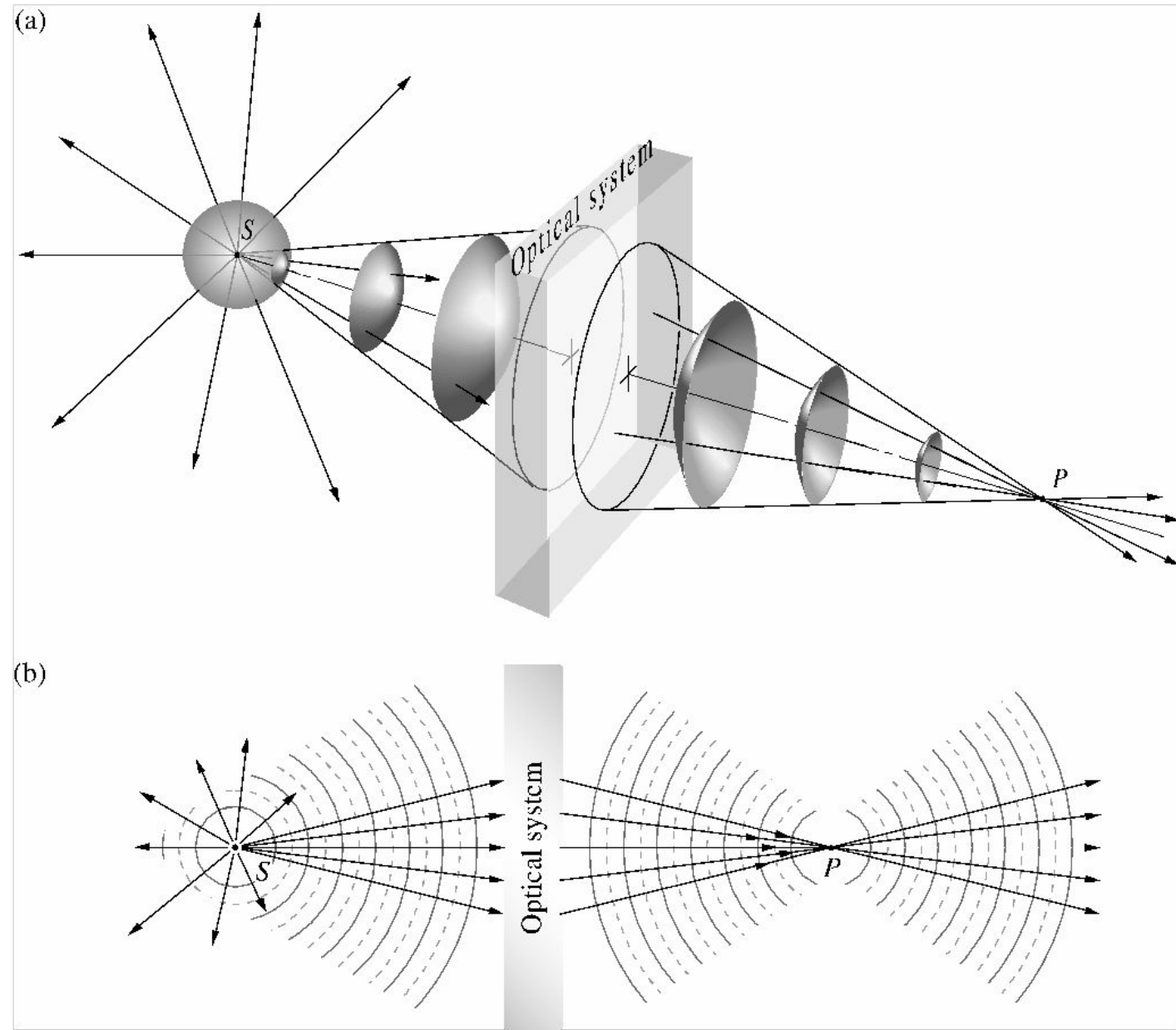
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/bending-light>

# Óptica Geométrica

- Se denomina así al estudio de la propagación de la luz en términos de rayos y no tiene en cuenta aspectos electromagnéticos ni ondulatorios de la luz.
- No incluye fenómenos ondulatorios tales como la difracción, la interferencia o la polarización. En la práctica equivale a trabajar con longitudes de onda muy pequeñas.
- Se trata de un método que simplifica mucho el proceso de hallar la marcha de la luz a través de un sistema de interfases entre medios.

# Sistemas ópticos

- Una fuente puntual envía ondas esféricas.
- Eso equivale a rayos radiales.
- Un cono de rayos entra al sistema óptico, el cual hace que los rayos converjan a un punto P.
- Los frentes de ondas se invierten
- Si nada para la luz en P, las ondas o rayos continúan su camino.

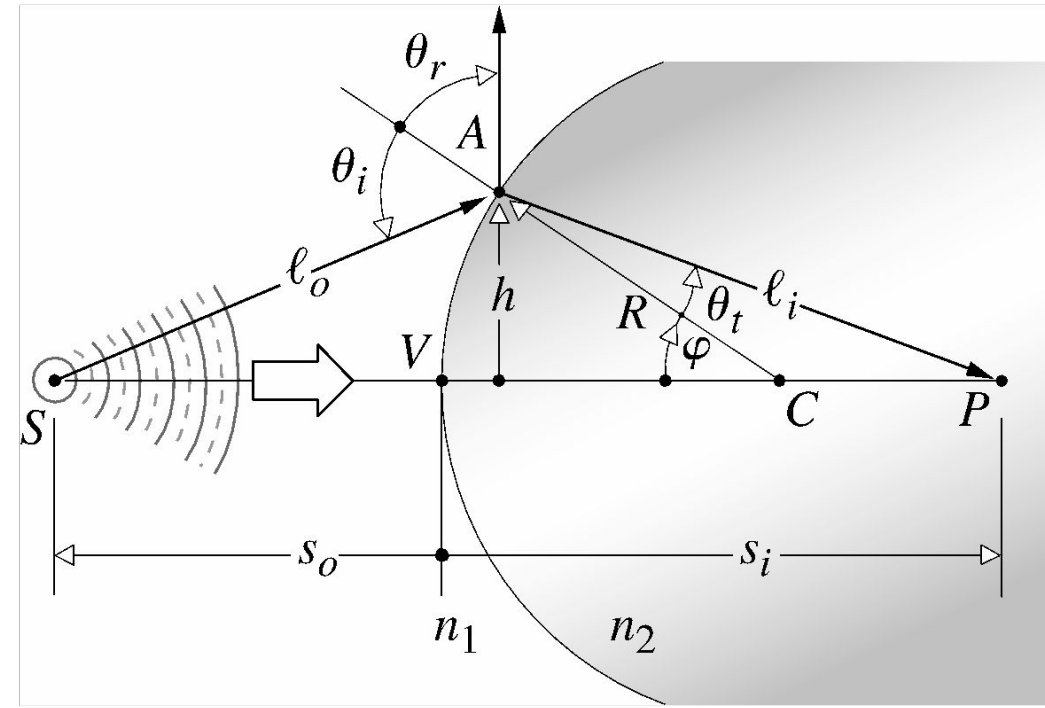


# Sistemas ópticos

- Dioptras
- Lentes
- Espejos

# Superficies esféricas

- Supongamos una fuente de luz que llamamos  $S$  desde la que salen rayos de luz.
- $S$  está inmersa en un material de índice  $n_1$ .
- Los rayos cruzan una interfase esférica de centro de curvatura  $C$  y entran en un medio de índice  $n_2$
- El rayo pasa por el eje de simetría en el punto  $P$ .



