

Lentes

F2 1/6/21

Elementos ópticos

- Espejos
- Dioptras
- Lentes (delgadas)

Objetos

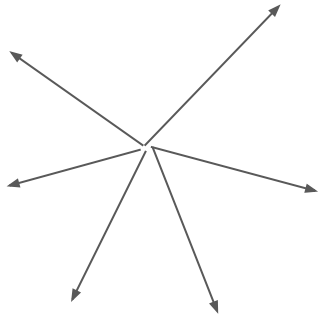
- Cualquier fuente lumínica, o
- Cualquier objeto no luminoso iluminado por una fuente externa.
 - No vamos a distinguir entre ambos
- Objeto ideal: fuente puntual esférica
- Objeto extenso: arreglo continuo de fuentes puntuales

Preguntas

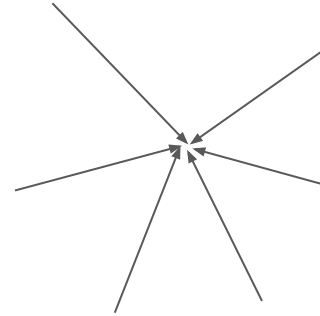
- ¿Qué tipo de imagen se forma?
- ¿Donde se ubica? ¿Qué tamaño tiene?
- Para objetos extensos: ¿la imagen es derecha o invertida?
- Para sistemas de elementos ópticos: ídem para la imagen formada por cada elemento, hasta obtener la imagen final.

Haces homocéntricos

Frente de onda convergente

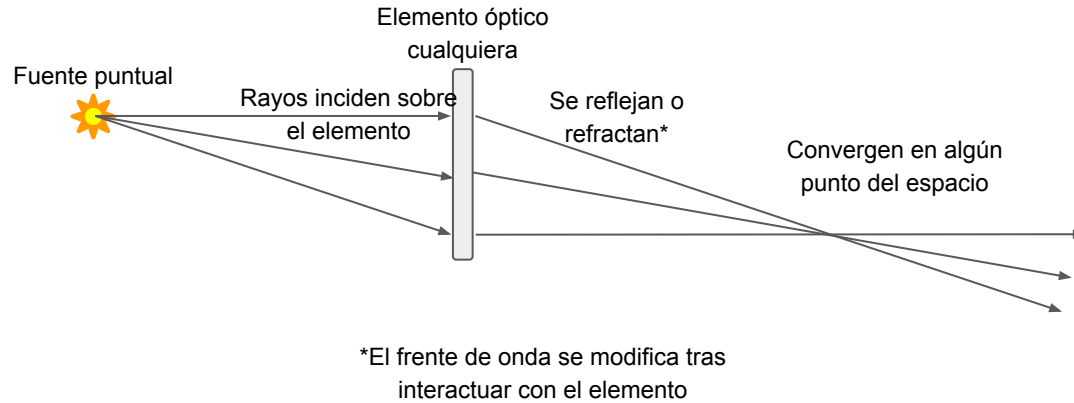


Frente de onda divergente

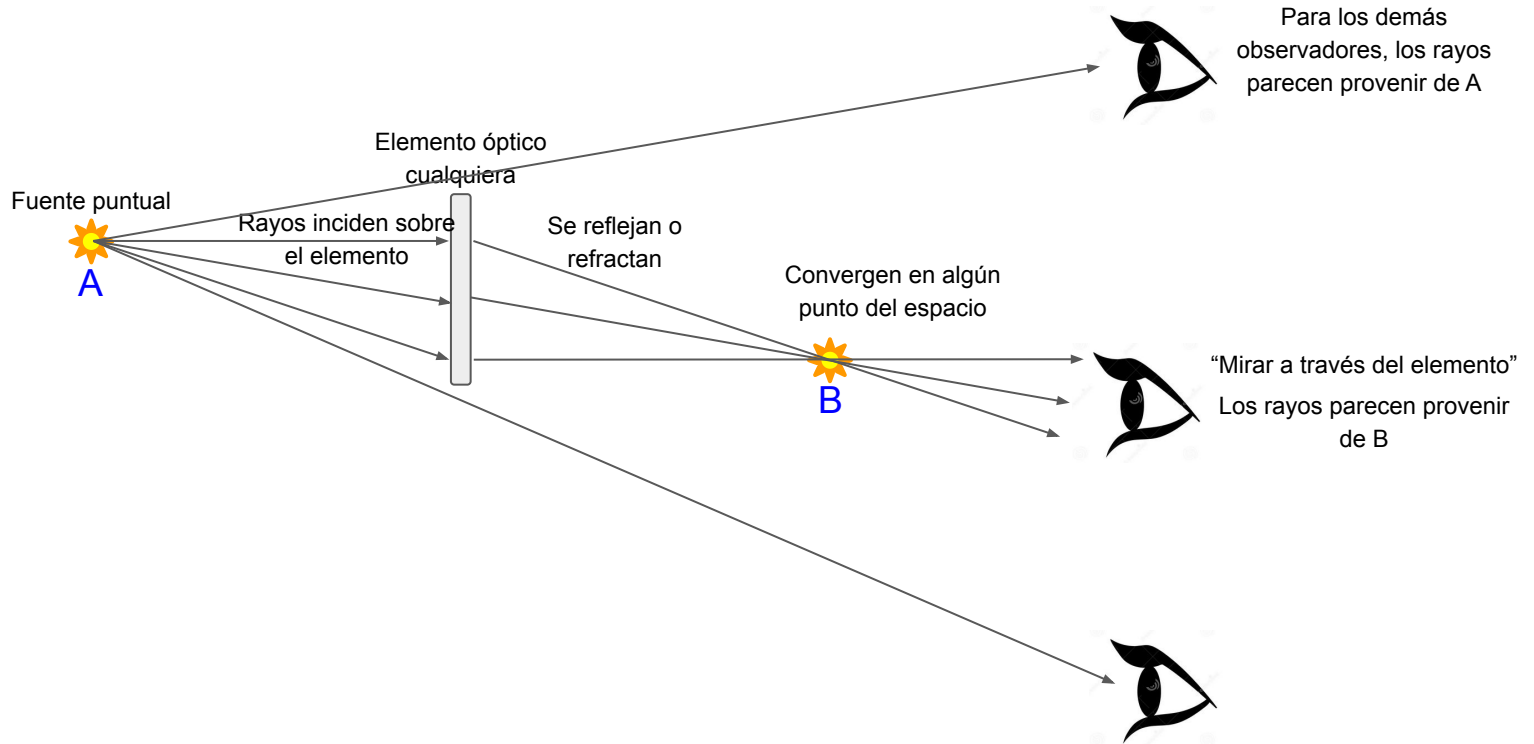


Estos haces convergen o divergen hacia o desde un punto del espacio

Formación de imágenes



Formación de imágenes



Imágenes reales y virtuales

IMAGEN REAL

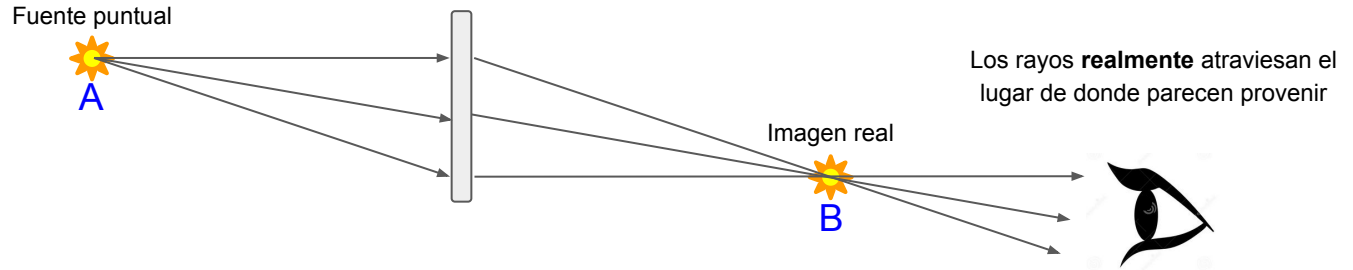
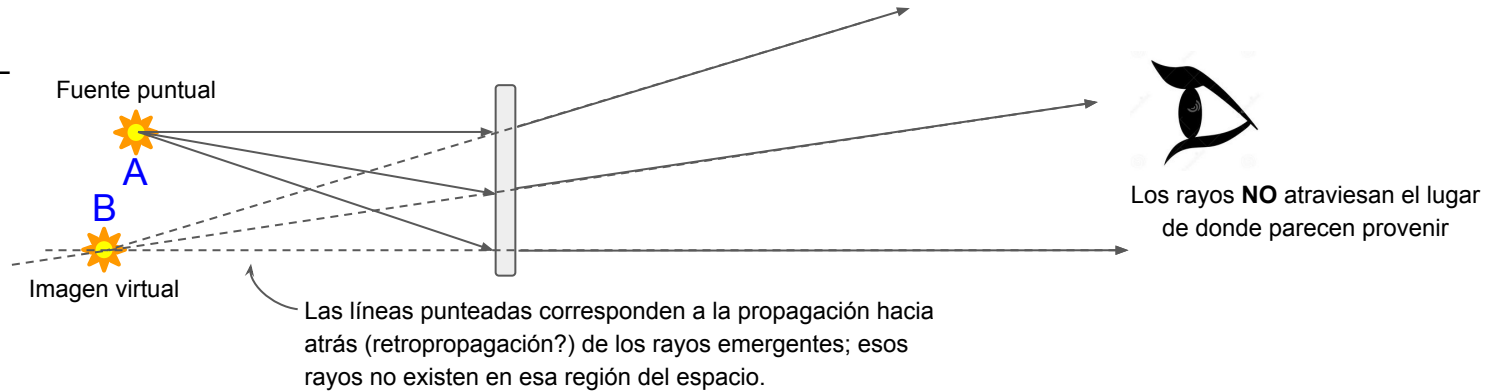
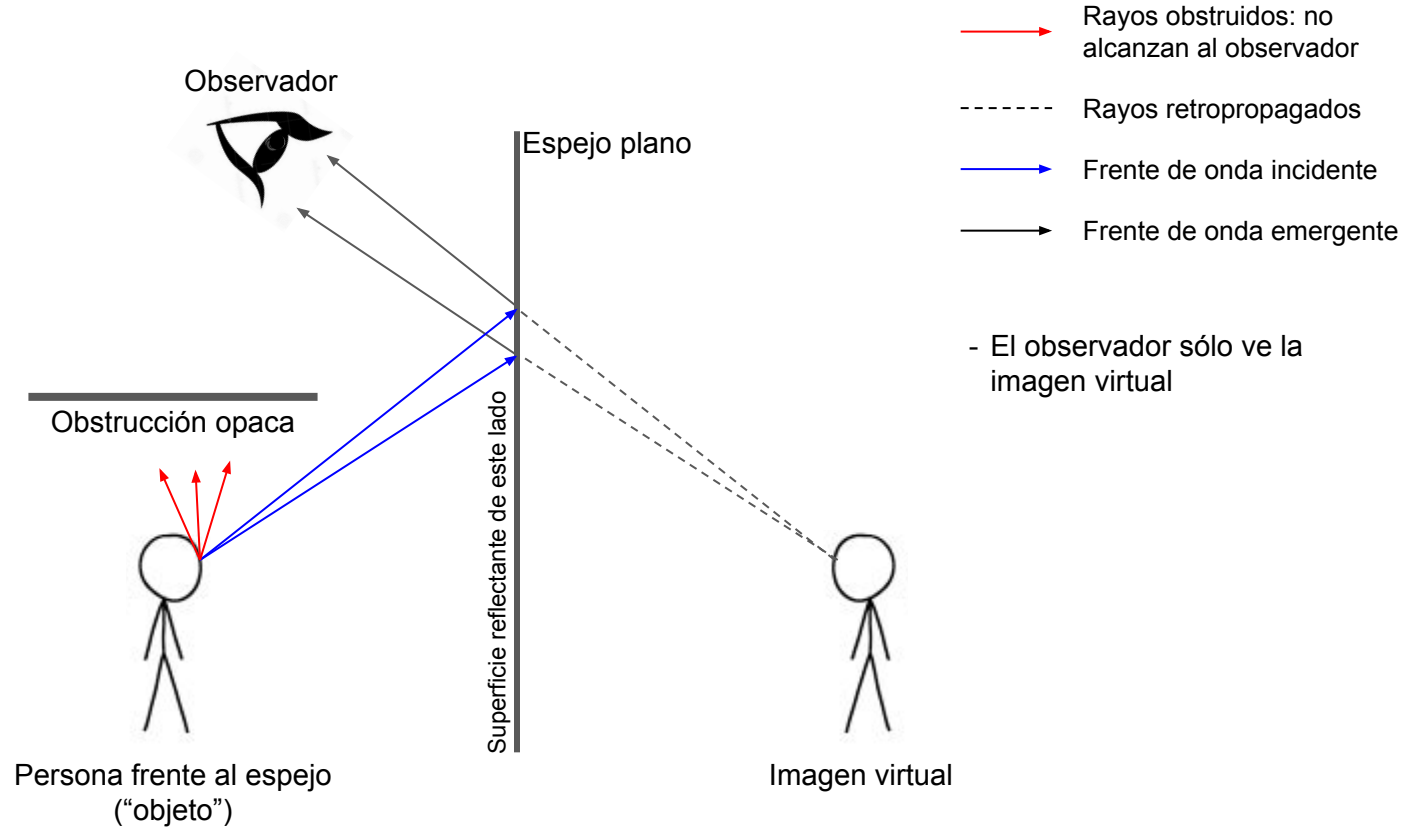


