

# 12-NATURALEZA DE LA LUZ Y LEYES DE ÓPTICA GEOMÉTRICA



Esta fotografía muestra un arco iris secundario con los colores invertidos. La aparición del arco iris depende de tres fenómenos ópticos: reflexión, refracción y dispersión



## Christiaan Huygens

Físico y astrónomo holandés (1629-1695). Es conocido por sus aportaciones a los campos de la óptica y la dinámica. Para él, la luz consistía en un tipo de movimiento vibratorio que se dispersa y produce la sensación de luz cuando incide en los ojos. Con base en esta teoría, dedujo las leyes de la reflexión y la refracción y explicó el fenómeno de doble refracción.

# NATURALEZA DE LA LUZ

Teorías sobre naturaleza de luz:

**teoría corpuscular** (Newton, Descartes)

**teoría ondulatoria** (Huygens, Hooke)

**Actualmente: naturaleza dual, tanto propiedades ondulatorias** (fenómenos de difracción, polarización) **como corpusculares**. (fenómenos de emisión y absorción).

**Velocidad de la luz en el vacío:  $c = 2,99792458 \times 10^8$  m/s** (valor adoptado como exacto, define el metro) **en el vacío para cualquier frecuencia.**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

**Óptica geométrica:** propagación de la luz se desplaza en una dirección fija y en línea recta cuando pasa por un medio uniforme.

Aproximación del rayo válida bajo suposición de que  $\lambda \ll d$  (tamaño de objetos con que interactúa)

**Índice de refracción** de un material óptico (también llamado **índice refractivo**), denotado con  **$n$** , es la razón entre la rapidez  $c$  de la luz en el vacío y la rapidez  $v$  de la luz en el material:

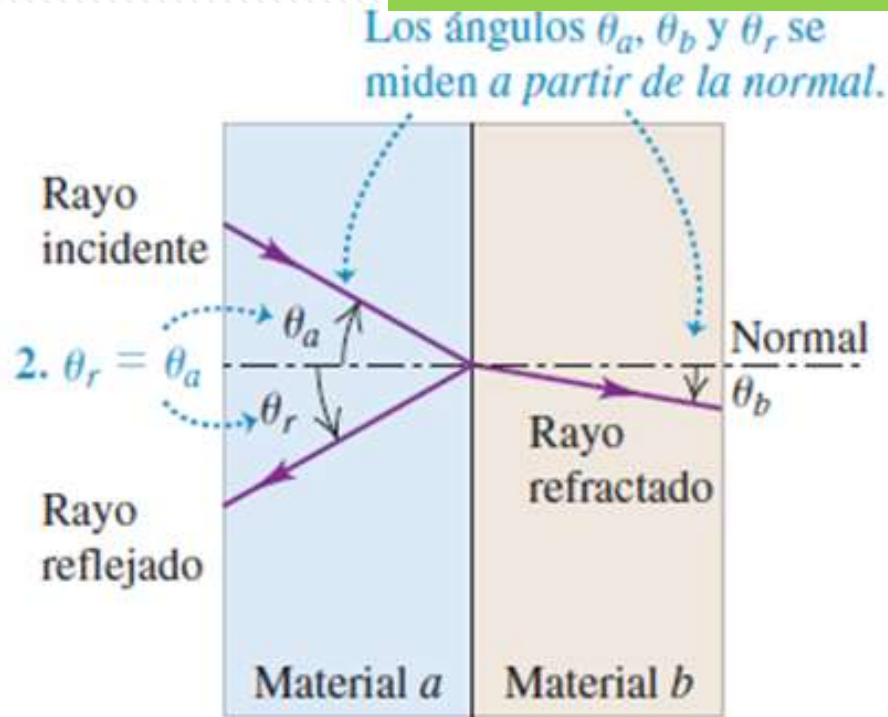
$$n \equiv \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}} \equiv \frac{c}{v}$$

La rapidez de la luz en cualquier material es *menor que en el vacío y depende de la frecuencia...* disminuye en gral. con la frecuencia

La luz se desplaza a su máxima rapidez en el vacío ( $c$ ) y no depende de la frecuencia.



# REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN



Direcciones de todos los rayos en interfase lisa entre dos materiales ópticos se describen a través de los ángulos que forman con la *normal* (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia.

Los **rayos incidente, reflejado y refractado**, y la **normal** se encuentran todos en el **mismo plano (plano de incidencia)**

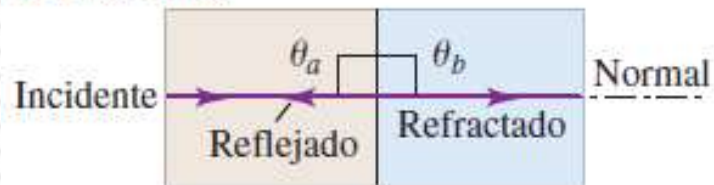
**Ley de reflexión**

$$\theta_r = \theta_a$$

**Ley de refracción o de Snell**

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

c) Un rayo orientado a lo largo de la normal no se desvía, sin importar cuáles sean los materiales.



Sin importar cuáles sean los materiales a cada lado de la interfase, en el caso de incidencia *normal a la interfase* el rayo transmitido no se desvía en absoluto.

Cuando un rayo pasa de un material *a* hacia otro material *b* que tiene un mayor índice de refracción ( $n_b > n_a$ ) y, por lo tanto, una menor rapidez de onda, el ángulo  $\theta_b$  que forma con la normal es más pequeño en el segundo material que el ángulo  $\theta_a$  en el primero; por consiguiente, el rayo se desvía hacia la normal.

**Cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pero sí lo hace su longitud de onda**

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

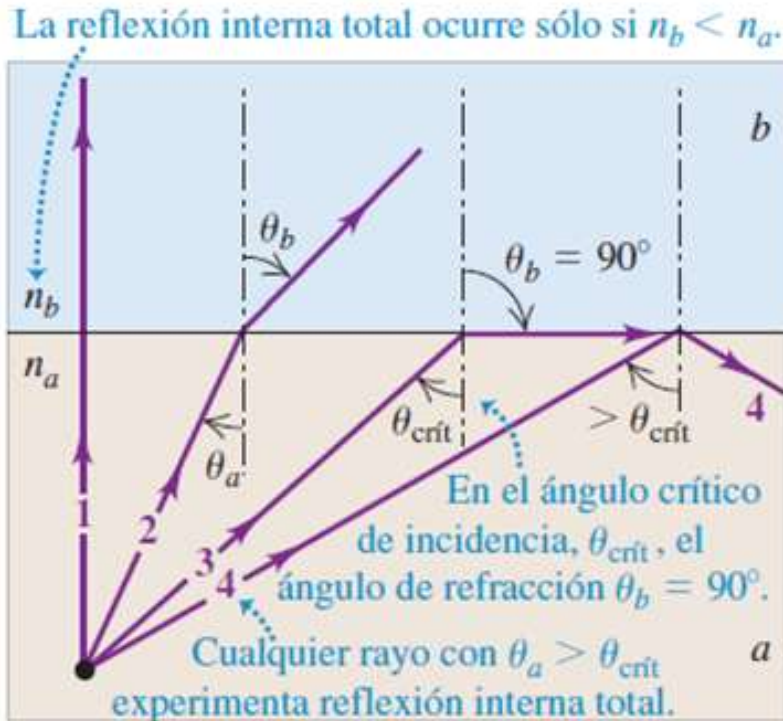


# REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

La luz es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida en una interfase entre dos materiales con distintos índices de refracción, sin embargo en ciertas circunstancias, *toda la luz se puede reflejar en la interfase, sin que se transmita nada de ella*, aun si el segundo material es transparente.