# Superficies esféricas

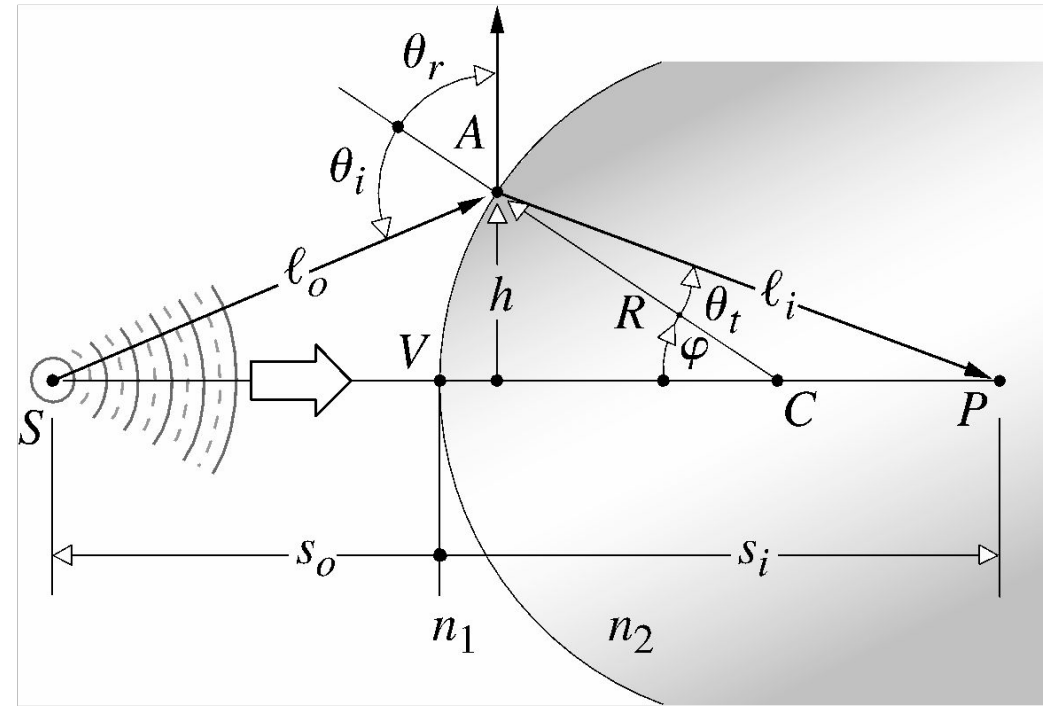
- La longitud de camino óptico entre  $S$  y  $P$  es:

$$OPL = n_1 \ell_o + n_2 \ell_i$$

- Usando el teorema del coseno en triángulos SAC y APC y recordando que  $\cos \varphi = -\cos(180^\circ - \varphi)$ :

$$\ell_o = [R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \varphi]^{1/2}$$

$$\ell_i = [R^2 + (s_i - R)^2 + 2R(s_i - R) \cos \varphi]^{1/2}$$





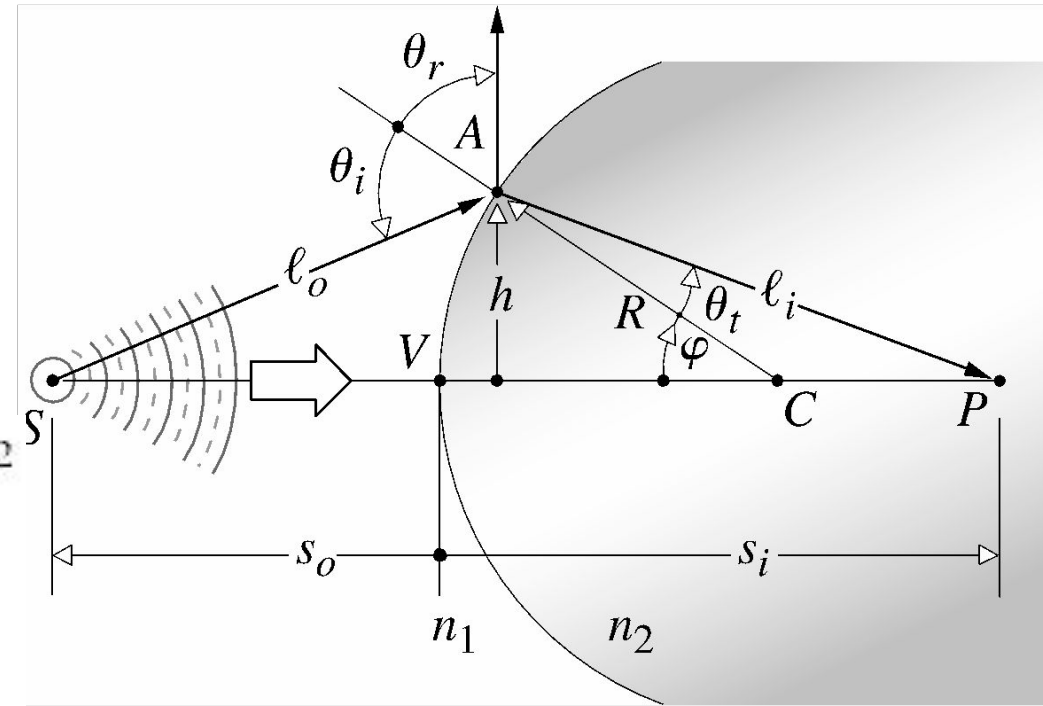
# Superficies esféricas

- Entonces

$$OPL = n_1 [R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \varphi]^{1/2} \\ + n_2 [R^2 + (s_i - R)^2 + 2R(s_i - R) \cos \varphi]^{1/2}$$

- Minimizando el  $OPL$  con respecto a  $\varphi$

$$d(OPL)/d\varphi = 0,$$



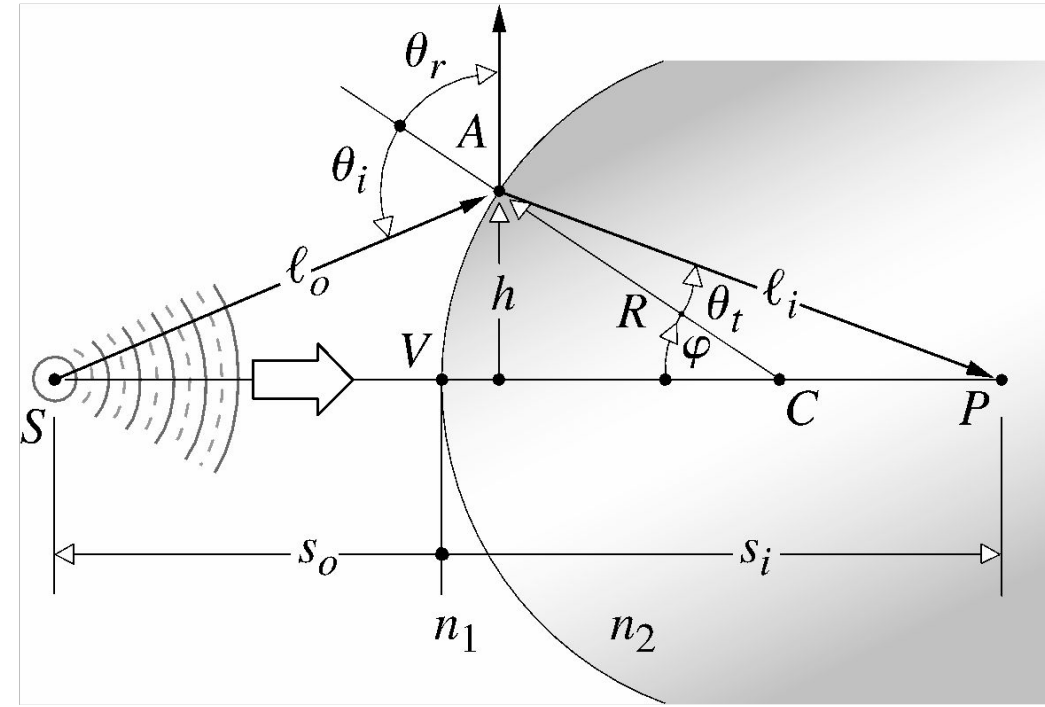
# Superficies esféricas

- Tenemos que

$$\frac{n_1 R(s_o + R) \sin \varphi}{2\ell_o} - \frac{n_2 R(s_i - R) \sin \varphi}{2\ell_i} = 0$$