IMAGEN VIRTUAL

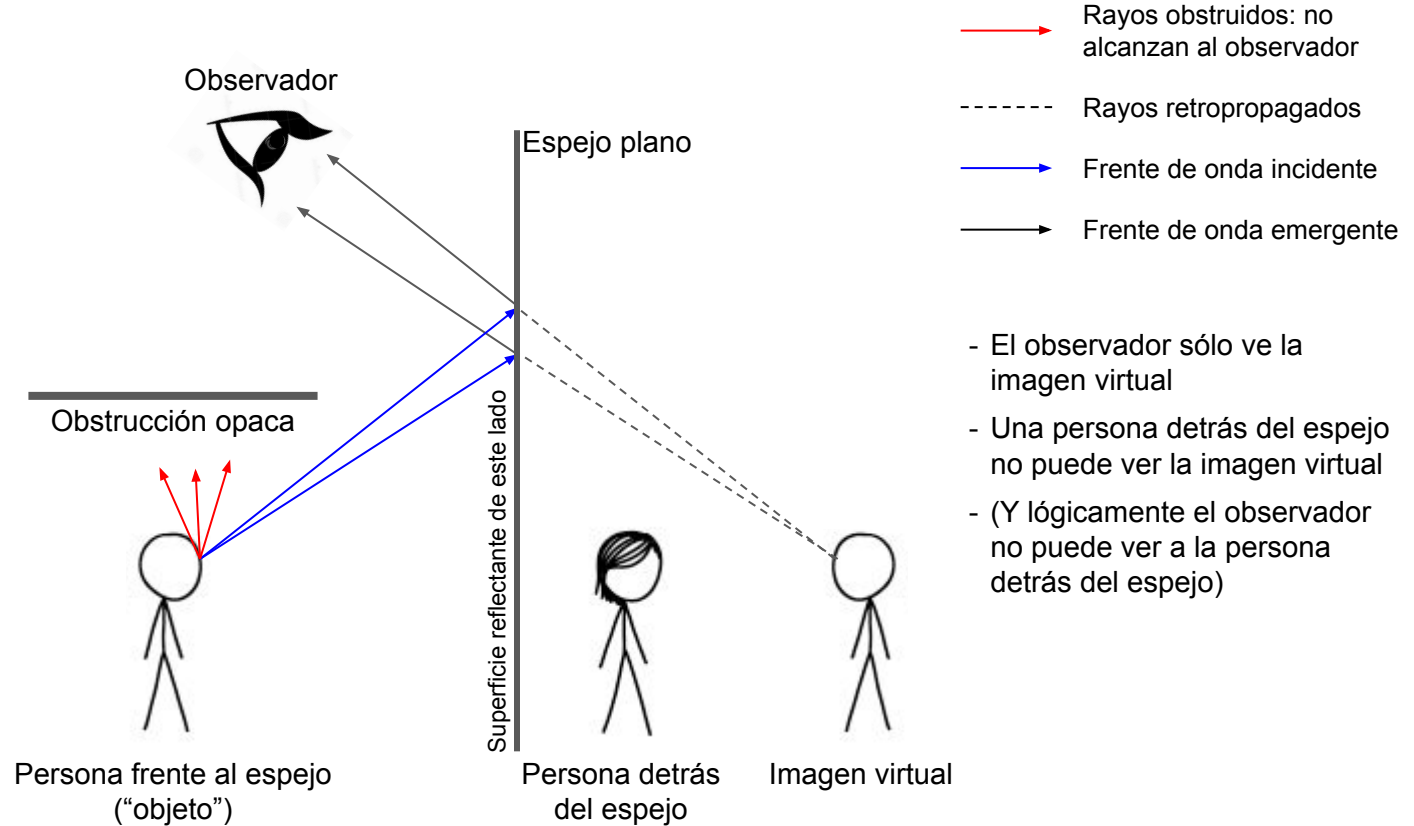


Recordar que, para el observador, los rayos siempre parecen provenir de B

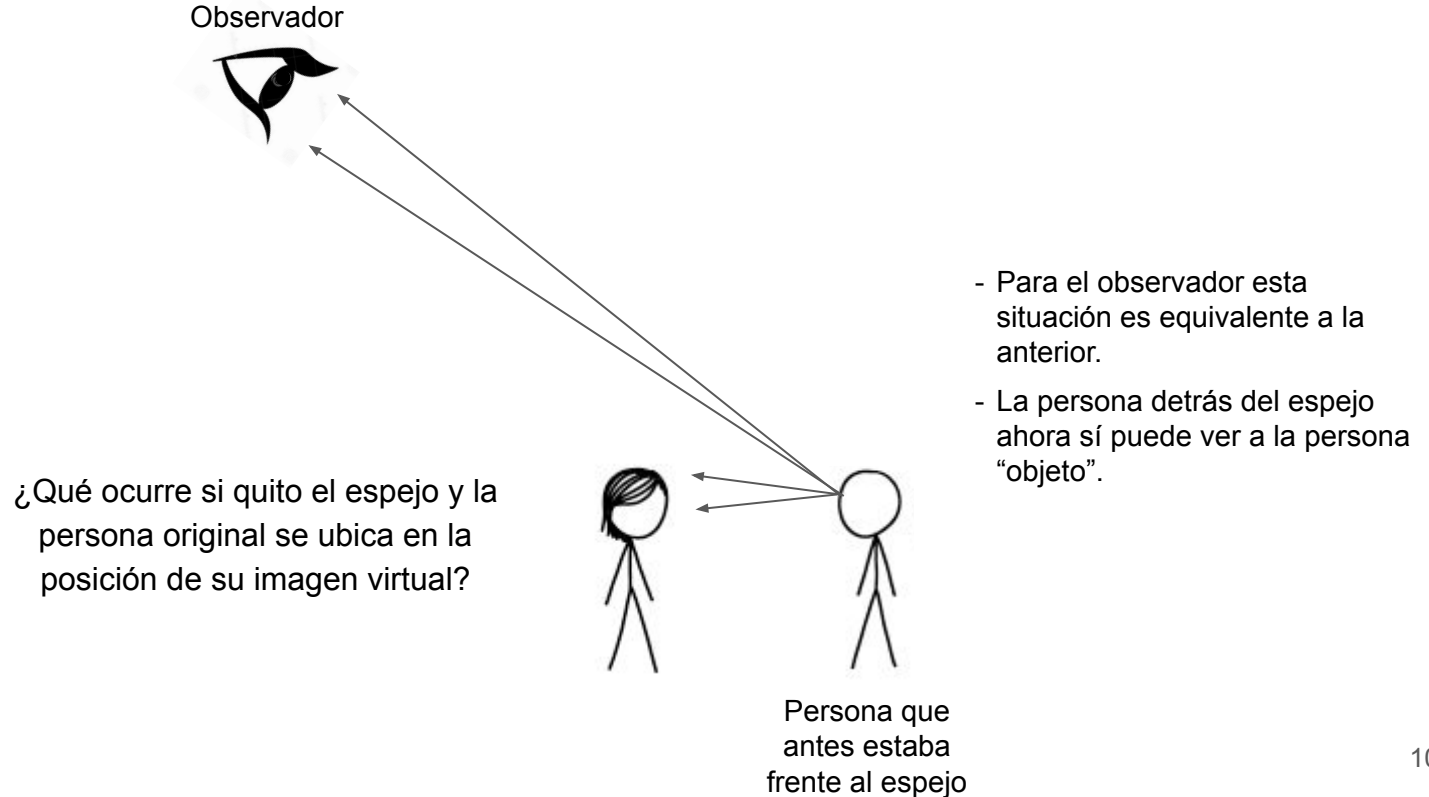
Imágenes reales y virtuales



Imágenes reales y virtuales



Imágenes reales y virtuales



Imágenes reales y virtuales



Si la imagen es real, puedo colocar un elemento fotosensible en la posición de la imagen para registrarla

Ejemplos:

- Película fotográfica (cámara analógica)
- Sensor CCD (cámara digital)
- Retina (ojos)
- Pantalla de observación

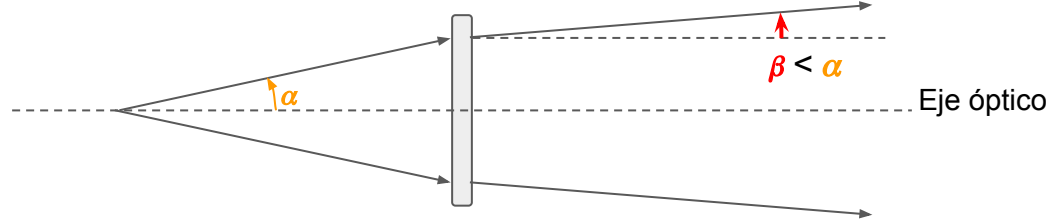
Si la imagen es virtual, esto no es posible.

Dispositivos convergentes

El haz emergente tiene menor apertura

Los rayos emergentes se desvían hacia el eje óptico

Frente incidente divergente

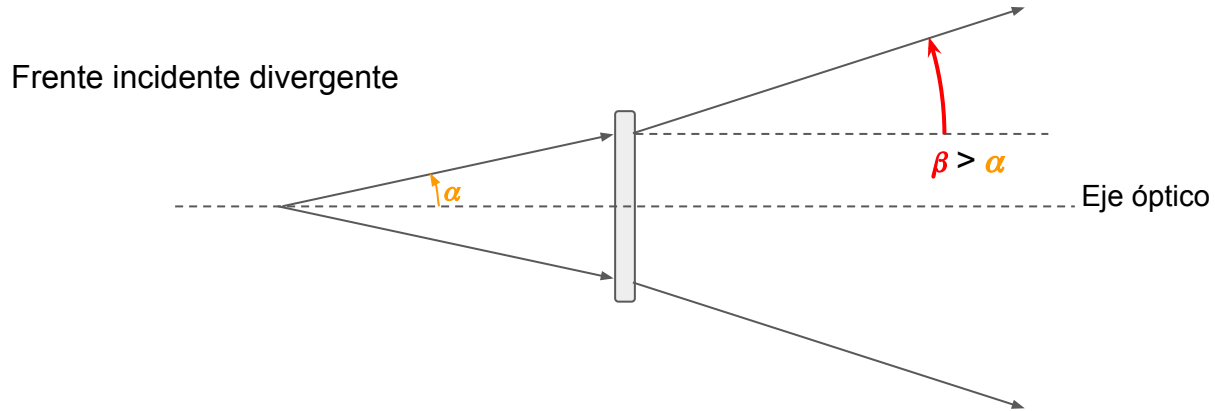


*Los rayos “se cierran”
(comparados con su inclinación anterior)*

Dispositivos divergentes

El haz emergente tiene mayor apertura

Los rayos emergentes se alejan del eje óptico



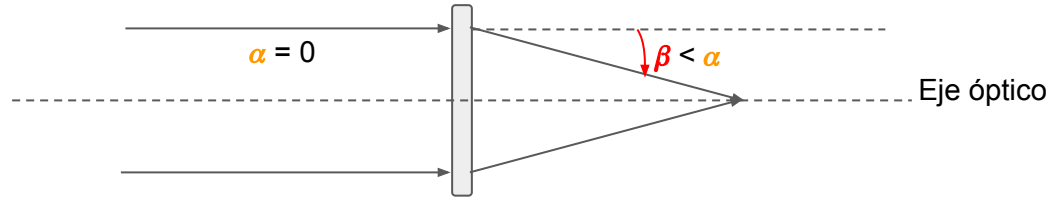
*Los rayos “se abren”
(comparados con su inclinación anterior)*