Los rayos inciden en la superficie del segundo material  $b$  con índice  $n_b$ , donde  $n_a > n_b$ .  
Los materiales  $a$  y  $b$  podrían ser agua y aire, respectivamente:

$$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$$



Hay un valor de  $\theta_a$  menor que  $90^\circ$  para el cual  $\sin \theta_b = 1$  y  $\theta_b = 90^\circ$ .

este ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge en forma tangencial a la superficie se llama **ángulo crítico ( $\theta_{crít}$ )**. La intensidad transmitida tiende a cero.

**Más allá del ángulo crítico, el rayo no puede pasar hacia el material ubicado en la parte superior y se refleja por completo en la frontera de la superficie: reflexión interna total.**

Solo ocurre si la incidencia del rayo es desde un material con mayor índice de refracción:  $n_b < n_a$  (por ejemplo del agua al aire, pero nunca al revés).

$$\sin \theta_{crít.} = \frac{n_b}{n_a}$$



# DISPERSIÓN

Luz blanca superposición de ondas con  $\lambda$  que se extienden a través de todo el espectro visible (400 a 700 nm) (ó incluso 380-780 nm).

**La rapidez de la luz en el vacío es la misma para todas las  $\lambda$ , pero en la materia varía con  $\lambda$ .**

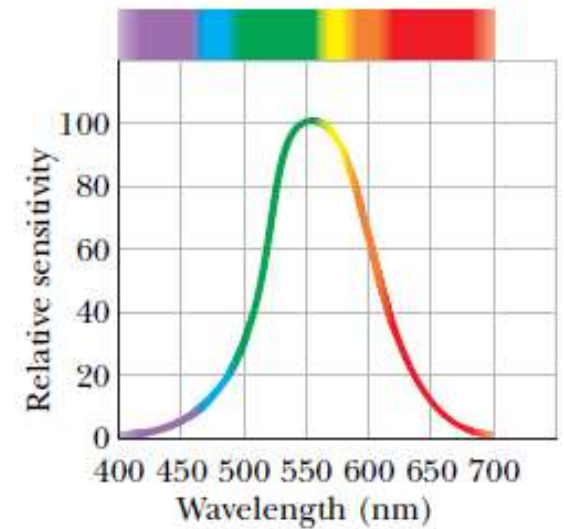
Índice de refracción ( $n$ ) de un material depende de  $\lambda$ : **dispersión.**

Variación del índice de refracción  $n$  con  $\lambda$ .  
*En gral.  $n$  disminuye al aumentar  $\lambda$ .*

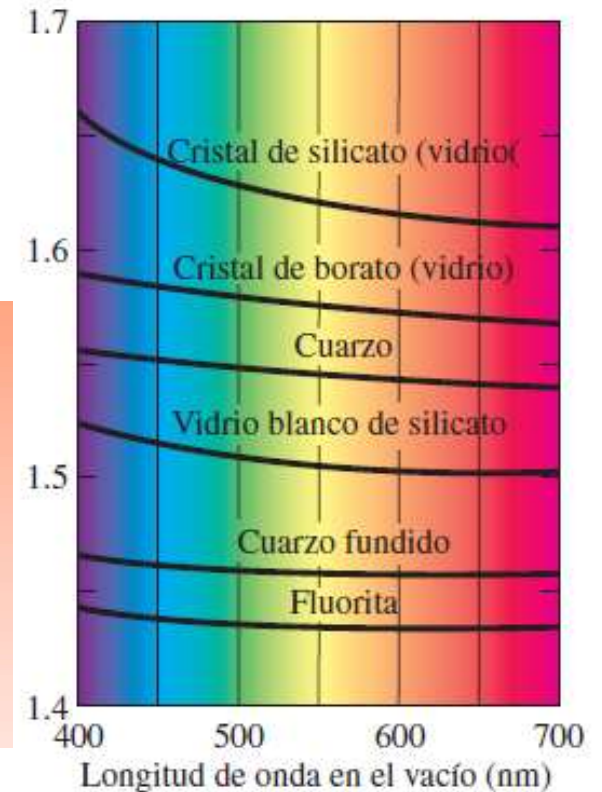
Como  $n$  depende de  $\lambda$ , por la ley de Snell luces de diferentes  $\lambda$  se refractan a diferentes ángulos cuando inciden sobre un material.



Cuando un haz de *luz blanca* (combinación de todas las longitudes de onda visibles) incide en un prisma los rayos que emergen se dispersan en una serie de colores conocida como **espectro visible.**



Índice de refracción ( $n$ )



Estos colores, en orden de longitud de onda decreciente son rojo, naranja, amarillo, verde, cian, azul y violeta.

## EJEMPLO: Ejercicio 5.7.a

**Prismas a)** Luz blanca entra en un prisma de vidrio de sección triangular. Incide perpendicularmente a la cara delantera y es refractada en la cara trasera. El ángulo entre las caras es de  $30,0^\circ$ . Si el índice de refracción del vidrio es  $n_A = 1,525$  para la luz azul ( $\lambda = 450 \text{ nm}$ ) y  $n_R = 1,512$  para luz roja ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ) ¿cuál es el ángulo entre la luz roja y la luz azul después de pasar por el prisma?