- Con lo cual

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



# Aproximación paraxial

- Para simplificar las expresiones, vamos a suponer que los rayos son casi paralelos al eje óptico. Esto implica que  $\cos \varphi \approx 1$  ( $\varphi$  muy pequeño) y entonces:

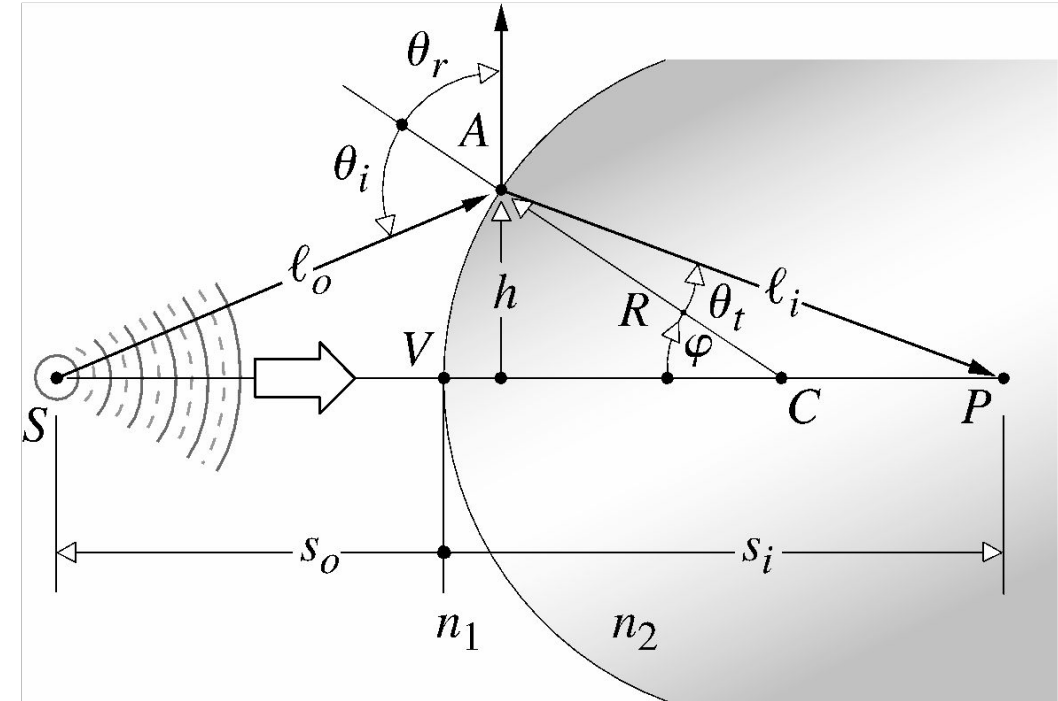
$$l_o \approx s_o \text{ y } l_i \approx s_i$$

- Con esto, la condición de longitud de camino óptico mínimo nos da:

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



Ecuación de la dioptra  
en  
aproximación paraxial



# Convención de signos para dioptras y lentes delgadas (Hecht)

|            |                                          |
|------------|------------------------------------------|
| $s_0, f_0$ | Positivo a la izquierda de $V$           |
| $x_0$      | Positivo a la izquierda de $F_0$         |
| $s_i, f_i$ | Positivo a la derecha de $V$             |
| $x_i$      | Positivo a la derecha de $F_i$           |
| $R$        | Positivo si $C$ está a la derecha de $V$ |
| $y_0, y_i$ | Positivo por encima del eje óptico       |

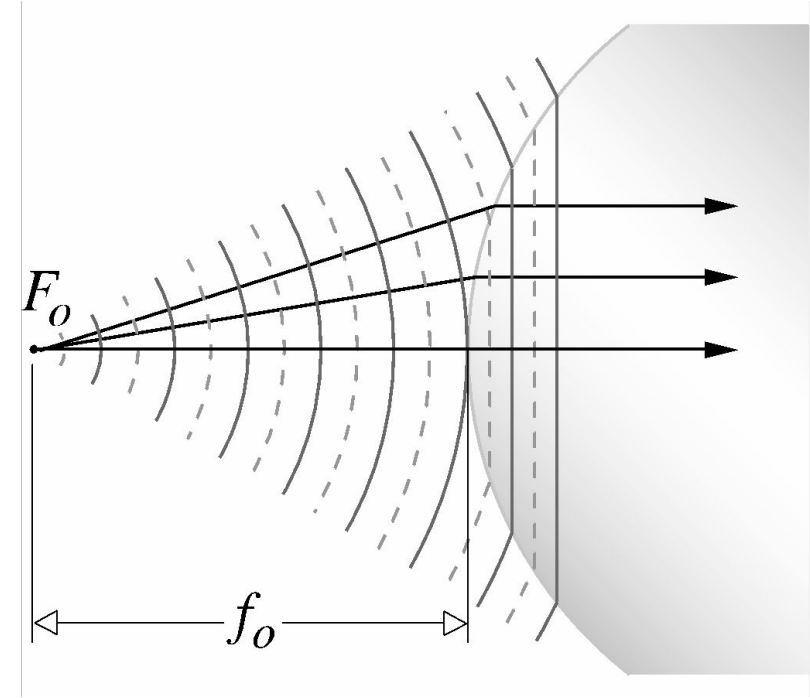
# Foco objeto

- Si el punto  $F_0$  tiene imagen en el  $\infty$  tenemos:

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{\infty} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

- Entonces  $f_o$  es la distancia focal objeto y se define como:

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



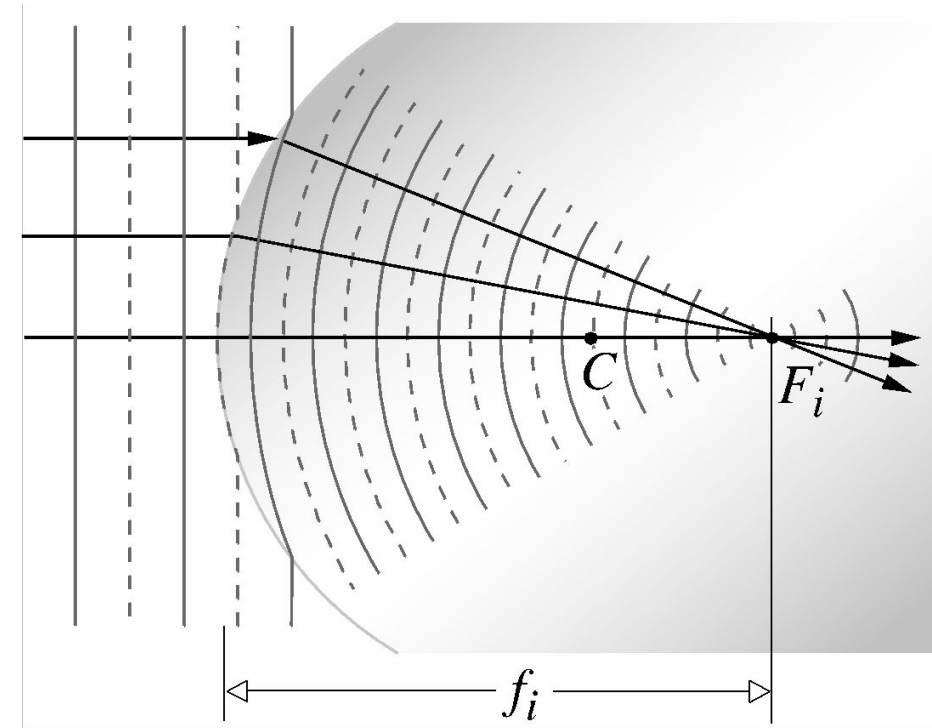
# Foco imagen

- Si el punto  $F_i$  es la imagen de un objeto en el  $\infty$  tenemos:

$$\frac{n_1}{\infty} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

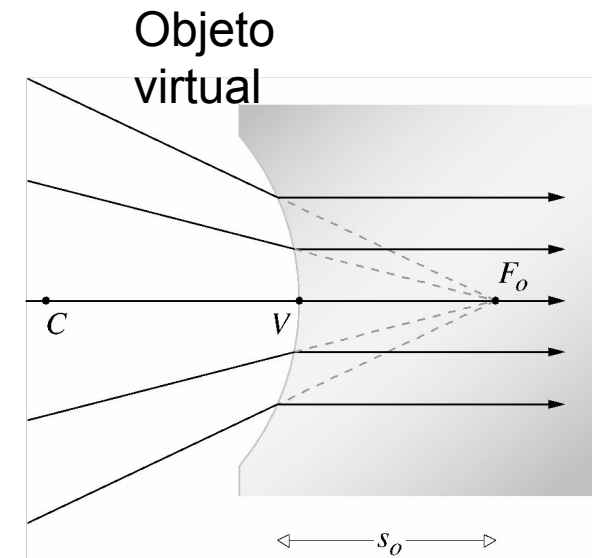
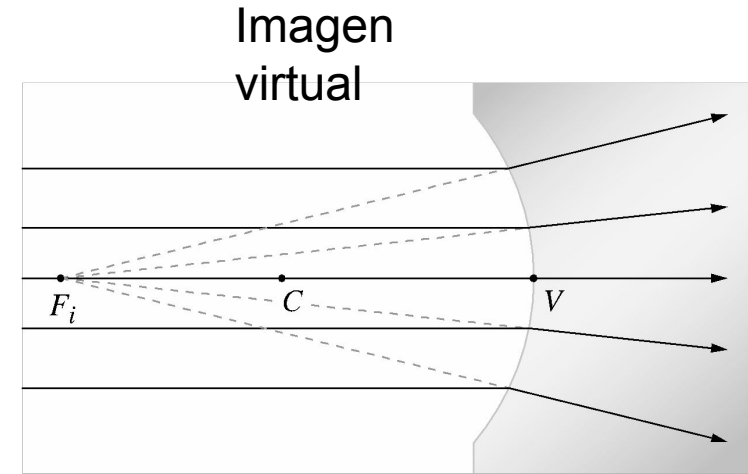
- Entonces  $f_i$  es la distancia focal imagen y se define como:

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



# Imágenes y objetos virtuales

- Una imagen es virtual cuando los rayos divergen de ella.
- Análogamente, un objeto es virtual cuando los rayos convergen hacia él.
- Notar que el objeto virtual está en el lado derecho del vértice y por lo tanto va a ser una cantidad negativa





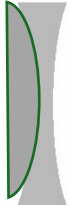
# Lentes delgadas

- Lentes: elementos de al menos dos superficies refractantes en las que al menos una es curva.
- Vamos a concentrarnos en lentes simples (un solo elemento)
- De espesor despreciable
- Supondremos que el índice de refracción de la lente es mayor que el del medio que la circunda

# Tipos de lentes delgadas

Convexa,  
Convergente  
o  
Positiva

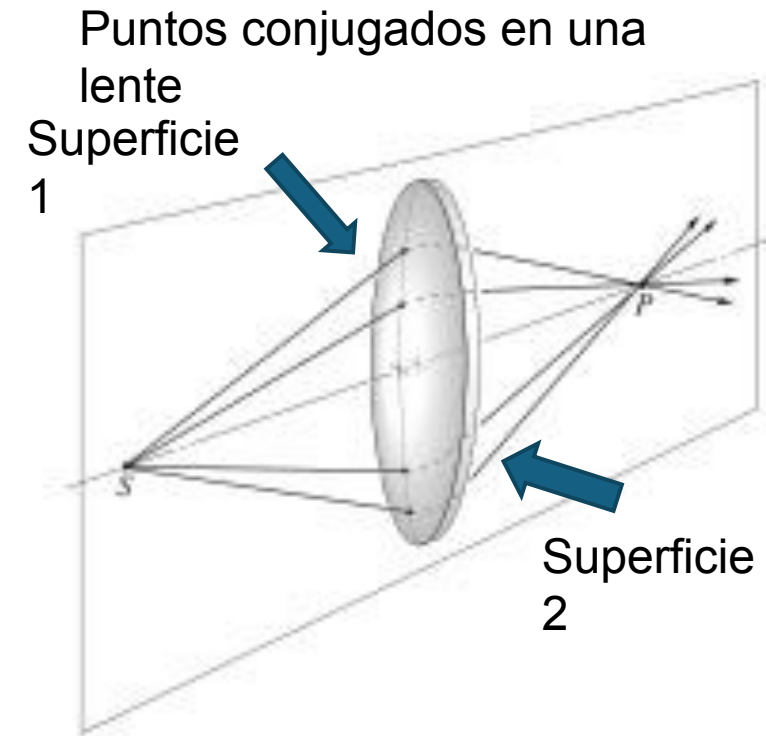
Cóncava  
Divergente  
o  
Negativa

| CONVEX                                                                                                                                                            | CONCAVE                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  $\begin{matrix} R_1 > 0 \\ R_2 < 0 \end{matrix}$ <p>Biconvex</p>              |  $\begin{matrix} R_1 < 0 \\ R_2 > 0 \end{matrix}$ <p>Biconcave</p>              |
|  $\begin{matrix} R_1 = \infty \\ R_2 < 0 \end{matrix}$ <p>Planar convex</p>    |  $\begin{matrix} R_1 = \infty \\ R_2 > 0 \end{matrix}$ <p>Planar concave</p>    |
|  $\begin{matrix} R_1 > 0 \\ R_2 > 0 \end{matrix}$ <p>Meniscus<br/>convex</p> |  $\begin{matrix} R_1 > 0 \\ R_2 > 0 \end{matrix}$ <p>Meniscus<br/>concave</p> |