Dispositivos convergentes

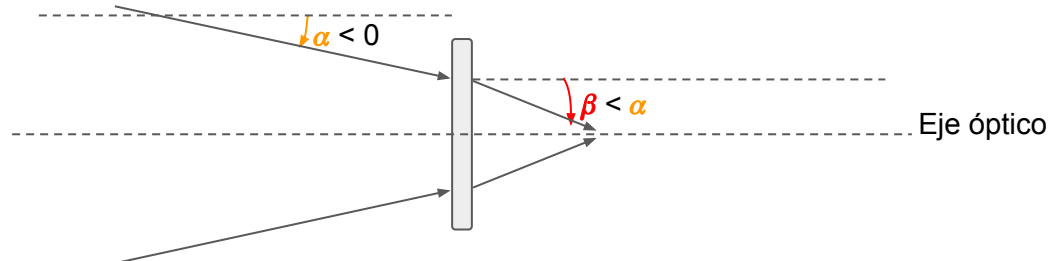
El haz emergente tiene menor apertura

Los rayos emergentes se desvían hacia el eje óptico

Frente incidente plano



Frente incidente convergente

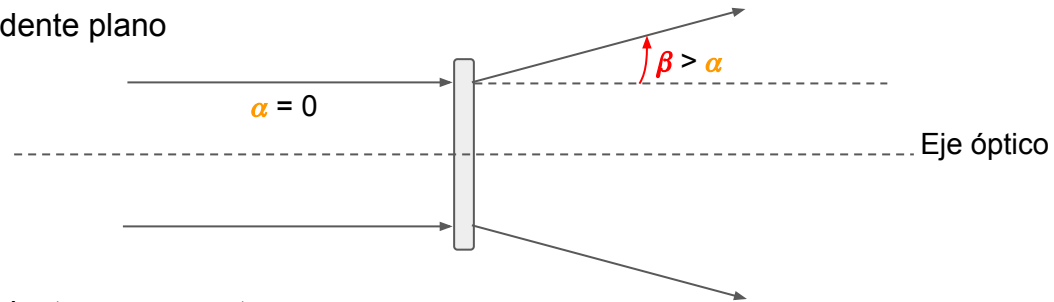


Dispositivos divergentes

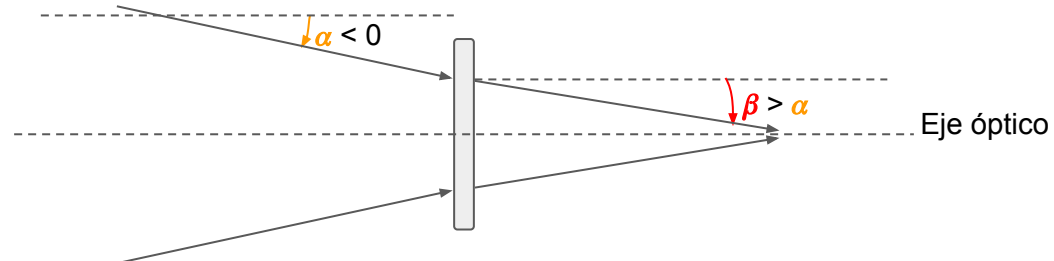
El haz emergente tiene mayor apertura

Los rayos emergentes se alejan del eje óptico

Frente incidente plano

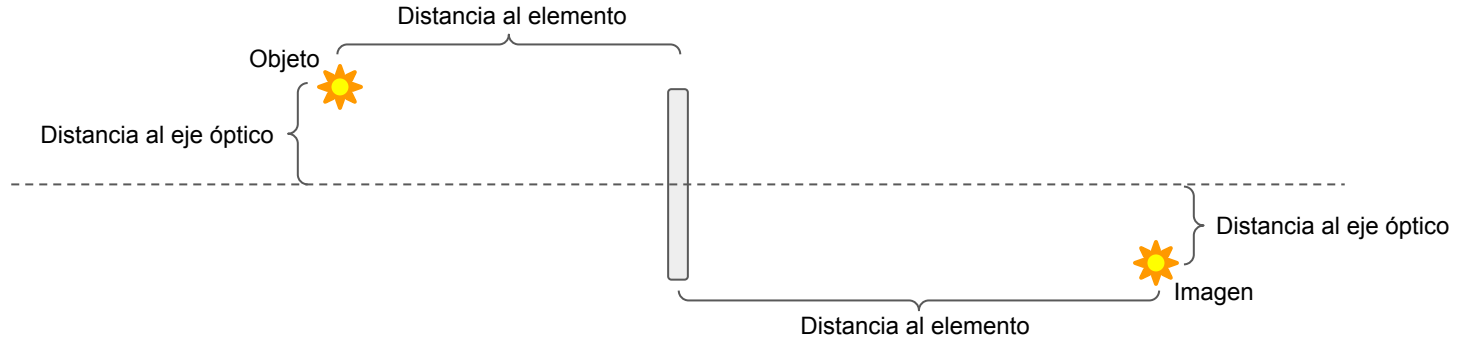


Frente incidente convergente



Problema

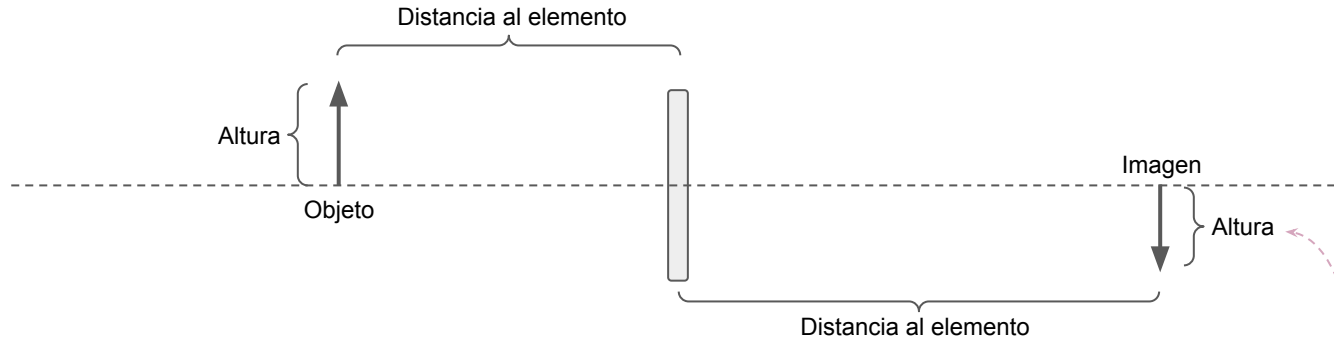
Dada la posición del objeto, hallar la posición de la imagen



$$(s_o, y_o) \rightarrow (s_i, y_i)$$

*Este problema se puede resolver analíticamente o gráficamente
(ambos métodos coinciden)*

¿Qué pasa si el objeto es extenso?



$$(s_o, y_o) \rightarrow (s_i, y_i)$$

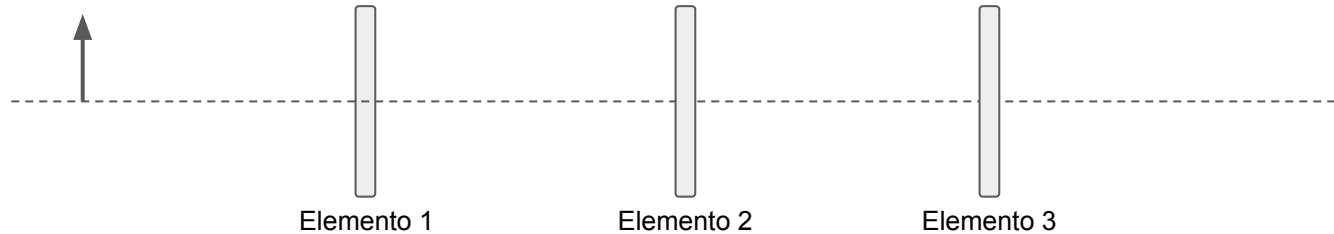
En este ejemplo, la altura de la imagen es negativa, esto indica una imagen invertida

Se toma a la punta del objeto como referencia y se la resuelve como si fuese una fuente puntual

Convenciones

El origen se coloca en el elemento óptico

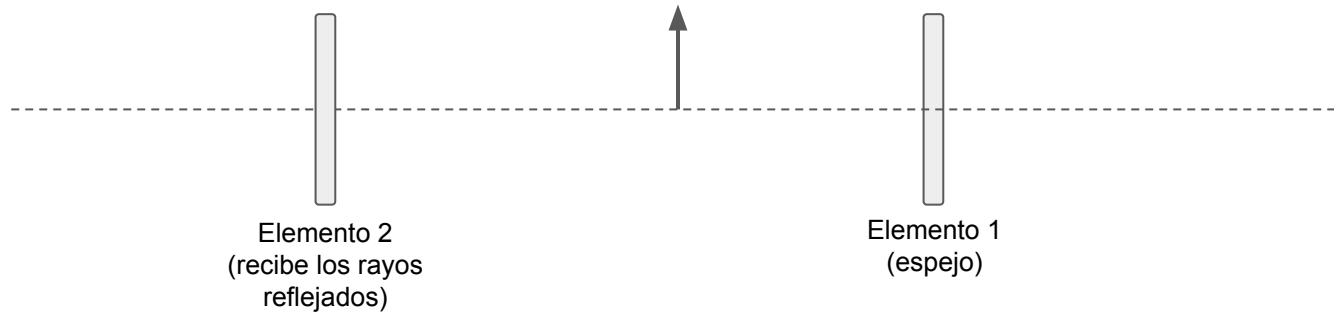
- Si tenemos más de un elemento, se resuelve cada elemento por separado aplicando este criterio.



Convenciones

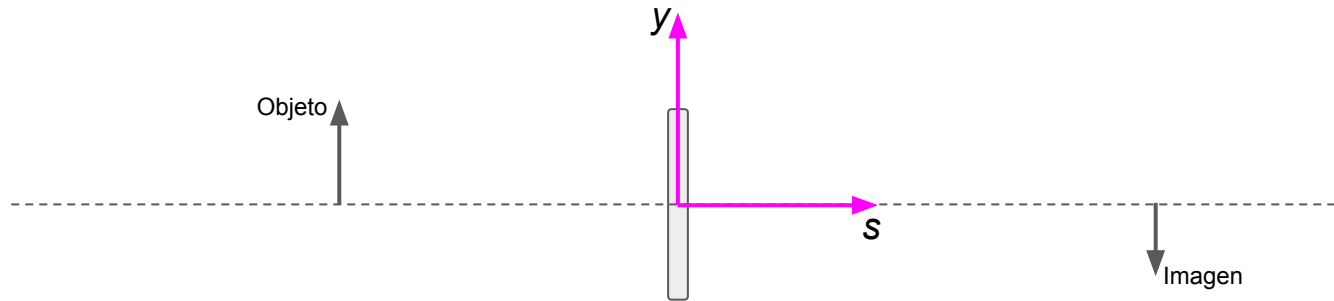
Se dibuja al sistema de modo que los rayos viajen de izquierda a derecha

- Si debido a la acción de algún elemento (por ejemplo un espejo) los rayos se invierten, se rehace el dibujo para respetar el criterio.