Por la ley de Snell:  $n_{\text{vidrio}} \sin \theta_1 = n_{\text{aire}} \sin \theta_2 = \sin \theta_2$   
Para todos los colores, el ángulo de incidencia desde el vidrio vale  $\theta_1 = 30,0^\circ$

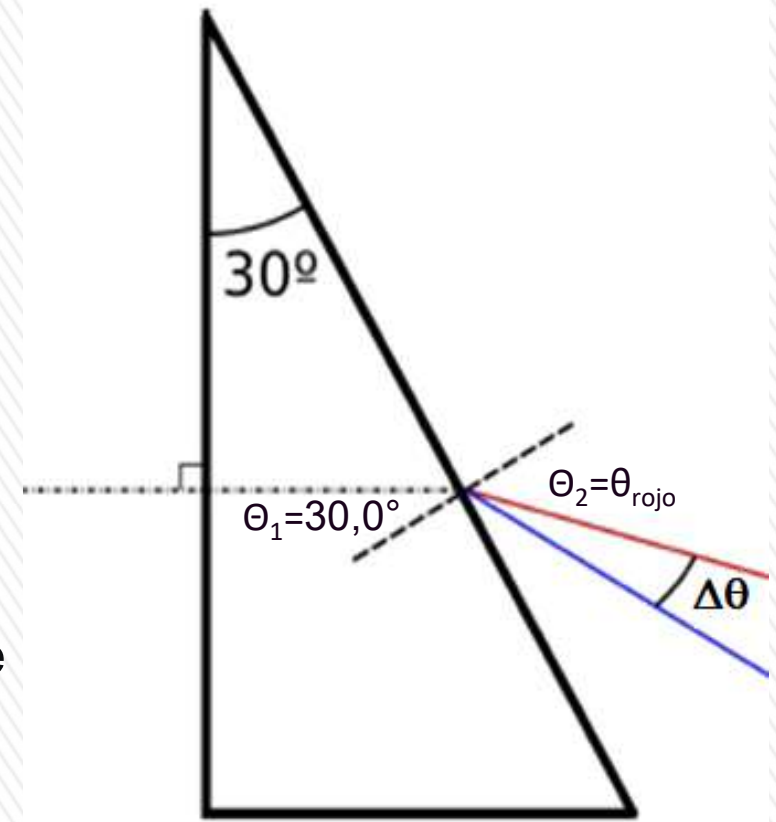
Para c/u de los colores se cumple:

$$\theta_{\text{rojo}} = \sin^{-1}(n_{\text{rojo}} \sin \theta_1) = \sin^{-1}(n_{\text{rojo}} \sin 30,0^\circ) = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{rojo}})$$

$$\theta_{\text{rojo}} = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{rojo}}) = \sin^{-1}(0,500 \times 1,512) = 49,1128^\circ$$

$$\theta_{\text{azul}} = \sin^{-1}(0,500 \times n_{\text{azul}}) = \sin^{-1}(0,500 \times 1,525) = 49,6851^\circ$$

$$\Delta\theta = 0,572^\circ$$





# Reflexión en una superficie plana

**Espejo plano:** P y P' están a la misma distancia del espejo, y s y s' tienen igual magnitud.

El punto de imagen P' está situado exactamente en posición opuesta al punto del objeto P.

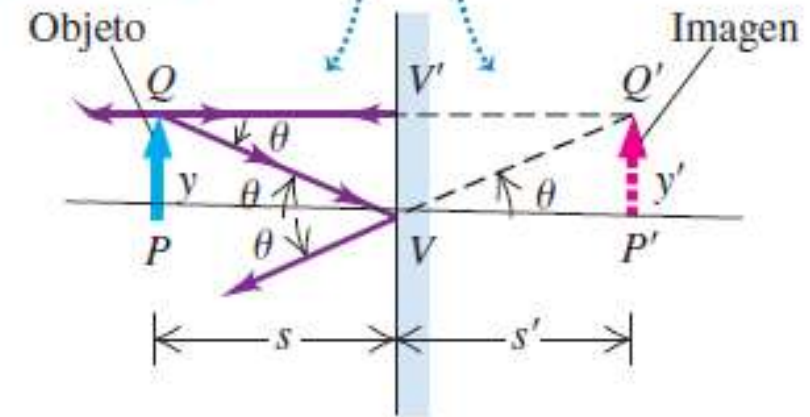
$y = y'$ .

**Aumento lateral m**

$$m = \frac{y'}{y} \quad (\text{aumento lateral})$$

Imagen de un espejo plano siempre es virtual, derecha y del mismo tamaño que el objeto.

Para un espejo plano,  $PQV$  y  $P'Q'V$  son congruentes, así que  $y = y'$  y el objeto y la imagen tienen el mismo tamaño (el aumento lateral es 1).



**Reglas de signos:** Para todas las superficies reflectantes y refractivas tanto planas como esféricas.

**1-Regla de signos para distancia de objeto:**  $s > 0$  cuando el objeto está del lado entrante de la luz a la superficie (**objeto real**);  $s < 0$  en caso contrario (objeto virtual).

**2. Regla de signos para la distancia de imagen:**  $s' > 0$  cuando la imagen está del lado que la luz saliente de la superficie (**imagen real**);  $s' < 0$  en caso contrario (imagen virtual).

**3. Regla de signos para el radio de curvatura de una superficie esférica:**  $R > 0$  cuando el centro de curvatura está del lado saliente de la luz de la superficie;  $R < 0$  en caso contrario.

**4. Regla del aumento lateral:**  $m > 0$  cuando la imagen es derecha;  $m < 0$  cuando es invertida.

# Reflexión en superficies esféricas

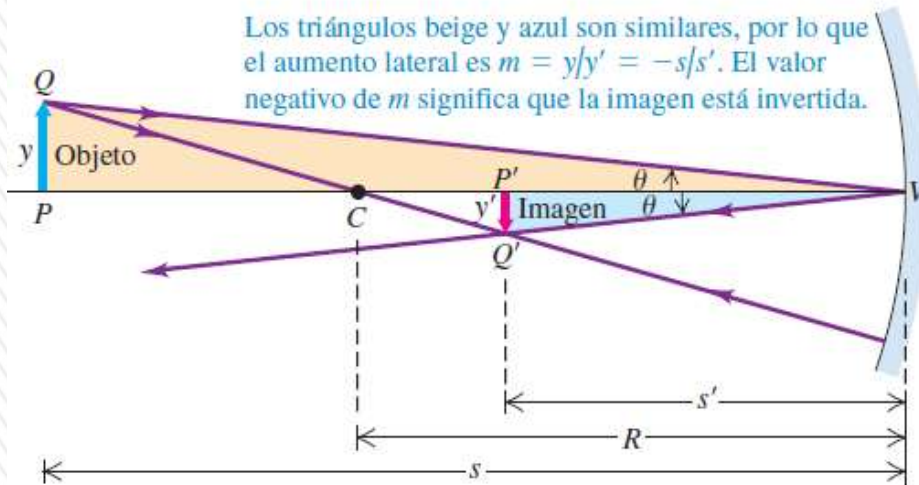
## Espejo cóncavo

Espejo esférico con radio de curvatura  $R$ , con su lado cóncavo hacia luz incidente.