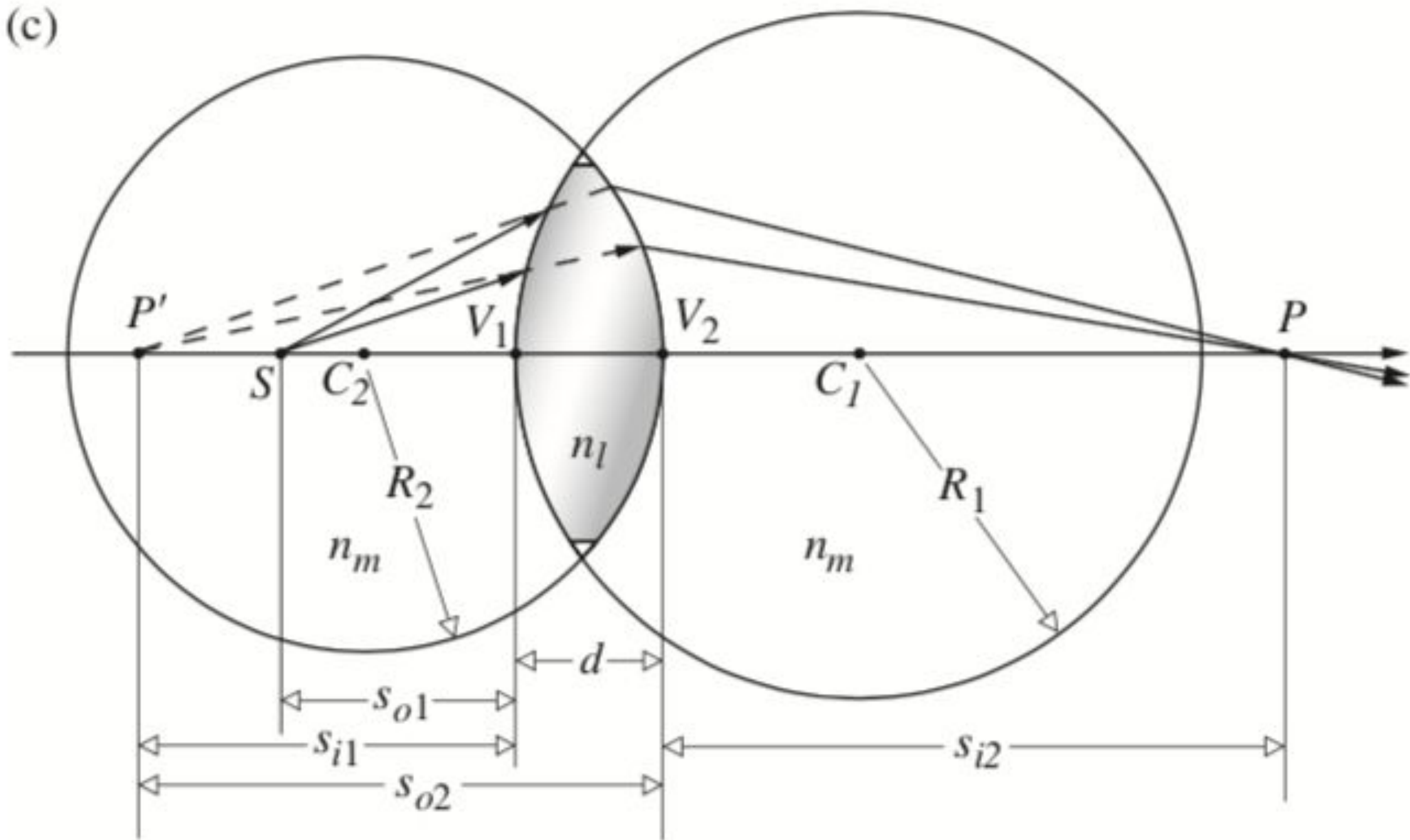
# Ecuación de lentes delgadas

- Vamos a pensar una lente como el conjunto de dos dioptras. Para los puntos conjugados S y P del sistema, la superficie 1 estará frente a S y la 2 frente a P.
- Supongamos que el índice de la lente es  $n_l$  y que está inmersa en un medio  $n_m$  :
- Para la superficie 1 de radio  $R_1$  , la ecuación de la dioptra resulta:

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



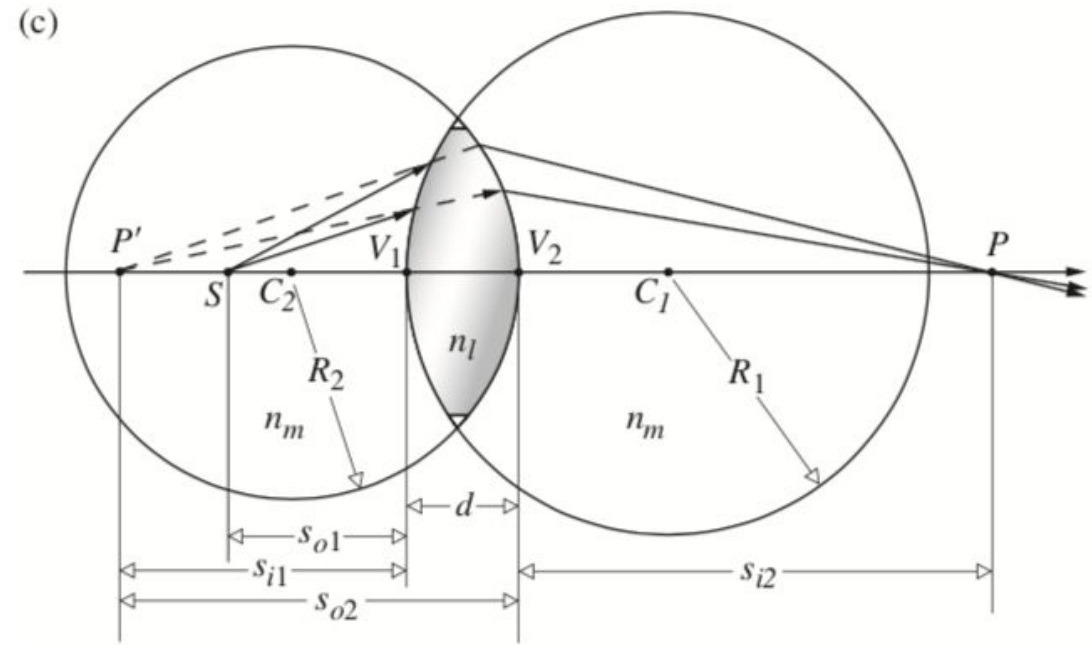
(c)



# Ecuación de lentes delgadas

- Es claro que la superficie 2 va a 'ver rayos provenientes' de la imagen de la superficie 1.
- Los rayos que llegan a la superficie 2 están en un medio de índice  $n_l$ , y viven en el espacio objeto de ella.
- Tomando como  $d$  la distancia entre las superficies, colocamos como objeto de la superficie 2 la imagen de la superficie 1. En términos de distancia esto es:

$$|s_{o2}| = |s_{i1}| + d$$



# Ecuación de lentes delgadas

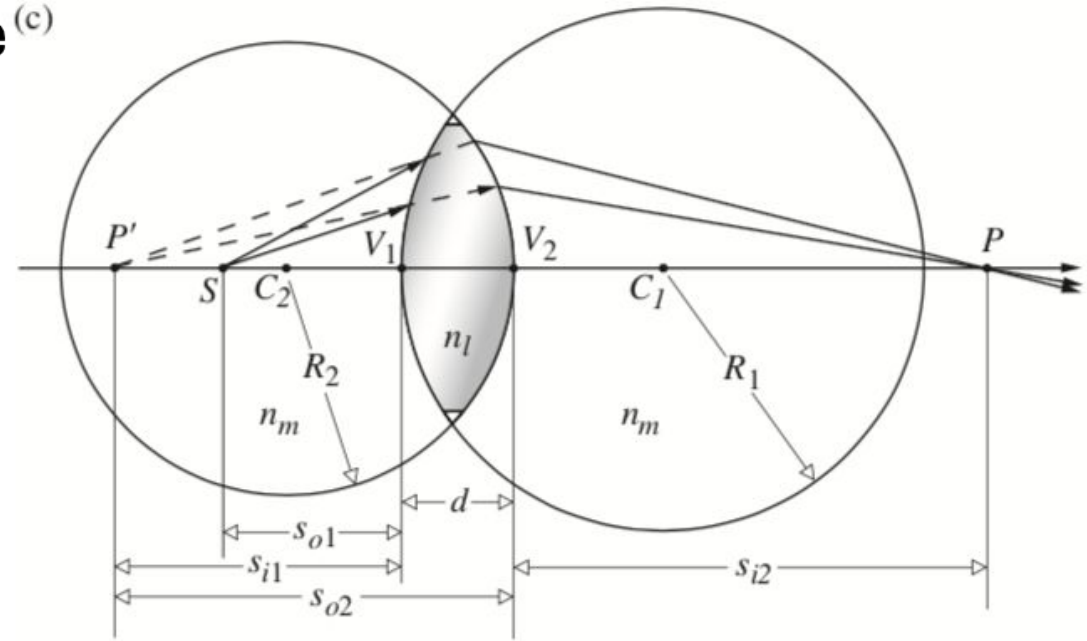
- Sabemos que  $|s_{o2}| = s_{o2} > 0$  pues está a la izquierda del vértice de la superficie <sup>(c)</sup> 2.
- Por otro lado,  $s_{i1} < 0$  y por lo tanto  $|s_{i1}| = -s_{i1}$  pues está a la izquierda del vértice de la superficie 2. Entonces:

$$s_{o2} = -s_{i1} + d$$

- En la superficie 2 entonces:

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

- Aquí  $n_l > n_m$  y  $R_2 < 0$  y por lo tanto el segundo miembro es positivo



# Ecuación de lentes delgadas

- Entonces sumando

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_l}{s_{i1}} = \frac{n_l - n_m}{R_1} \quad \text{y} \quad \frac{n_l}{-s_{i1} + d} + \frac{n_m}{s_{i2}} = \frac{n_m - n_l}{R_2}$$

Llegamos a

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

- Esto se simplifica si consideramos una lente delgada ( $d \rightarrow 0$ ) y si suponemos que el medio en el que está la lente es el aire ( $n_m = 1$ ):

$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Formula del fabricante de lentes}$$

# Ecuación de lentes delgadas

- Como  $d = 0$  los vértices coinciden entonces:

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

- Como con la dioptra, tenemos que

$$\lim_{s_o \rightarrow \infty} s_i = f_i = \lim_{s_i \rightarrow \infty} s_o = f_o = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

- Es evidente que para una lente delgada  $f_i = f_o = f$  entonces:

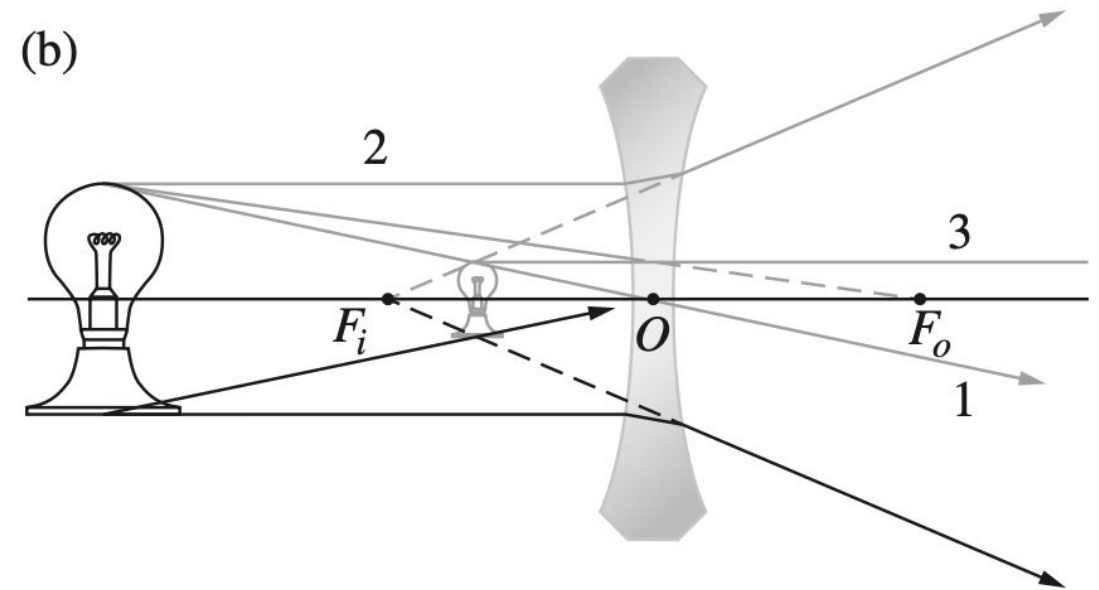
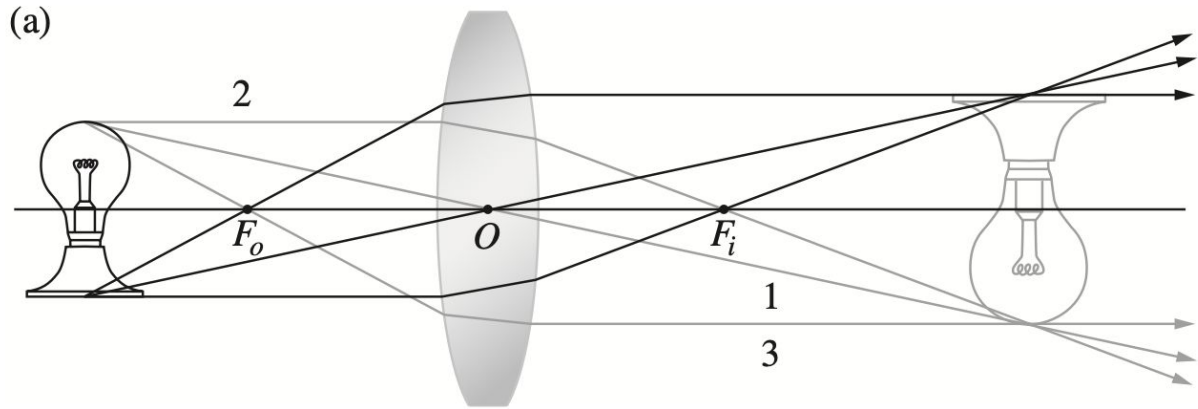
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de las lentes  
delgadas



# Trazado de rayos

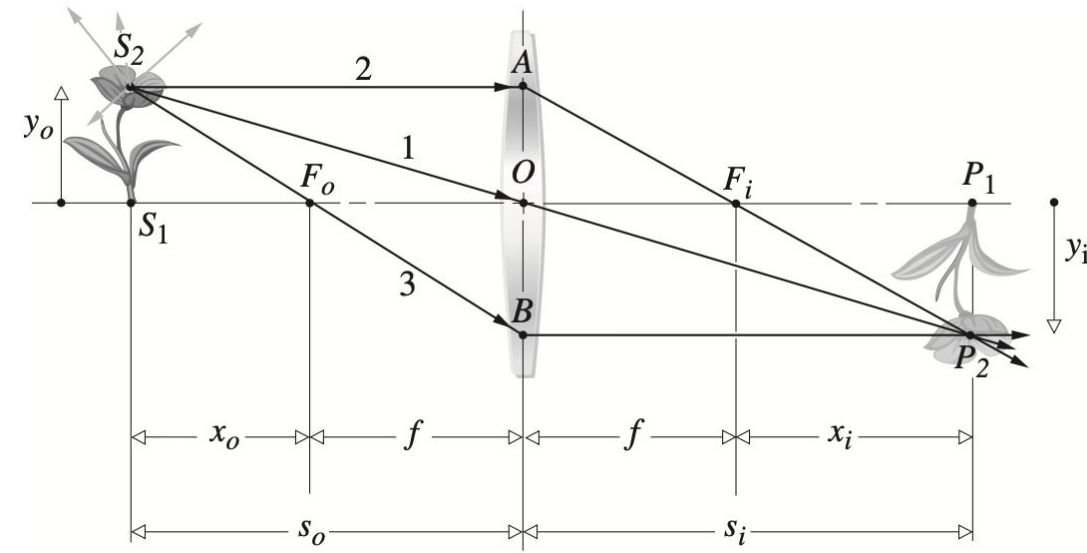
- Para formar la imagen de un objeto extenso se considera que cada punto que lo conforma emite luz.
- Se escogen 3 rayos principales para ubicar la imagen de cada punto del objeto.
  - Rayo 1: pasa por el vértice de la lente sin desviarse
  - Rayo 2: paralelo al eje en el espacio objeto, sale pasando por o viniendo del foco imagen.
  - Rayo 3 : pasa por o va hacia el foco objeto, sale paralelo al eje en el espacio imagen.