Sistema de coordenadas

Convención cartesiana

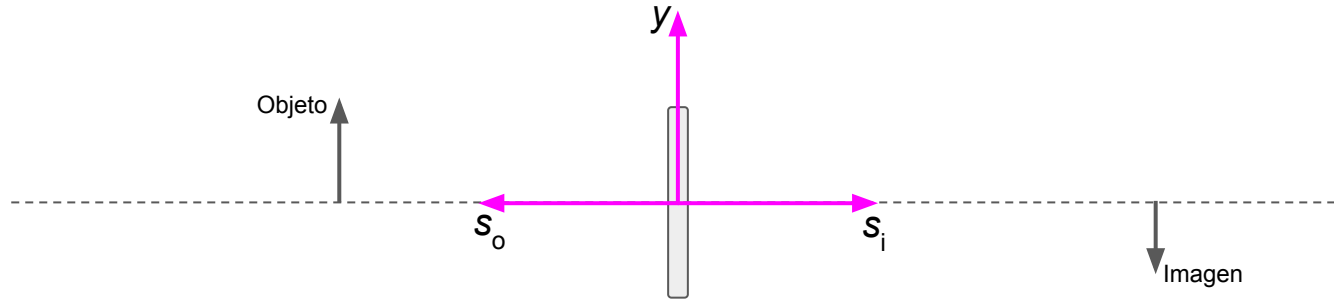


Un único sistema de referencia para todo

Sistema de coordenadas

Convención “positiva”

(la que usa el Hecht)



*Dos sistemas diferentes para la distancia horizontal (s):
Uno para el objeto y otro para la imagen*

Tienen el mismo origen pero el sentido positivo es diferente

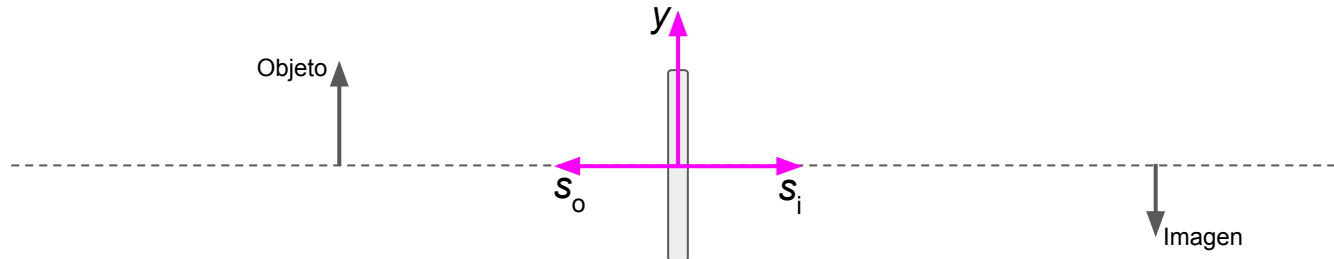
Ecuación de la lente delgada

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

(Escrita en la convención “positiva”)

f es la distancia focal:

- *Es un parámetro que caracteriza a la lente*
- *Es una distancia respecto al elemento*
- *Puede ser positivo o negativo (ya veremos qué significa)*



Ecuación de la lente delgada

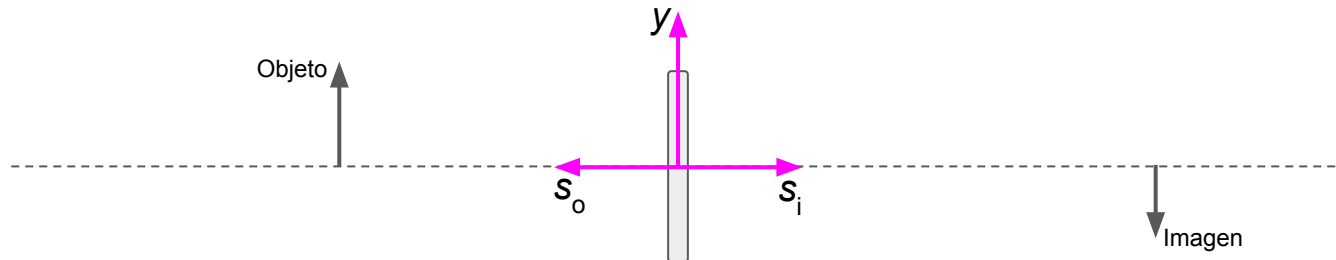
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

(Escrita en la convención “positiva”)

Problema típico:

- Dados f y un objeto definido por s_o e y_o
- Hallar s_i e y_i

O cualquier otra variante



Lente delgada

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

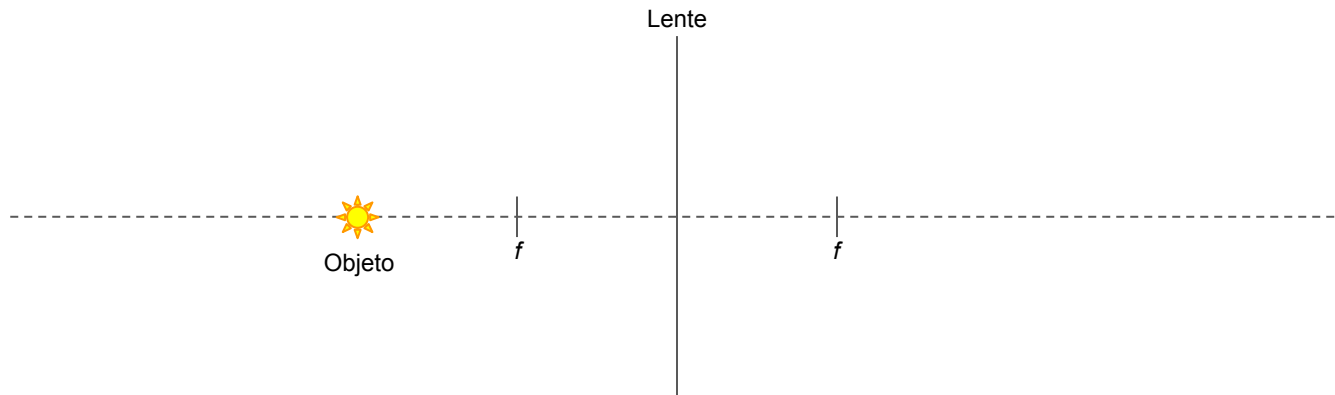
Convención positiva

Ejemplo (con fuente puntual)

- $f = 5 \text{ cm}$
- $s_o = 10 \text{ cm}$

$$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
$$s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$$
$$s_i^{-1} = (10 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = 10 \text{ cm} > 0$$



Lente delgada

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

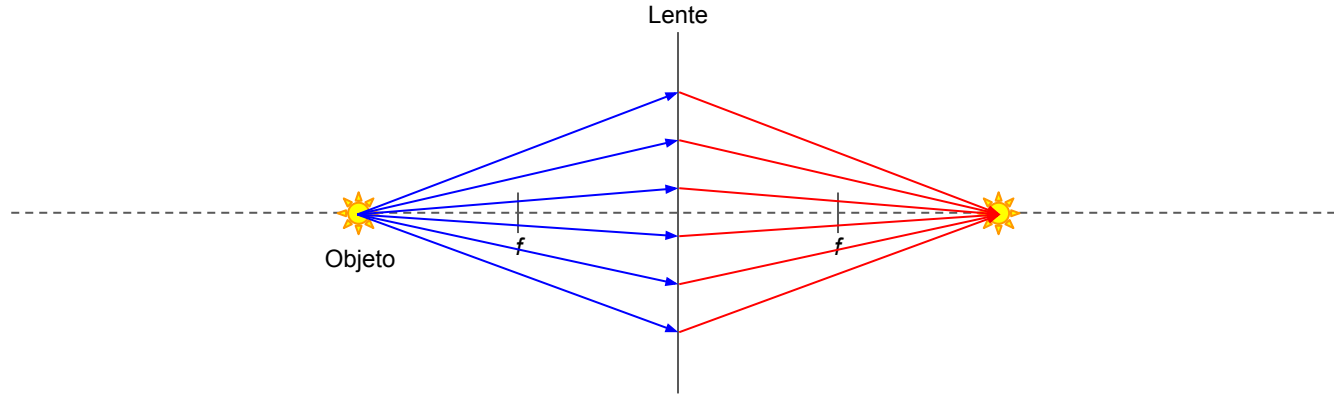
Convención positiva

Ejemplo (con fuente puntual)

- $f = 5 \text{ cm}$
- $s_o = 10 \text{ cm}$

$$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
$$s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$$
$$s_i^{-1} = (10 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = 10 \text{ cm} > 0$$



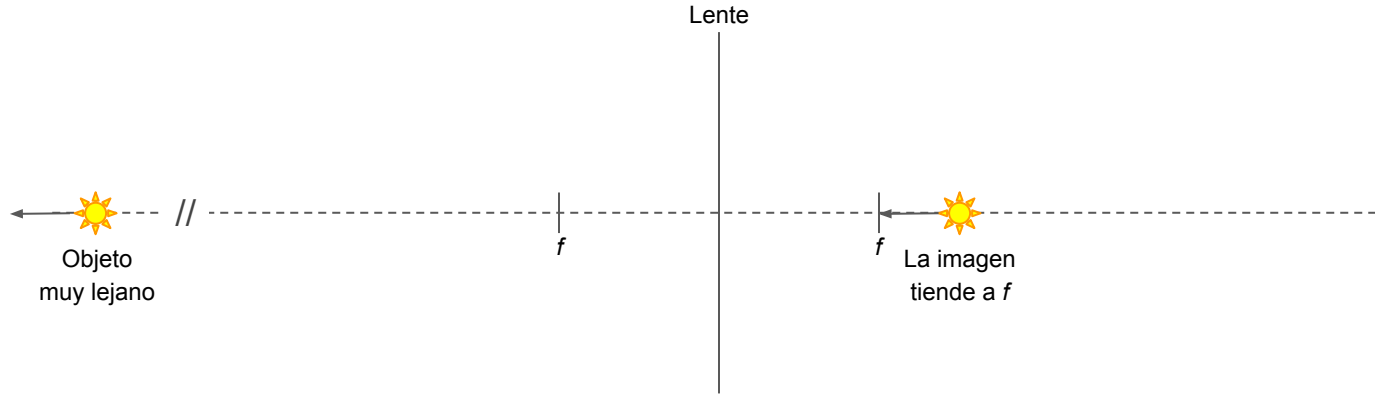
Todos los rayos que salen del objeto y que inciden en la lente, son desviados y convergen en la imagen

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

Convención positiva

¿Qué pasa si el objeto se aleja de la lente?

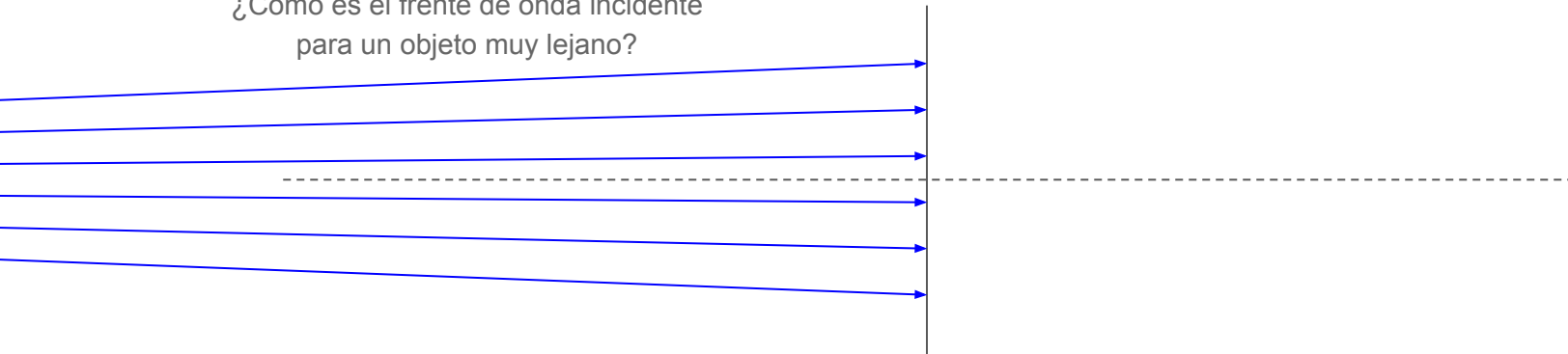
- $s_o = 10^2 \text{ cm}, 10^3 \text{ cm}, \text{ etc.}$
(es decir, $s_o \rightarrow \infty$)
- $s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$
- $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (100 \text{ cm})^{-1} \rightarrow s_i = 5.26 \text{ cm}$
- $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (1000 \text{ cm})^{-1} \rightarrow s_i = 5.02 \text{ cm}$
- $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (\infty \text{ cm})^{-1} \rightarrow s_i = 5 \text{ cm}$

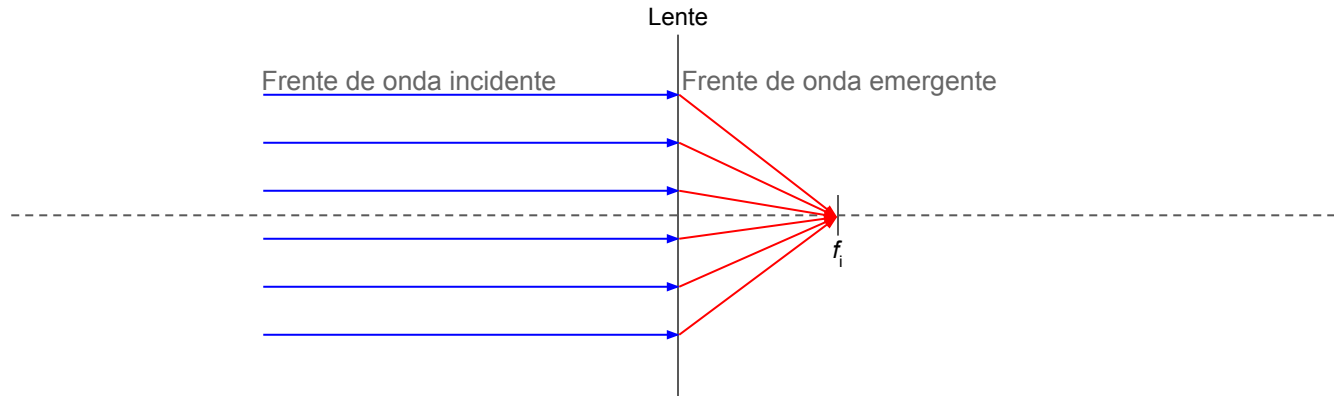


Foco imagen: lugar donde se forma la imagen cuando el objeto se encuentra a una distancia infinita

¿Cómo es el frente de onda incidente
para un objeto muy lejano?