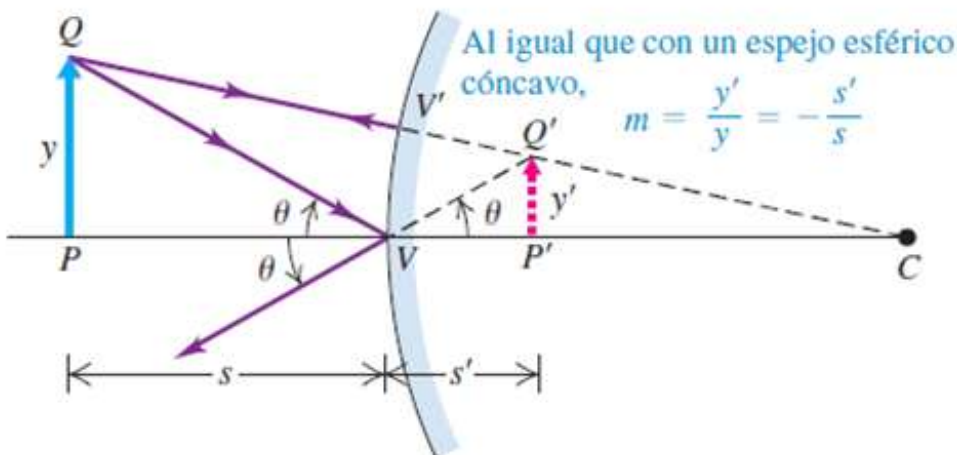
$C$  - centro de curvatura de la superficie

$V$  - vértice del espejo

Recta  $CV$ : eje óptico.



b) Construcción para determinar el aumento de una imagen formada por un espejo convexo



El punto  $F$  donde los rayos paralelos incidentes convergen (en los cóncavos) se llama **punto focal** o **foco** y la distancia del vértice al punto focal, que se indica con  **$f$** , recibe el nombre de **distancia focal**:

$f$  se relaciona con el radio de curvatura  $R$ :

**$f = R/2$  (ver figura siguiente diapositiva)**

## Espejo convexo

**Espejos esféricos: relación entre distancias de objeto ( $s$ ) y de imagen ( $s'$ )**

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

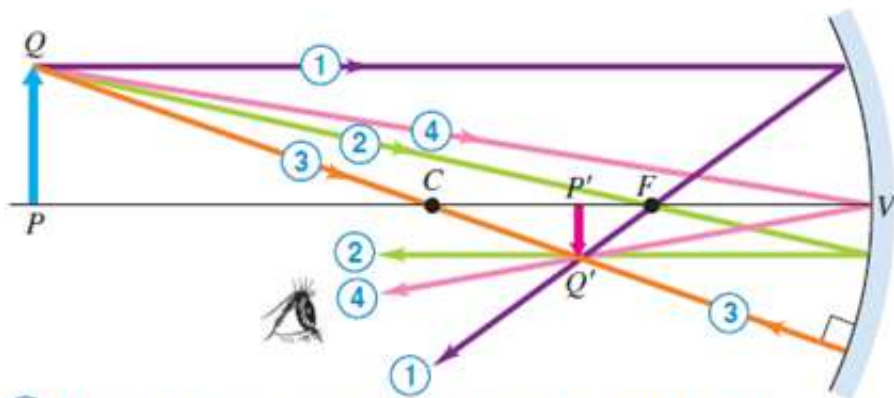
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$



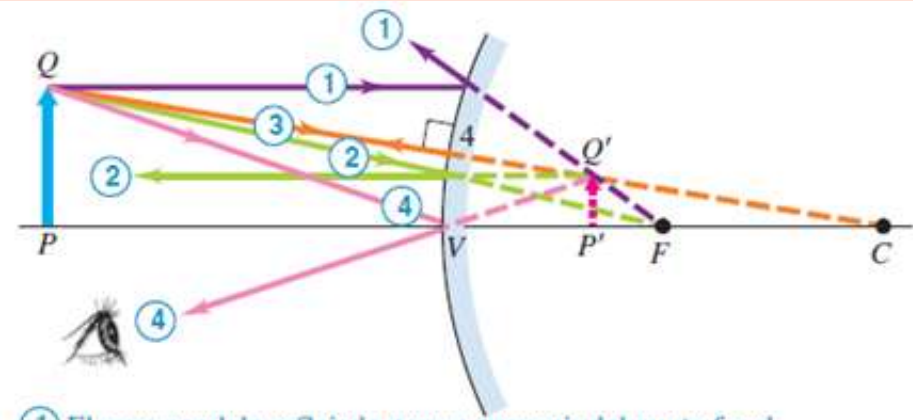
# Métodos gráficos para espejos esféricos

Se elige un punto del objeto que no esté sobre el eje óptico. Se pueden trazar 4 rayos (**rayos principales**) que por lo general se dibujan con facilidad.

1. Un rayo paralelo al eje, después de reflejarse, pasa por el punto focal  $F$  de un espejo cóncavo o parece provenir del punto focal (virtual) de un espejo convexo.
2. Un rayo que pasa por el punto focal  $F$  (o que avanza hacia este) se refleja paralelamente al eje.
3. Un rayo a lo largo del radio que pasa por el centro de curvatura  $C$ , o se aleja de él, interseca la superficie en dirección normal y se refleja de regreso por su trayectoria original.
4. Un rayo que incide en el vértice  $V$  se refleja, formando ángulos iguales con el eje óptico.



- ① El rayo paralelo al eje se refleja a través del punto focal.
- ② El rayo que pasa por el punto focal se refleja paralelo al eje.
- ③ El rayo que pasa por el centro de curvatura interseca la superficie en dirección normal y se refleja a lo largo de su trayectoria original.
- ④ El rayo hacia el vértice se refleja simétricamente tomando como base el eje óptico.



- ① El rayo paralelo reflejado parece provenir del punto focal.
- ② El rayo hacia el punto focal se refleja paralelo al eje.
- ③ Al igual que con el espejo cóncavo: el rayo radial al centro de curvatura interseca la superficie en dirección normal y se refleja a lo largo de su trayectoria original.
- ④ Al igual que con el espejo cóncavo, el rayo hacia el vértice se refleja simétricamente tomando como base el eje óptico.