# Aumento lateral

- Para medir el tamaño de una imagen respecto a la del objeto.
- Las distancias transversales por encima del eje óptico se toman positivas, y negativas por debajo.
- En la figura  $y_o > 0$  y  $y_i < 0$  (invertida).
- Los triángulos  $AOF_i$  y  $P_2P_1F_i$  son similares. Entonces:

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



# Aumento lateral

- De la misma manera  $S_2S_1O$  y  $P_2P_1O$  también son similares. Entonces:

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

- Donde todas las cantidades son positivas excepto  $y_i$ . Entonces

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

- El aumento lateral  $M_T$  se define como:

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

- De la misma manera  $S_2S_1O$  y  $P_2P_1O$  también son similares. Entonces:

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

- Donde todas las cantidades son positivas excepto  $y_i$ . Entonces

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

- El aumento lateral  $M_T$  se define como:

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

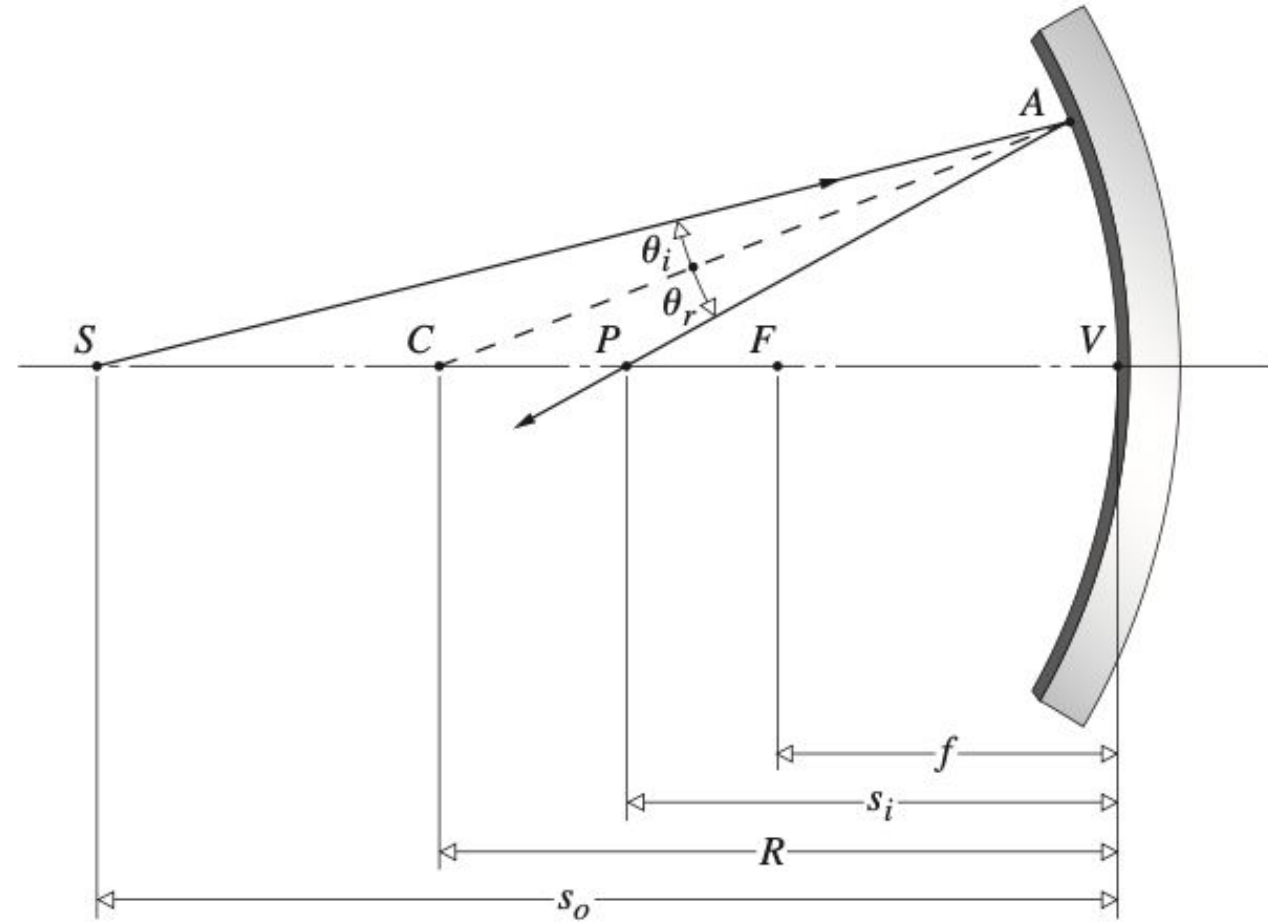
# Espejos

- De la figura tenemos

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

$$\overline{SC} = s_o - |R| \quad \text{y} \quad \overline{CP} = |R| - s_i$$

$$\overline{SC} = s_o + R \quad \text{y} \quad \overline{CP} = -(s_i + R)$$



# Espejos

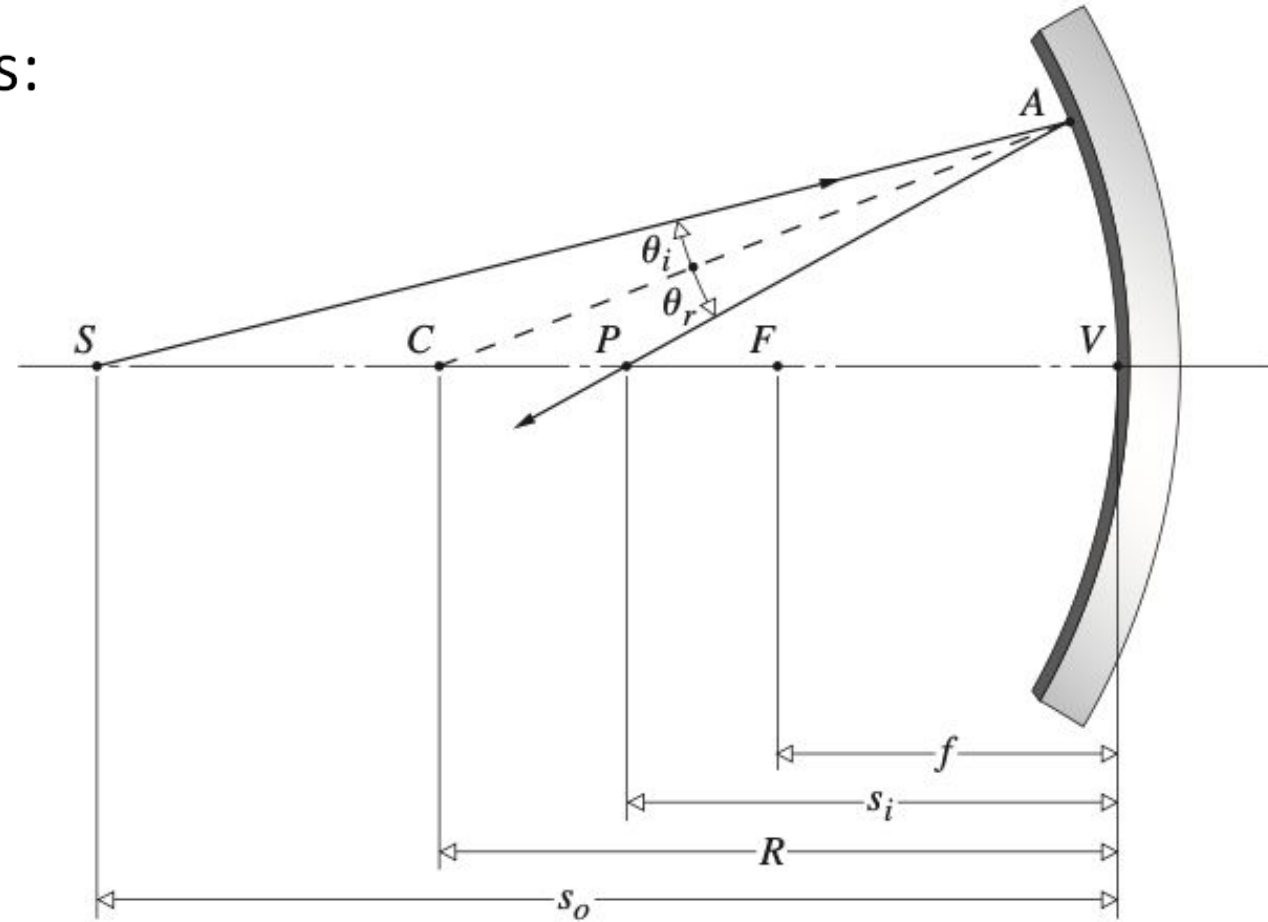
- En aproximación paraxial tenemos:

$$\overline{SC} \approx s_o, \overline{PA} \approx s_i$$

- Entonces

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

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



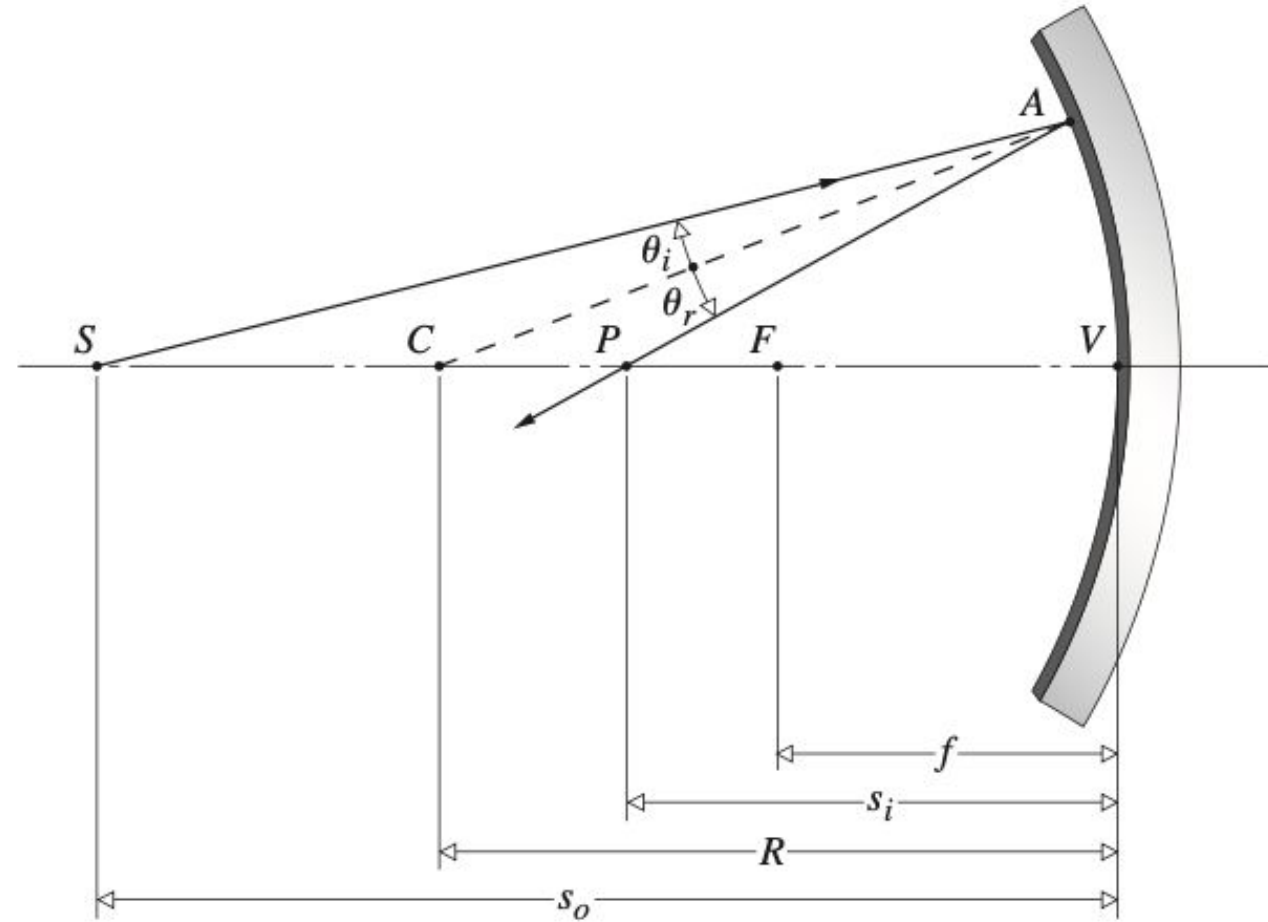
# Espejos

- Como:

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

- Entonces:

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



# Espejos

**TABLE 5.4 Sign Convention for Spherical Mirrors**

| Quantity | Sign                      |                               |
|----------|---------------------------|-------------------------------|
|          | +                         | —                             |
| $s_o$    | Left of $V$ , real object | Right of $V$ , virtual object |
| $s_i$    | Left of $V$ , real image  | Right of $V$ , virtual image  |
| $f$      | Concave mirror            | Convex mirror                 |
| $R$      | $C$ right of $V$ , convex | $C$ left of $V$ , concave     |
| $y_o$    | Above axis, erect object  | Below axis, inverted object   |
| $y_i$    | Above axis, erect image   | Below axis, inverted image    |

# Espejos

**TABLE 5.5 Images of Real Objects Formed by Spherical Mirrors**

| .....<br>Concave<br>..... |         |                                 |             |               |
|---------------------------|---------|---------------------------------|-------------|---------------|
| Object                    |         | Image                           |             |               |
| Location                  | Type    | Location                        | Orientation | Relative Size |
| $\infty > s_o > 2f$       | Real    | $f < s_i < 2f$                  | Inverted    | Minified      |
| $s_o = 2f$                | Real    | $s_i = 2f$                      | Inverted    | Same size     |
| $f < s_o < 2f$            | Real    | $\infty > s_i > 2f$             | Inverted    | Magnified     |
| $s_o = f$                 |         | $\pm \infty$                    |             |               |
| $s_o < f$                 | Virtual | $ s_i  > s_o$                   | Erect       | Magnified     |
| .....<br>Convex<br>.....  |         |                                 |             |               |
| Object                    |         | Image                           |             |               |
| Location                  | Type    | Location                        | Orientation | Relative Size |
| Anywhere                  | Virtual | $ s_i  <  f ,$<br>$s_o >  s_i $ | Erect       | Minified      |