Lente





Frente de onda plano incidente → Frente esférico convergente en el foco imagen

Cualquier rayo incidente paralelo al eje óptico se desvía hacia el foco imagen

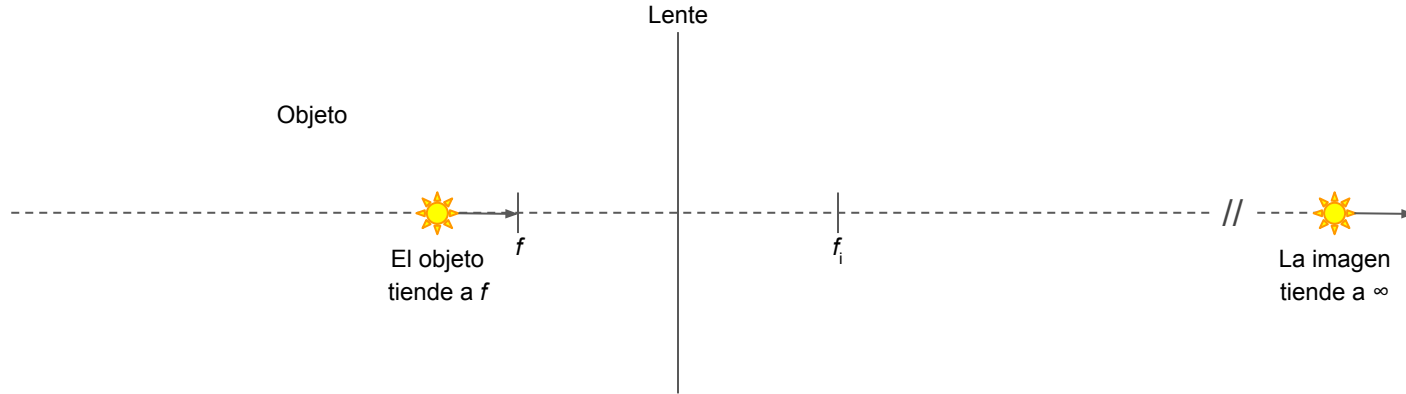
Lente delgada

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

Convención positiva

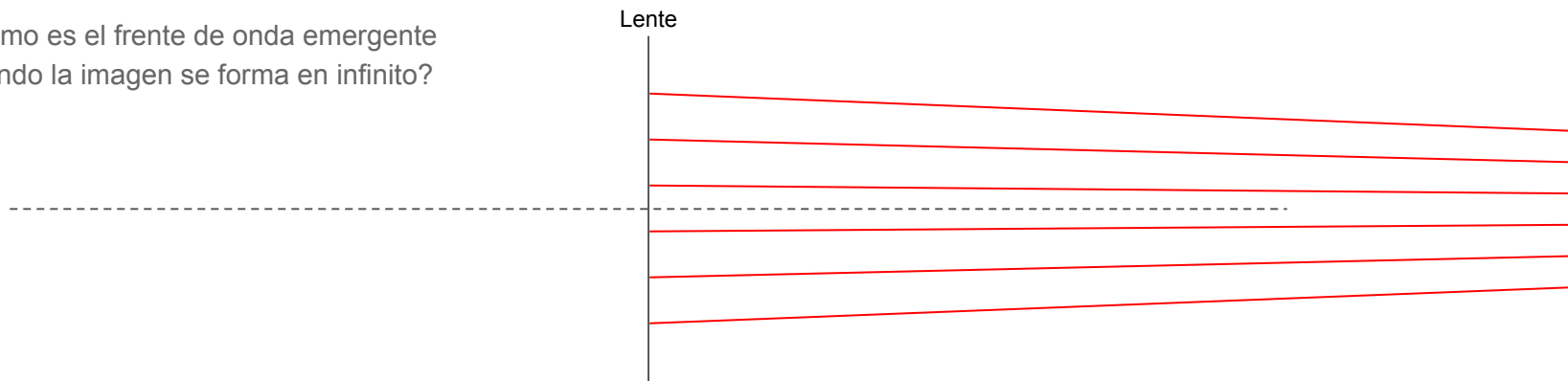
¿Qué pasa si el objeto se acerca a la distancia focal?

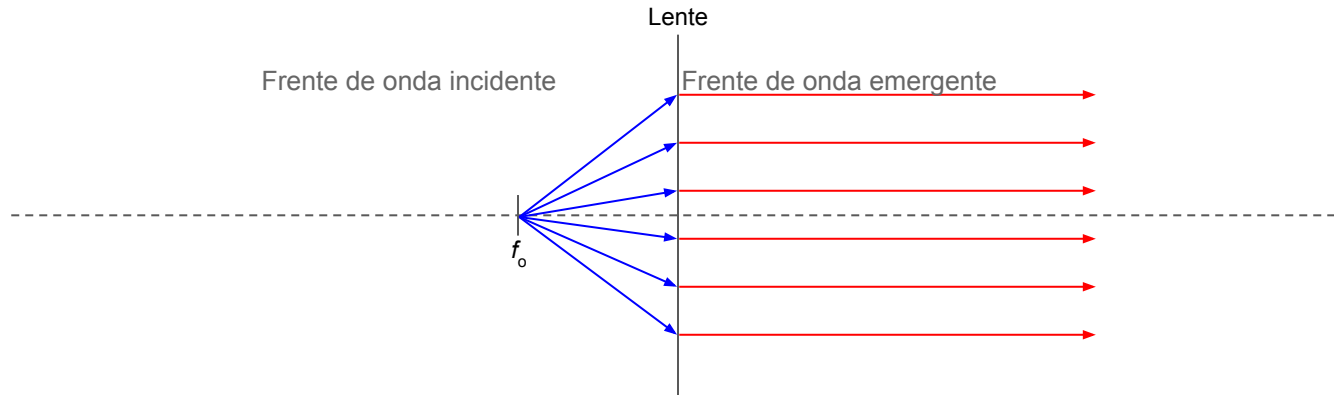
- $s_o = 6 \text{ cm}, 5.5 \text{ cm}, \text{ etc.}$
(es decir, $s_o \rightarrow 5 \text{ cm}$)
- $s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$
- $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (6 \text{ cm})^{-1} \rightarrow s_i = 30 \text{ cm}$
- $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (5.5 \text{ cm})^{-1} \rightarrow s_i = 55 \text{ cm}$
- $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (5 \text{ cm})^{-1} = 0 \rightarrow s_i = \infty \text{ cm}$



Foco objeto: lugar donde debe ubicarse el objeto para que la imagen se forme a distancia infinita

¿Cómo es el frente de onda emergente cuando la imagen se forma en infinito?





Frente esférico proveniente desde el foco objeto → Frente de onda plano emergente

Cualquier rayo incidente proveniente del foco objeto se desvía hacia el foco imagen

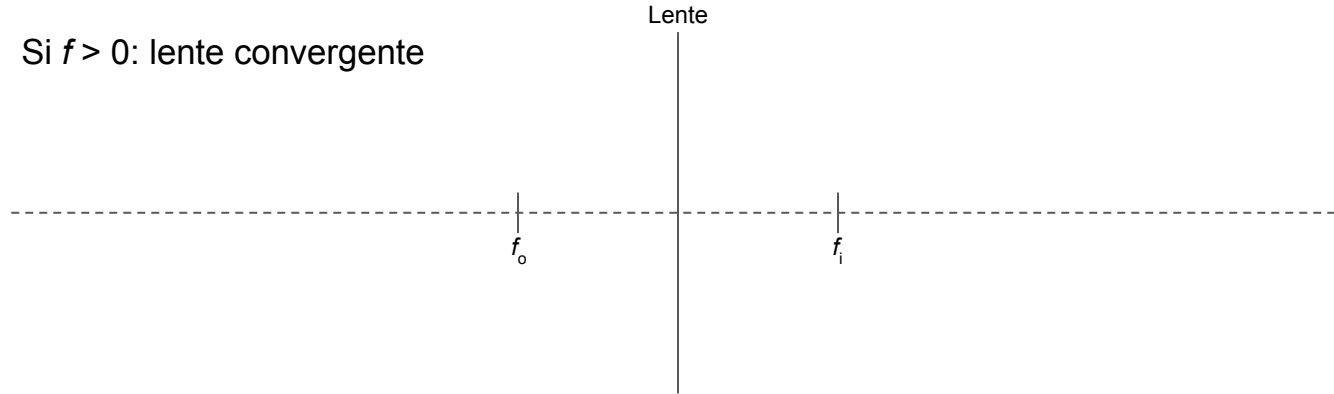
Lente delgada

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

Convención positiva

Pasando en limpio...

Si $f > 0$: lente convergente



Cada foco se ubica en una posición positiva respecto a su sistema de referencia

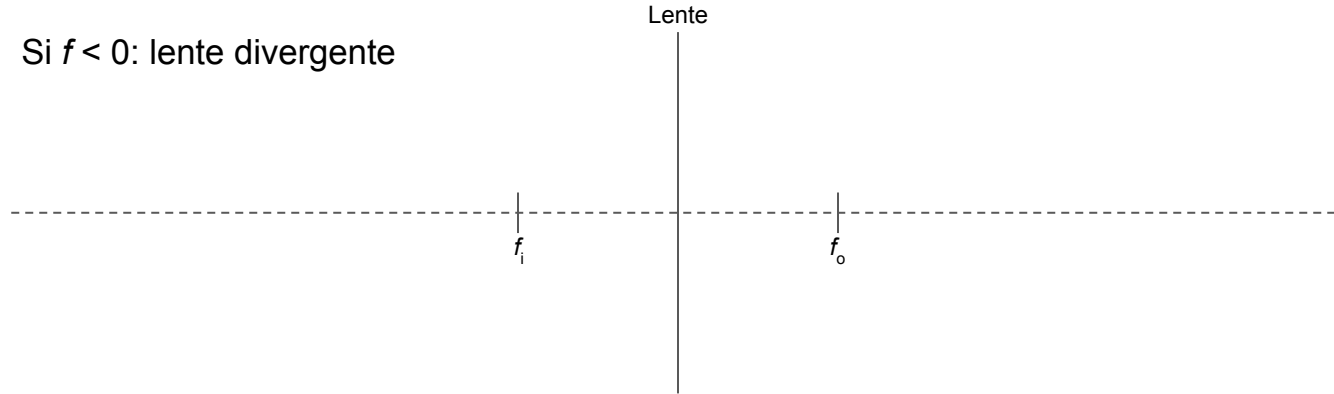
Lente delgada

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

Convención positiva

Pasando en limpio...

Si $f < 0$: lente divergente



Cada foco se ubica en una posición negativa respecto a su sistema de referencia

Para pensar...

¿Qué significa que los focos de una lente “sean iguales”?