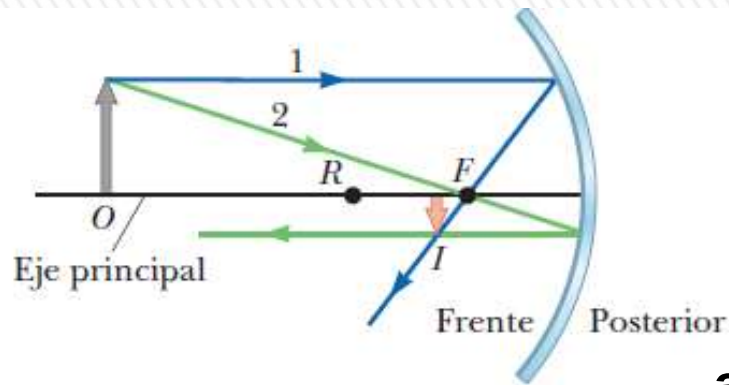
# Espejos esféricos

Ecuación de formación de imágenes:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$f = R/2$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$



a

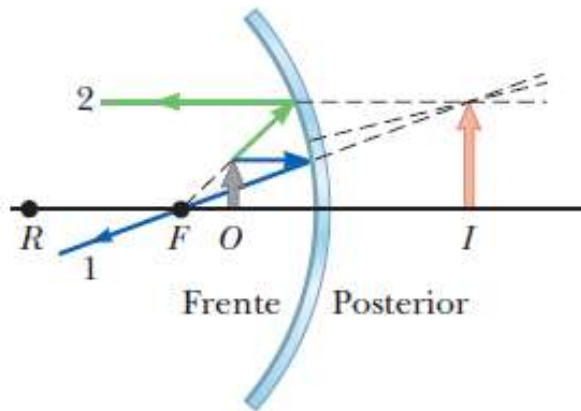
## Espejo cóncavo

$$f > 0; s > 0;$$

a)  $s > f$  Imagen de un espejo cóncavo es real e invertida .

Si  $f < s < R$  La imagen es más grande que el objeto

Si  $s > R$  la imagen es más pequeña que el objeto.



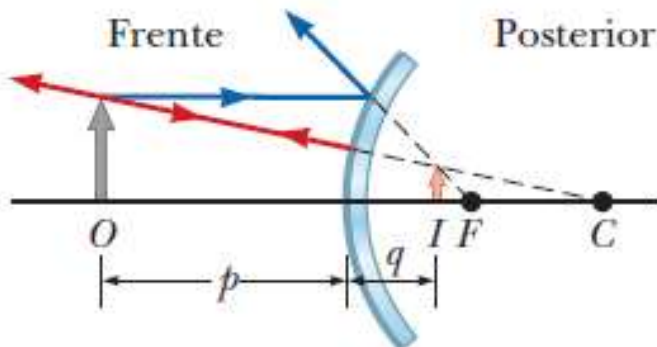
b

b)  $s < f$  Imagen de un espejo cóncavo es virtual, derecha y más grande que el objeto cuando

## Espejo convexo

$$f < 0; s > 0;$$

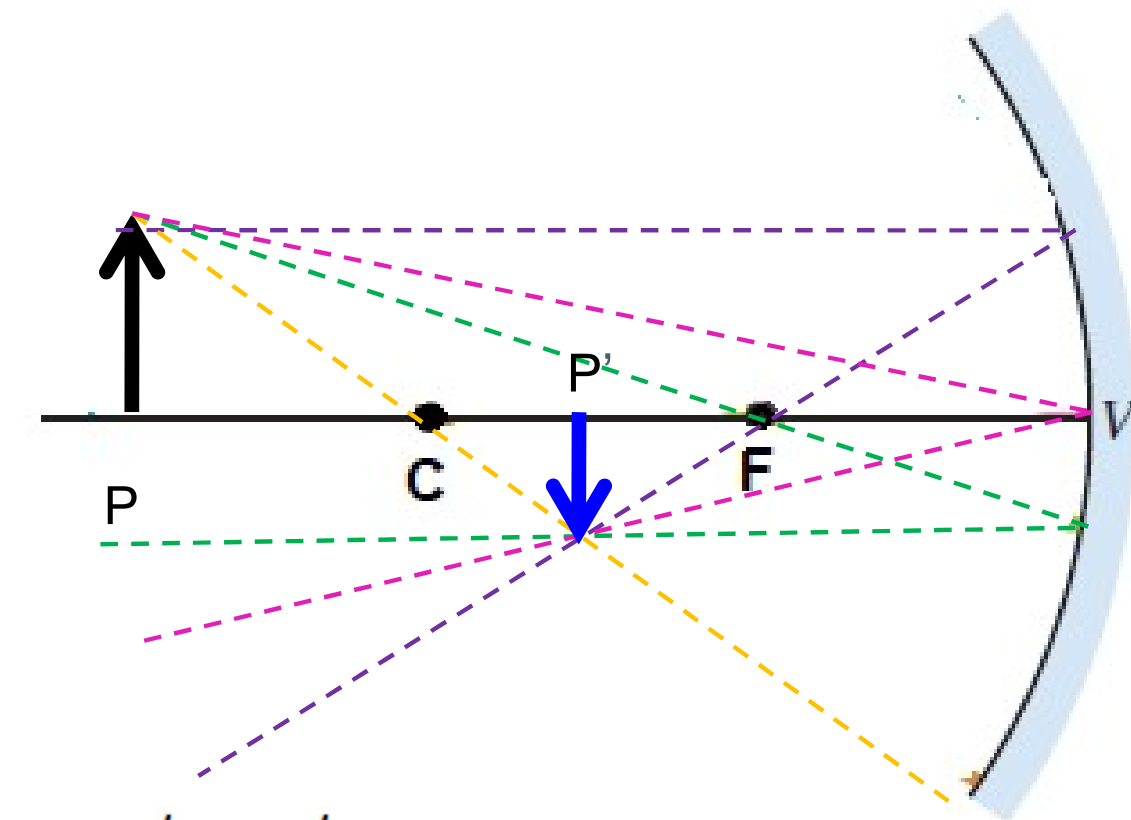
La imagen de un espejo convexo siempre es virtual, derecha y detrás del espejo.





## Ejemplo: Espejo cóncavo con diferentes distancias del objeto

Un espejo cóncavo tiene un radio de curvatura con un valor absoluto de 20 cm. Encuentre por medios gráficos la imagen de un objeto en forma de una flecha perpendicular al eje del espejo a cada una de las siguientes distancias de objeto: 30 cm, Compruebe la construcción calculando el tamaño y el aumento lateral de cada imagen.



$$R = +20 \text{ cm} ; s = +30 \text{ cm}$$

$$y = 8,0 \text{ cm}$$

$$f = R/2 = +10 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{30} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{10}$$

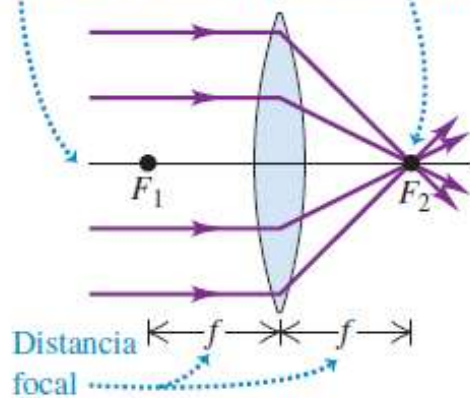
$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{10} - \frac{1}{30} = \frac{2}{30} = \frac{1}{15}$$

$$s' = 15 \text{ cm (P'V)}$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \quad m = -\frac{s'}{s} = -\frac{15}{30} = -0,50 \quad y' = my = (-0,50)(8,0) = -4,0 \text{ cm}$$

# LENTES DELGADAS

Eje óptico (pasa por los centros de curvatura de ambas superficies de la lente).  
Segundo punto focal: el punto en que convergen los rayos paralelos entrantes.