Mismo ejemplo de antes pero ahora la lente es divergente

Lente delgada

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

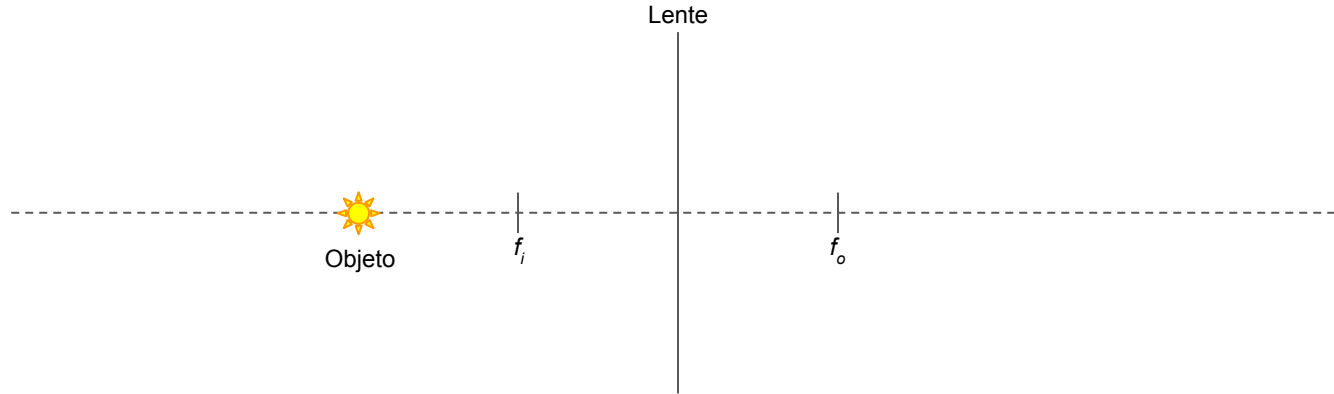
Convención positiva

Ejemplo 2, ahora la lente es divergente ($f < 0$)

- $f = -5 \text{ cm}$
- $s_o = 10 \text{ cm}$

$$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
$$s_i^{-1} = (-5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$$
$$s_i^{-1} = (-3.33 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = -3.33 \text{ cm} < 0$$



Lente delgada

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

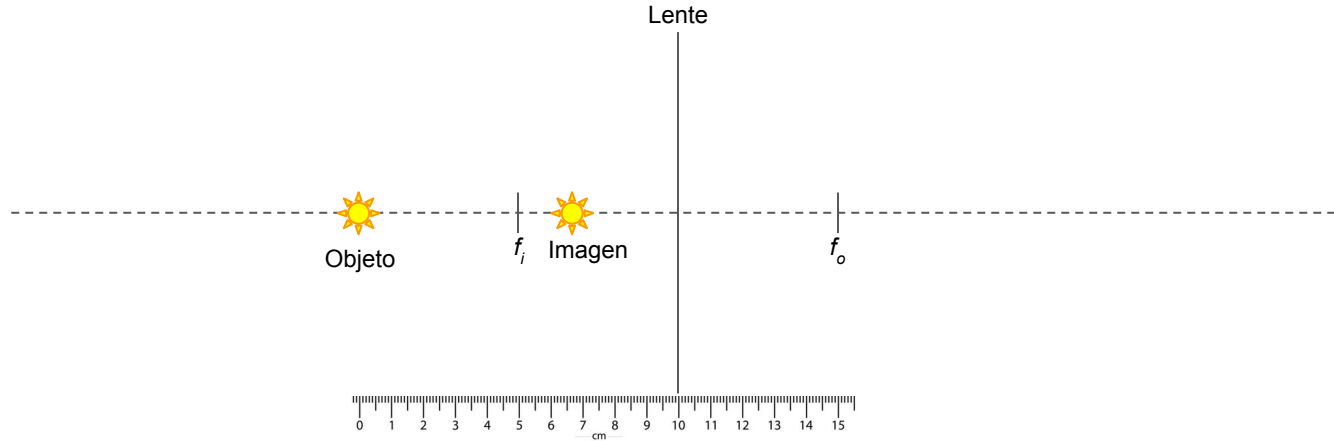
Convención positiva

Ejemplo 2, ahora la lente es divergente ($f < 0$)

- $f = -5 \text{ cm}$
- $s_o = 10 \text{ cm}$

$$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
$$s_i^{-1} = (-5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$$
$$s_i^{-1} = (-3.33 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = -3.33 \text{ cm} < 0$$



Lente delgada

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

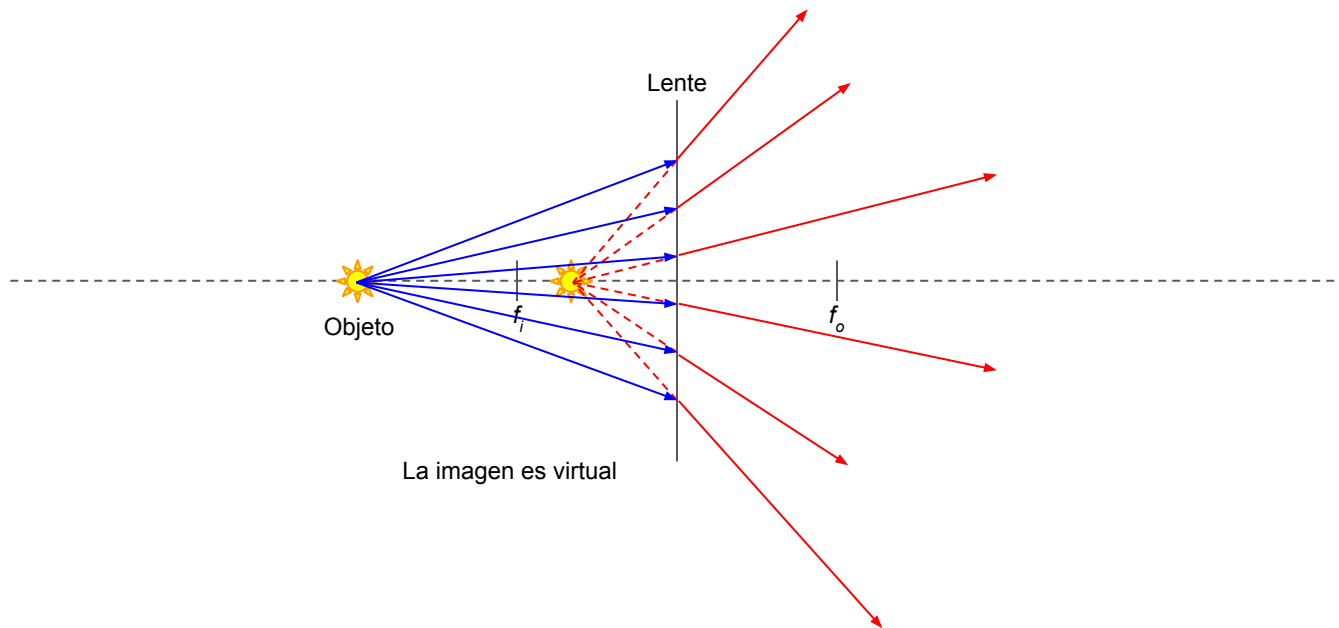
Convención positiva

Ejemplo 2, ahora la lente es divergente ($f < 0$)

- $f = -5 \text{ cm}$
- $s_o = 10 \text{ cm}$

$$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
$$s_i^{-1} = (-5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$$
$$s_i^{-1} = (-3.33 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = -3.33 \text{ cm} < 0$$



Lente delgada

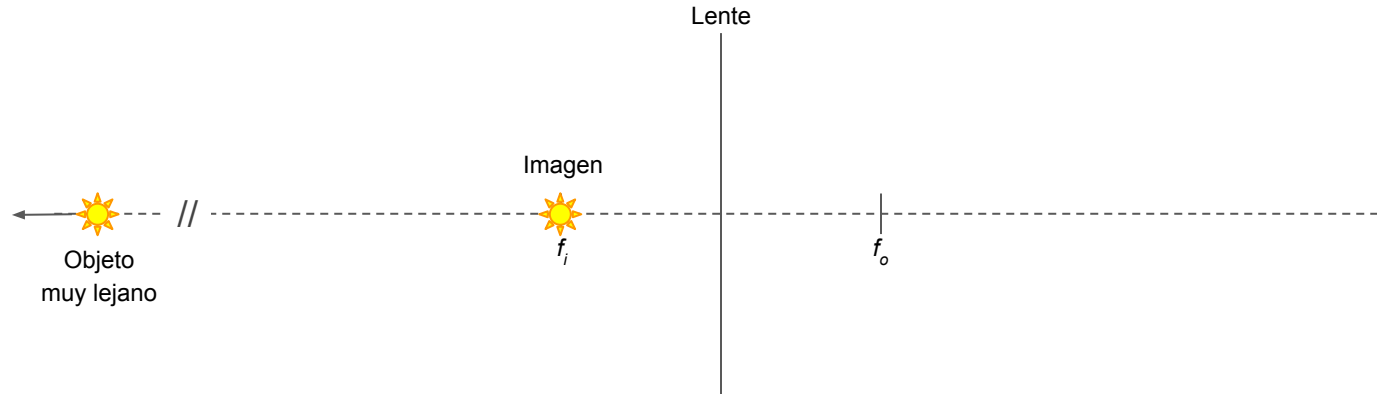
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

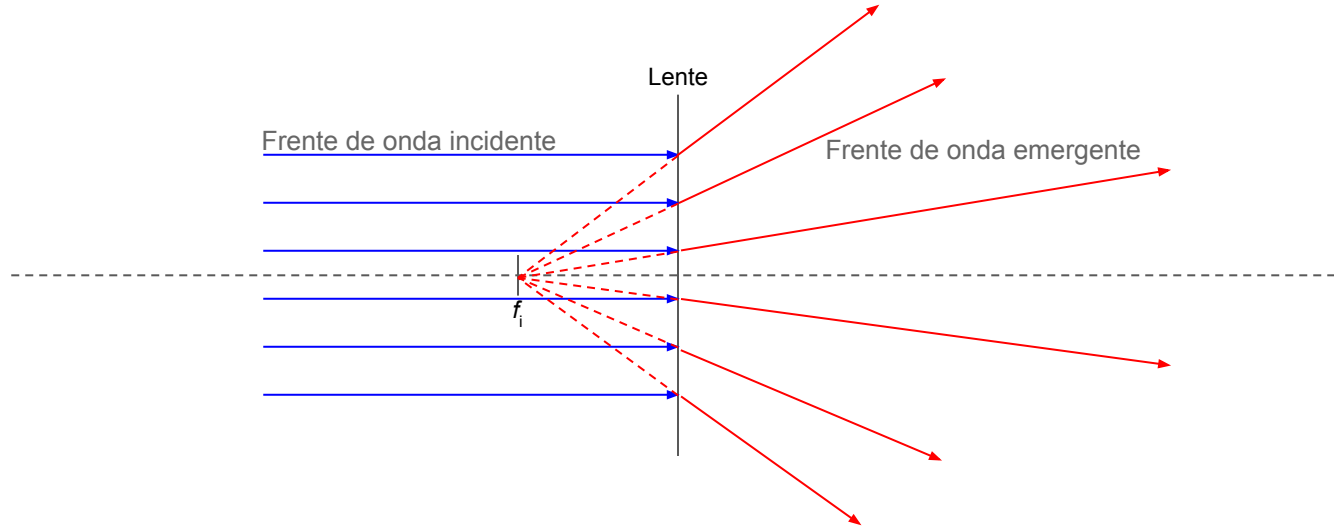
Convención positiva

Ejemplo 2, ahora la lente es divergente ($f < 0$)

$$\begin{aligned} - f &= -5 \text{ cm} \\ - s_o &= +\infty \text{ cm} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \begin{aligned} s_i^{-1} &= 1/f - 1/\infty \\ s_i^{-1} &= (-5 \text{ cm})^{-1} - 0 \\ s_i^{-1} &= (-5 \text{ cm})^{-1} \end{aligned}$$

$$s_i = -5 \text{ cm} < 0$$





Frente de onda plano incidente → Frente esférico divergente desde el foco imagen
Cualquier rayo incidente paralelo al eje óptico se desvía como si viniera desde el foco imagen

Lente delgada

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

Convención positiva

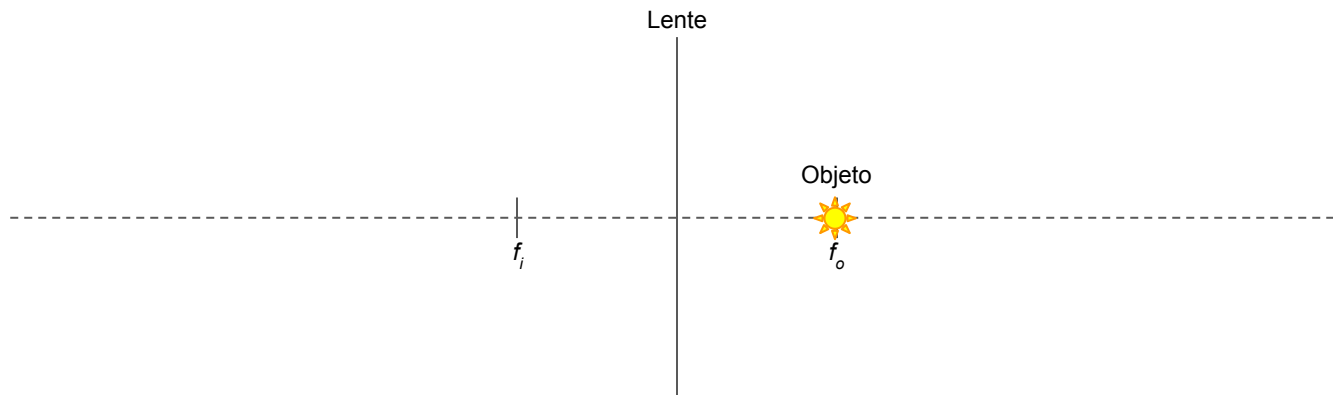
FOCO OBJETO

¿Y si ubico la fuente en el foco objeto?

- $f = -5 \text{ cm}$
- $s_o = -5 \text{ cm}$

$$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
$$s_i^{-1} = (-5 \text{ cm})^{-1} - (-5 \text{ cm})^{-1}$$
$$s_i^{-1} = (0 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = \infty > 0$$



Lente delgada

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

Convención positiva

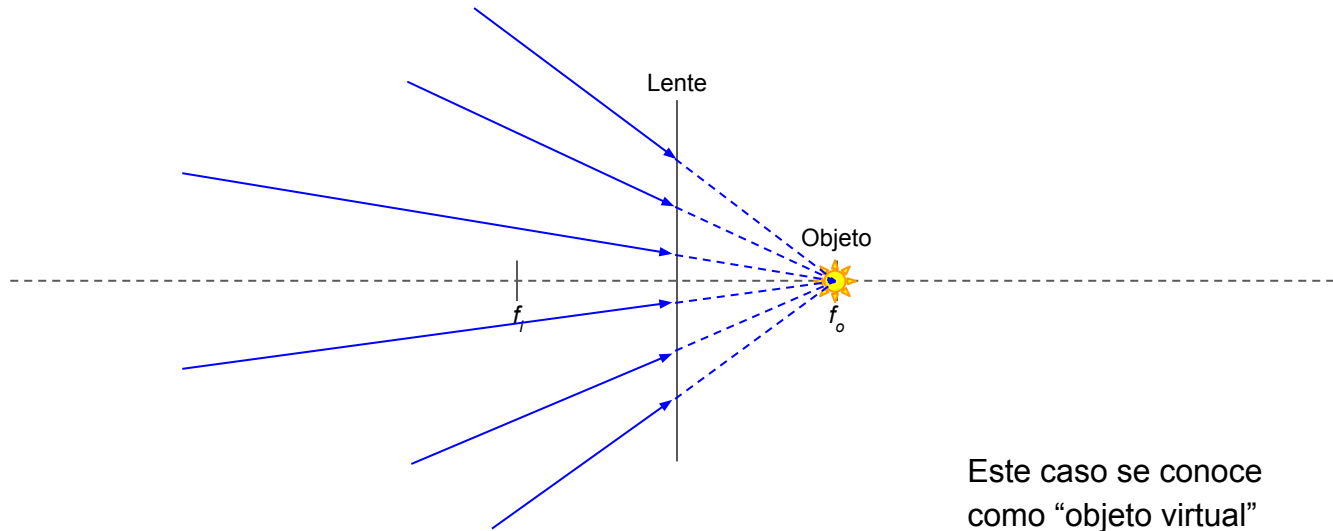
FOCO OBJETO

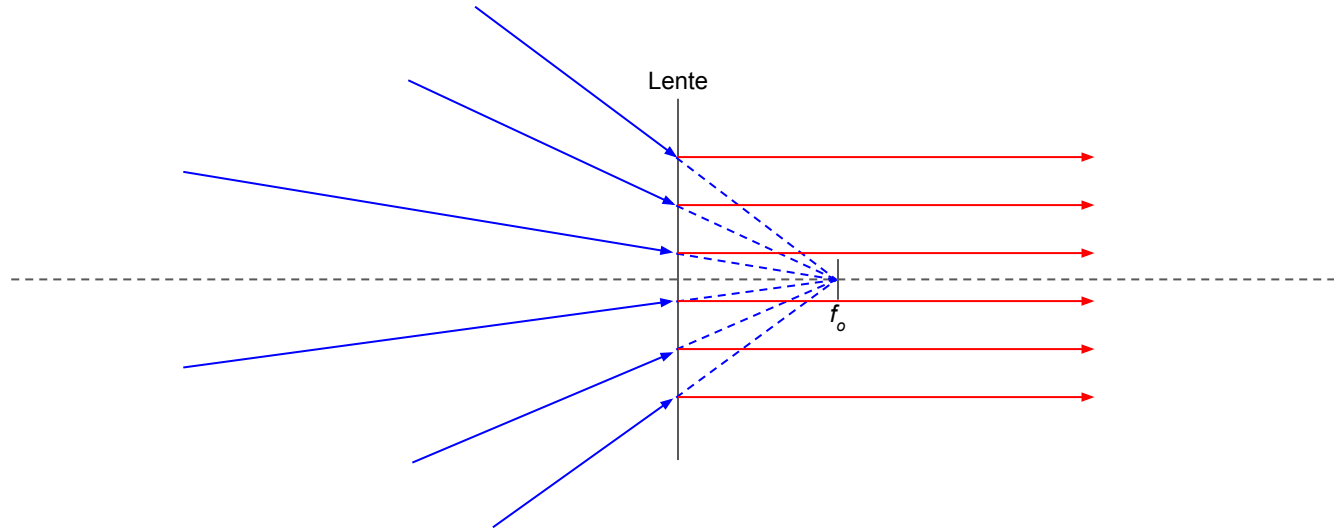
¿Y si ubico la fuente en el foco objeto?

- $f = -5 \text{ cm}$
- $s_o = -5 \text{ cm}$

$$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
$$s_i^{-1} = (-5 \text{ cm})^{-1} - (-5 \text{ cm})^{-1}$$
$$s_i^{-1} = (0 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = \infty > 0$$





Frente de onda incidente convergente en el foco objeto → Frente emergente plano

Cualquier rayo incidente hacia el foco objeto se desvía paralelo al eje óptico

Reglas de trazado de rayos

1. Rayo incidente en una trayectoria que contiene al foco objeto: emerge paralelo al eje óptico
2. Rayo incidente paralelo al eje óptico: emerge en una trayectoria que contiene al foco imagen
3. Rayo incidente que intersecta al eje óptico: no se desvía

Las primeras dos reglas valen para todos los elementos ópticos (espejo, dioptra, lente, etc.)

La última vale sólo para lentes delgadas.

Lente delgada

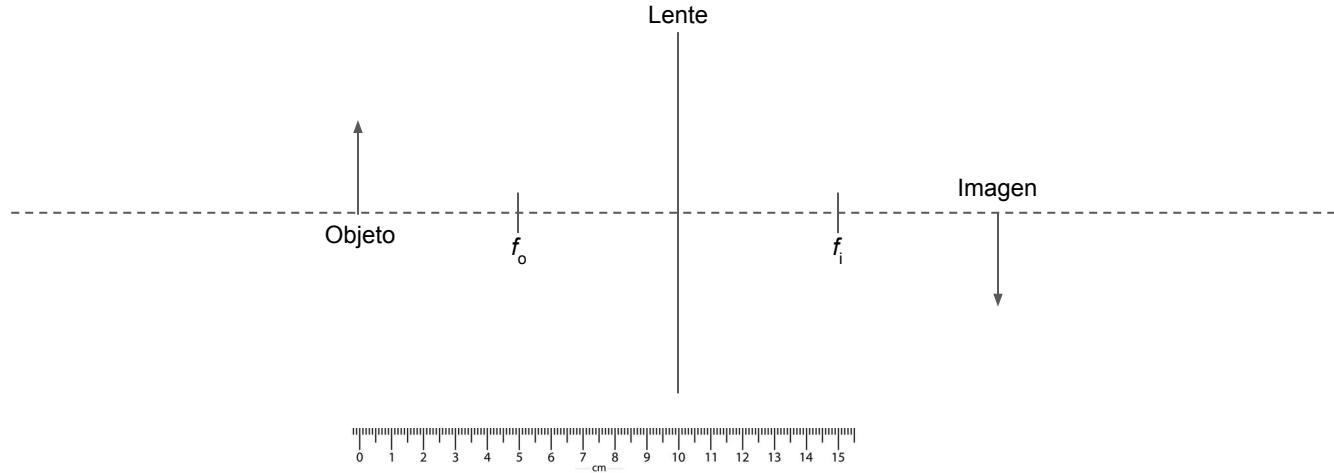
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Convención positiva

Ejemplo (ahora con fuente extensa)

- $f = 5 \text{ cm}$
 - $s_o = 10 \text{ cm}$
 - $y_o = 1 \text{ cm}$
- $s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$
 $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$
 $s_i^{-1} = (10 \text{ cm})^{-1}$

$$s_i = 10 \text{ cm} > 0$$



Lente delgada

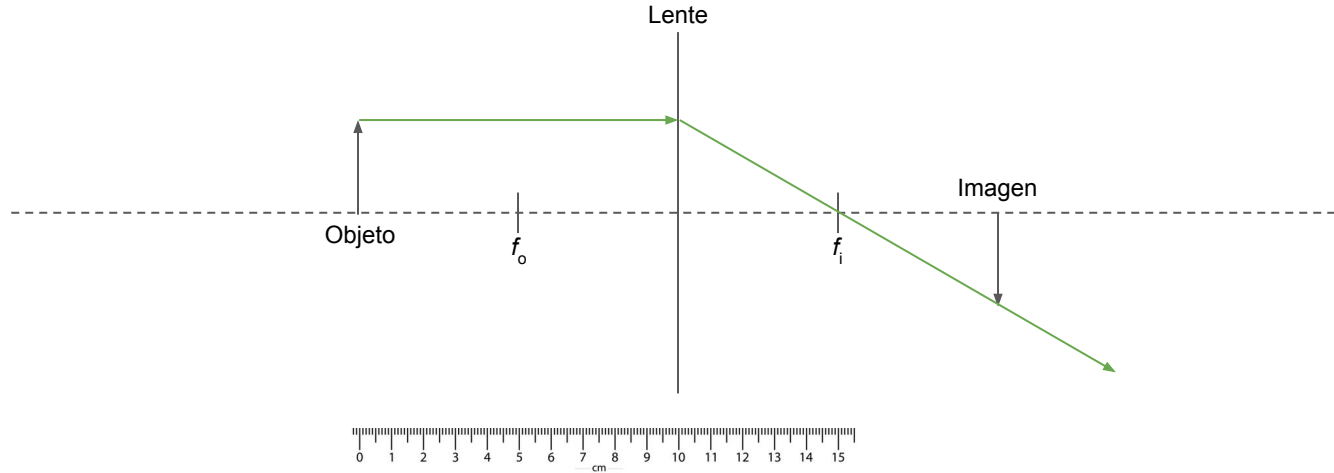
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Convención positiva

Ejemplo (ahora con fuente extensa)

- $f = 5 \text{ cm}$
 - $s_o = 10 \text{ cm}$
 - $y_o = 1 \text{ cm}$
- $s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$
 $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$
 $s_i^{-1} = (10 \text{ cm})^{-1}$

$$s_i = 10 \text{ cm} > 0$$



Lente delgada

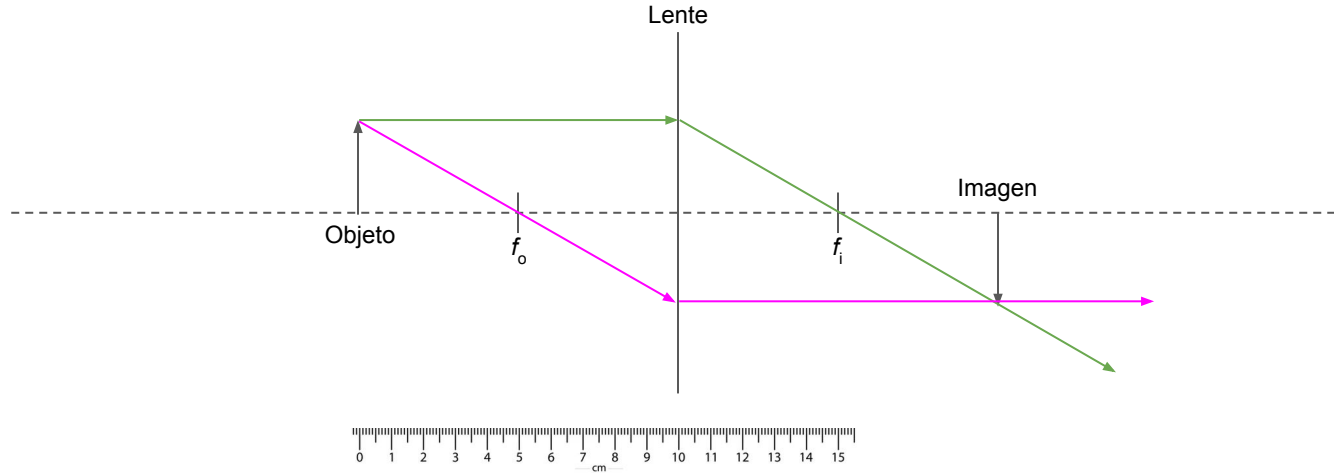
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Convención positiva