- Medida a partir del centro de la lente
- Siempre es la misma a ambos lados de la lente
- Es positiva para una lente convergente delgada

Lente: sistema óptico con dos superficies refractivas.

**lente delgada:** dos superficies esféricas de espesor despreciable.

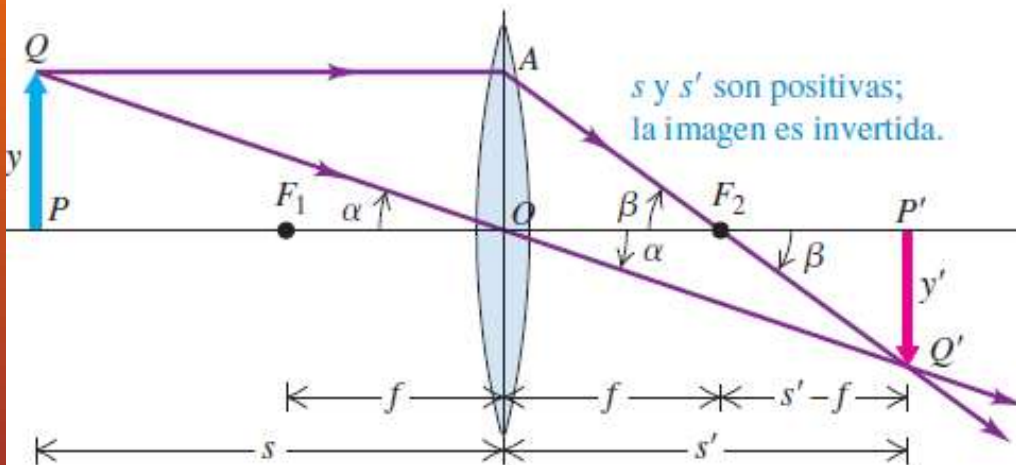
**lente convergente:** un haz de rayos paralelos al eje, converjan en un punto  $F_2$  y forman una imagen real en ese punto, los rayos que pasan por el punto  $F_1$  emergen de la lente en forma de un haz de rayos paralelos.

$F_1$  y  $F_2$  son los puntos y la distancia  $f$  (medida desde el centro de la lente) es la **distancia focal  $f$** .

**$f > 0$**  lente convergente.

Centros de curvatura de las dos superficies esféricas se encuentran sobre el eje óptico, las dos distancias focales siempre son iguales.

**relación objeto-imagen, lente delgada**



$s$  y  $s'$  son positivas;  
la imagen es invertida.

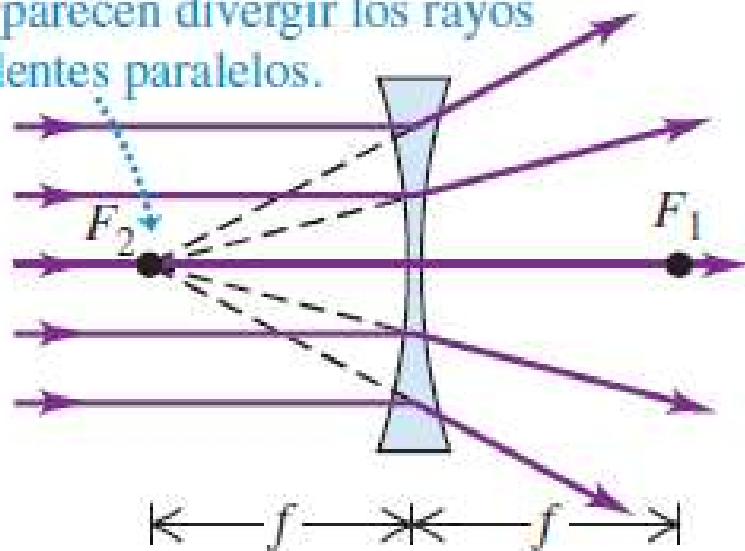
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$



# LENTES DELGADAS

Segundo punto focal: el punto a partir del cual parecen divergir los rayos incidentes paralelos.

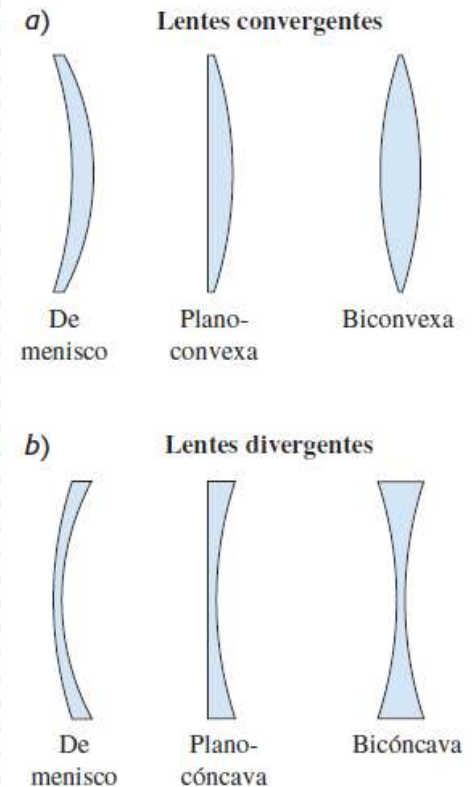


**Lente divergente:** El haz de rayos paralelos que incide en esta lente diverge después de refractarse. La distancia focal de una lente divergente es una cantidad negativa.

La potencia de una lente es el recíproco de su distancia focal expresada en metros, y se expresa en **dioptrías**.

## Tipos de lentes convergentes y divergentes.

Toda lente que sea más gruesa en su centro que en sus bordes es una **lente convergente con  $f$  positiva**; y toda lente que sea más gruesa en sus bordes que en su centro es una **lente divergente con  $f$  negativa**.



# LENTES

La distancia focal de una lente se relaciona con su índice de refracción  $n$  y con los radios de curvatura  $R_1$  y  $R_2$  de sus superficies en un medio de índice de refracción 1 ( $n_{\text{aire}}$ ) es la denominada **ecuación del constructor de lentes**:

Se puede ver con esta ecuación cuando una lente es convergente (distancias focales positivas) o divergente (distancias focales negativas).

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

## Convenios de signos:

- 1) Se dibujan los diagramas en los que luz procede siempre desde la izquierda.
- 2) El radio de curvatura de la superficie de una lente es positivo si su centro de curvatura se halla a la derecha de la lente, y negativo si su centro se halla a la izquierda.
- 3)  $R_1$  se refiere a la primera superficie o superficie de la izquierda y  $R_2$  a la segunda o superficie de la derecha.
- 4) Una superficie plana puede considerarse como parte de una esfera de radio infinito.

**Si la lente está sumergida en algo diferente del aire, puede utilizar esta misma ecuación, interpretando  $n$  como la relación del índice de refracción del material de la lente con el fluido que la rodea.**

**Por ejemplo, para una lente sumergida en agua:**

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



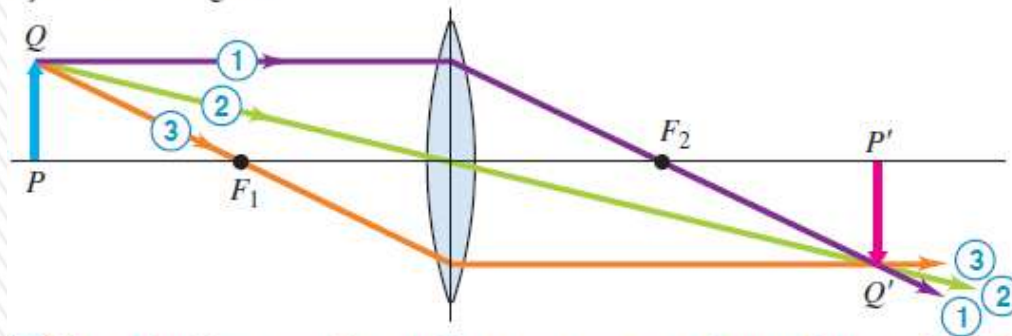
# Métodos gráficos para lentes delgadas

La posición y tamaño de una imagen formada por una lente delgada se puede encontrar usando un método gráfico mediante tres rayos principales.

Al utilizar este método gráfico, consideraremos que la desviación de cada rayo ocurre en su totalidad en el plano medio de la lente.

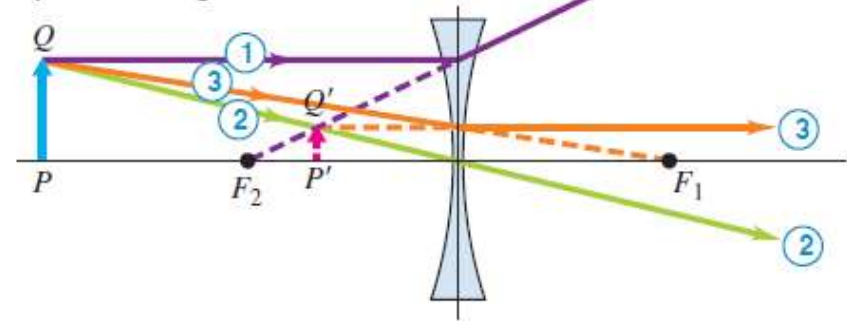
1. Un **rayo paralelo al eje** emerge de la lente en una dirección que pasa por el segundo foco  $F_2$  de una lente convergente, o que parece provenir del segundo foco de una lente divergente.
2. Un **rayo que pasa por el centro de la lente** no se desvía en grado apreciable; en el centro de la lente las dos superficies son paralelas; por lo tanto, este rayo emerge prácticamente con el mismo ángulo que tenía al entrar y a lo largo de la misma recta.
3. Un **rayo que pasa por el primer punto focal  $F_1$  (o avanza hacia este)** emerge paralelo al eje.

a) Lente convergente



- ① El rayo incidente paralelo se refracta para pasar por el segundo punto focal  $F_2$ .
- ② El rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía considerablemente.
- ③ El rayo que pasa por el primer punto focal  $F_1$  emerge paralelo al eje.

b) Lente divergente



- ① Después de refractarse, parece que el rayo incidente paralelo proviene del segundo punto focal  $F_2$ .
- ② El rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía considerablemente.
- ③ El rayo que apunta al primer punto focal  $F_1$  emerge paralelo al eje.

# Métodos gráficos para lentes delgadas

Cuando la **imagen** es **real**, la imagen está **determinada por la intersección de dos cualesquiera de los rayos 1, 2 y 3**, cuando la **imagen** es **virtual**, se **prolongan hacia atrás los rayos salientes divergentes**, hasta su punto de intersección para encontrar el punto de imagen.

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

**Convención:** los rayos de luz vienen desde la izquierda

**Objetos reales:** están **a la izquierda de la lente** e **imágenes reales** a la derecha, **Imágenes virtuales** están **a la izquierda de la lente** y **objetos virtuales** a su derecha.

Para aplicar las expresiones algebraicas hay que seguir el siguiente convenio de signos:

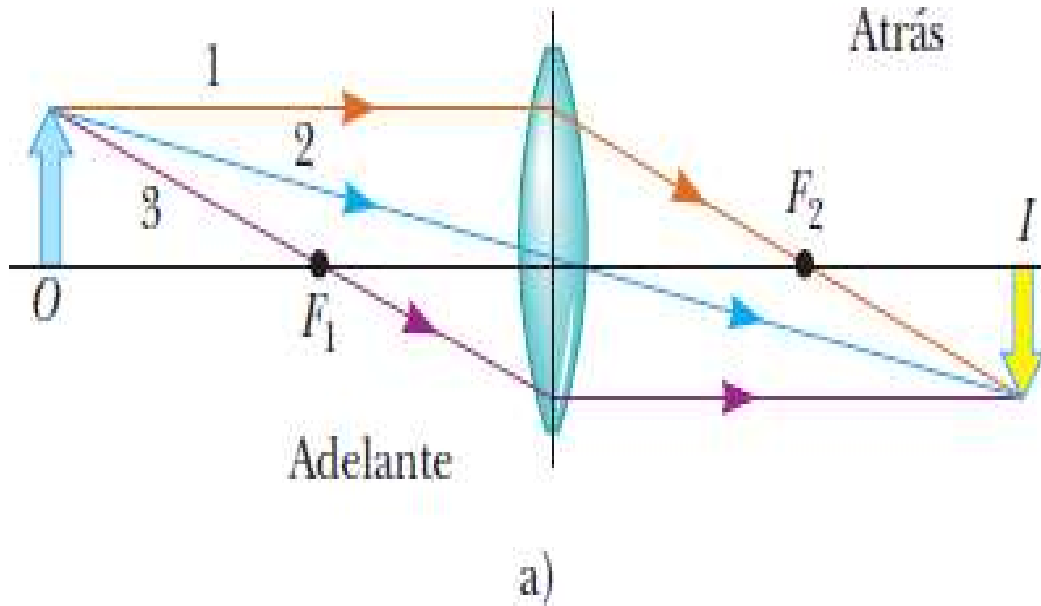
1. **s** es **positiva** para un **objeto real** y negativa para un objeto virtual.
2. **s'** es **positiva** para una **imagen real** y negativa para una imagen virtual.
3. El **tamaño del objeto y** es **positivo** si está por **arriba del eje** y negativo si está por debajo del mismo.
4. El **tamaño de la imagen y'** es **positivo** si está por **arriba del eje** y negativo si está por debajo del mismo.