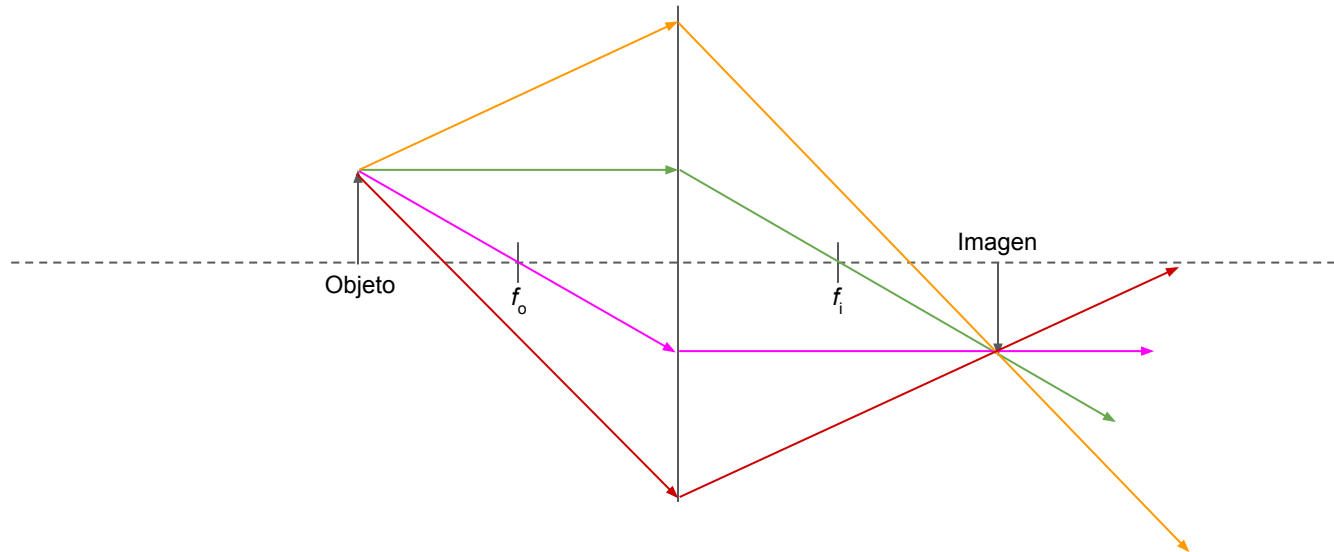
Ejemplo (ahora con fuente extensa)

- $f = 5 \text{ cm}$
 - $s_o = 10 \text{ cm}$
 - $y_o = 1 \text{ cm}$
- $s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$
 $s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (10 \text{ cm})^{-1}$
 $s_i^{-1} = (10 \text{ cm})^{-1}$

$$s_i = 10 \text{ cm} > 0$$



Todos los rayos que salen del objeto se desvían en la lente de modo que convergen a la imagen



Si conocemos la posición del objeto y de su imagen, conocemos la trayectoria completa de todos los rayos

Nos falta determinar la altura de la imagen

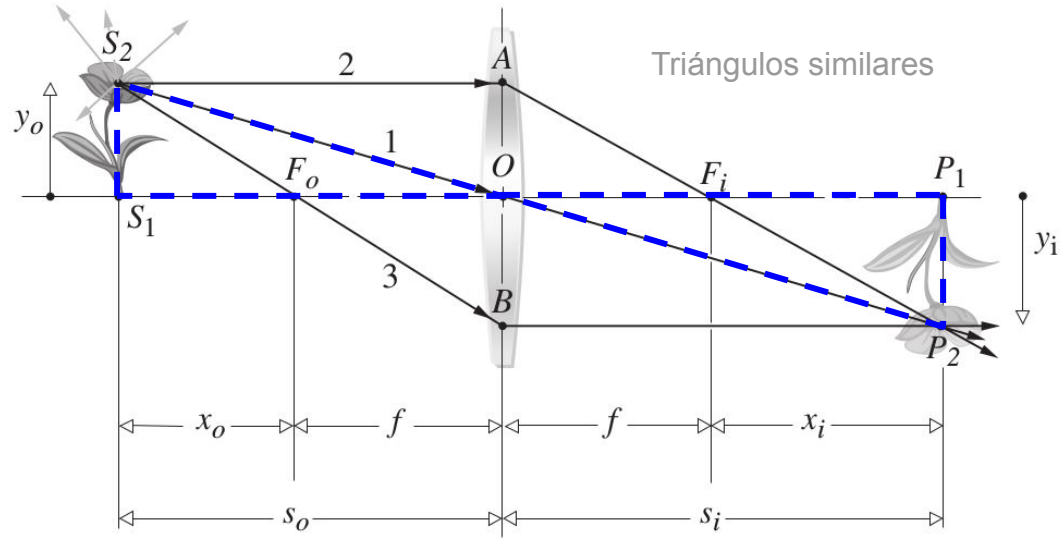


Figure 5.24 Object and image location for a thin lens.

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

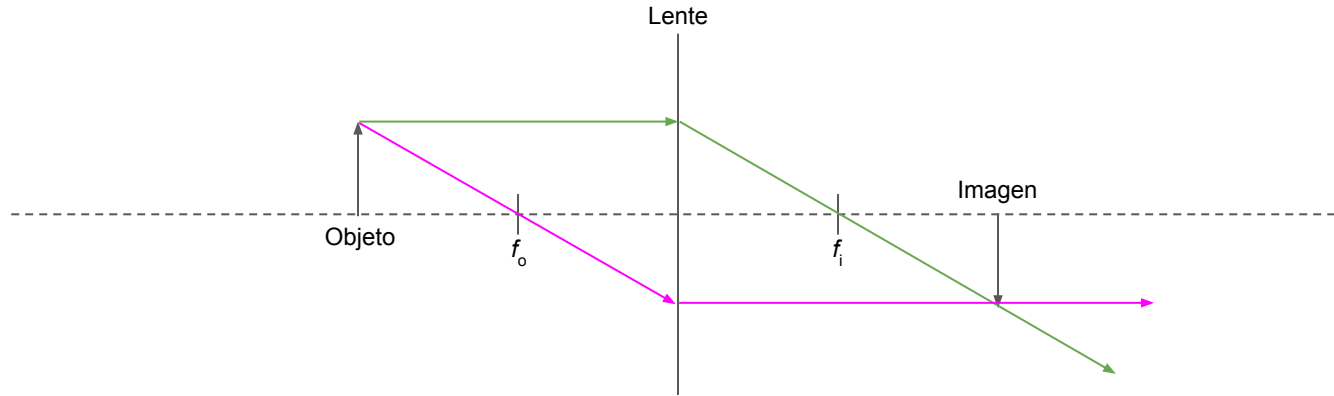
Definimos la magnificación transversal como

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o}$$

...y usando lo obtenido en la diapo anterior

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

Nos falta determinar la altura de la imagen



$$Mt = -s_i / s_o$$

$$s_o = s_i = 10 \text{ cm, luego } Mt = -1$$

Imagen del mismo tamaño, invertida

$$y_i = -1 \text{ cm}$$

Lente delgada

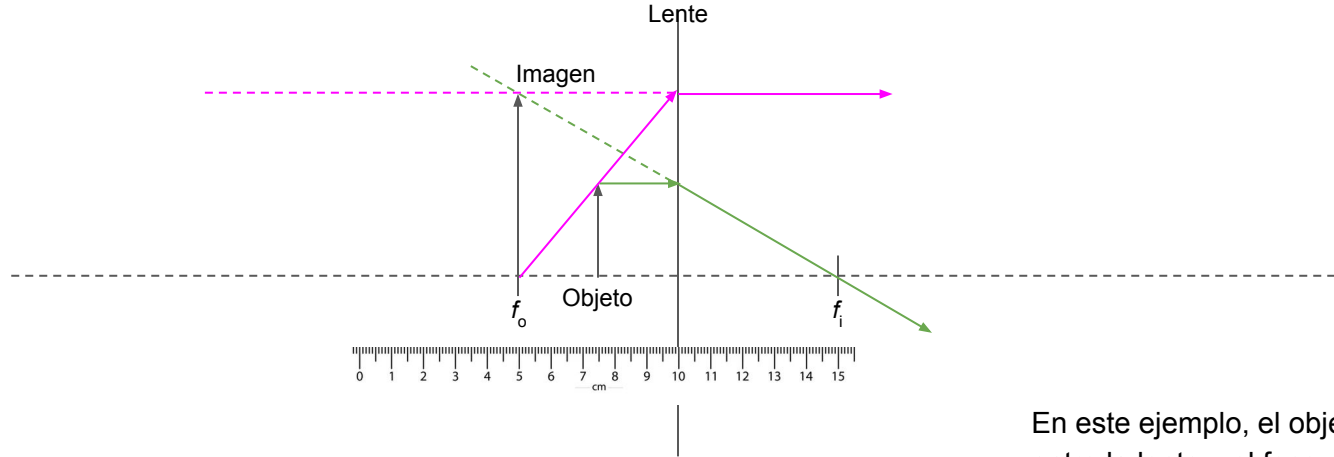
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Convención positiva

Último ejemplo

- $f = 5 \text{ cm}$
 - $s_o = 2.5 \text{ cm}$
 - $y_o = 1 \text{ cm}$
- $$s_i^{-1} = 1/f - 1/s_o$$
- $$s_i^{-1} = (5 \text{ cm})^{-1} - (2.5 \text{ cm})^{-1}$$
- $$s_i^{-1} = (-5 \text{ cm})^{-1}$$

$$s_i = -5 \text{ cm} < 0$$



En este ejemplo, el objeto se ubica entre la lente y el foco objeto.

El resultado es una imagen virtual en el espacio de imagen negativo ($s_i < 0$).

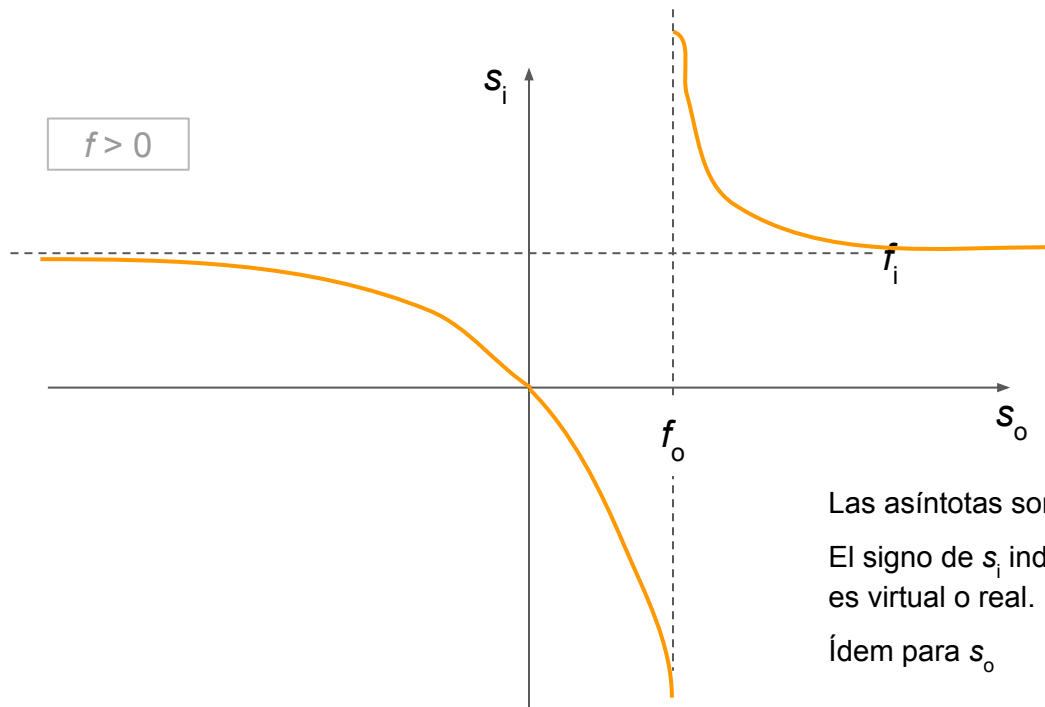
BONUS TRACK

Partamos de :

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

...y hallemos $s_i(s_o)$

$$s_i = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{s_o} \right)^{-1} = \frac{f s_o}{s_o - f}$$



Las asíntotas son los focos

El signo de s_i indica si la imagen es virtual o real.

Ídem para s_o