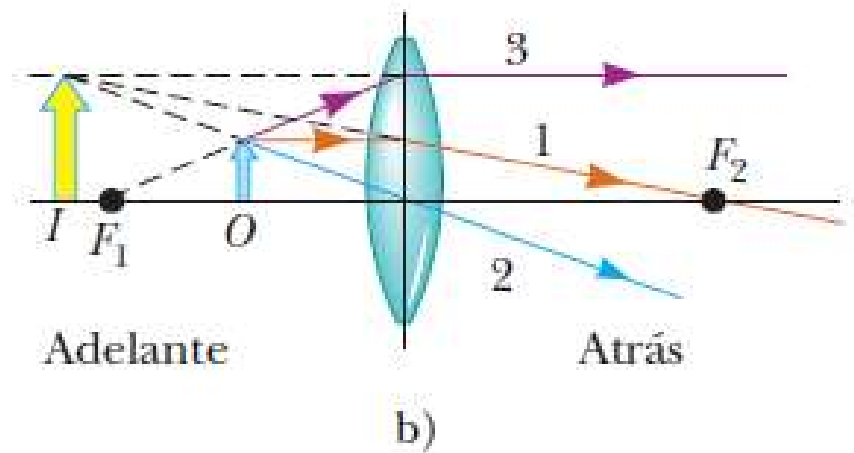
# FORMACIÓN DE IMÁGENES

## Lente convergente

### Objeto delante del foco



### Objeto entre foco y lente



b) Imagen virtual, vertical y mayor que el objeto y aparece en la cara frontal de la lente

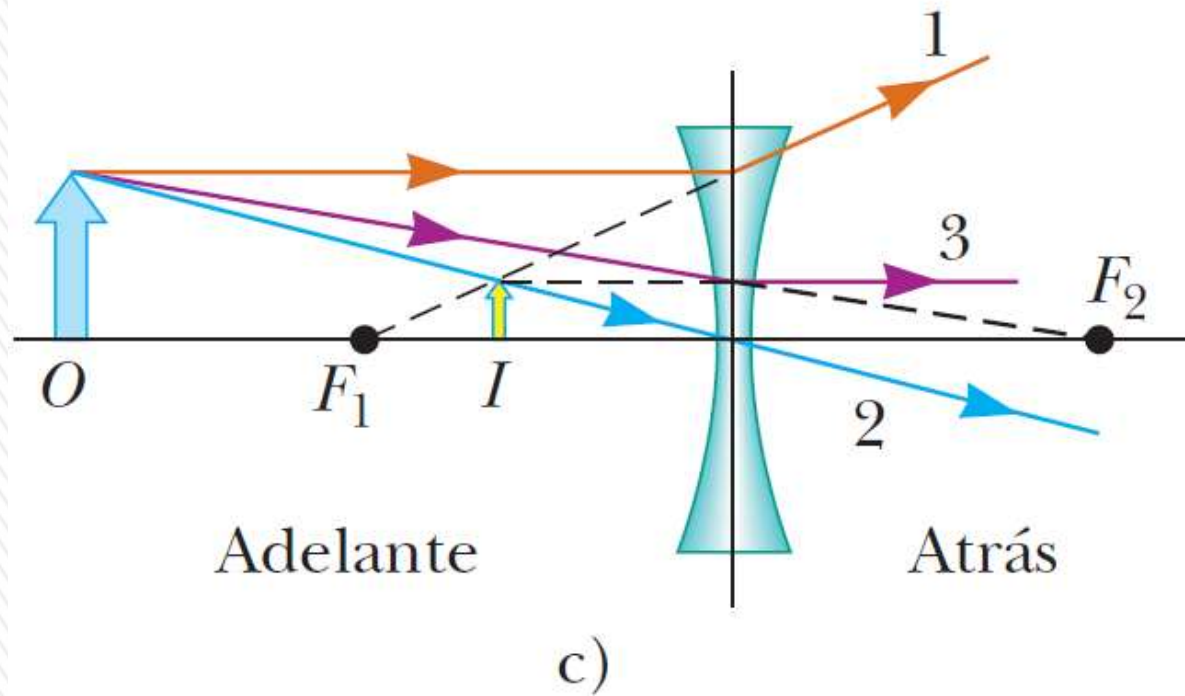
a) Imagen real, invertida y en la cara posterior de la lente.

El rayo 1, se dibuja paralelo al eje principal. Una vez refractado por la lente, este rayo pasa a través del foco en la cara posterior de la lente.

El rayo 2, se dibuja a través del centro de la lente y sigue en línea recta.

El rayo 3, se dibuja a través del foco en la cara frontal de la lente (o como si saliera del foco en el caso de que  $p < f$ ) y emerge de esta paralelo al eje principal.

# FORMACIÓN DE IMÁGENES



Rayo 1: se dibuja paralelo al eje principal. Después de ser refractado por la lente, emerge alejándose desde el foco  $F_1$  en la cara frontal de la lente.

Rayo 2: se dibuja a través del centro de la lente y continúa en línea recta.

Rayo 3: se dibuja en la dirección hacia el foco en la cara posterior de la lente y emerge de ésta paralelo al eje principal.

c) Cuando un objeto está en cualquier sitio por delante de una lente divergente, la imagen es virtual, vertical y menor que el objeto y en la cara frontal de la lente.

Para las tres posiciones del objeto (delante, en el foco o atrás), la posición de imagen es negativa y el aumento es un número positivo menor que 1, lo que confirma que: **imagen es virtual, menor que el objeto y vertical**



## Ejemplo: ejercicio 5.10.a

a) La distancia focal de una lente convergente es de 20,0 cm. Un objeto se coloca a 8,00 cm de la lente. ¿Dónde se encuentra la imagen del objeto? ¿Cuál es el aumento?

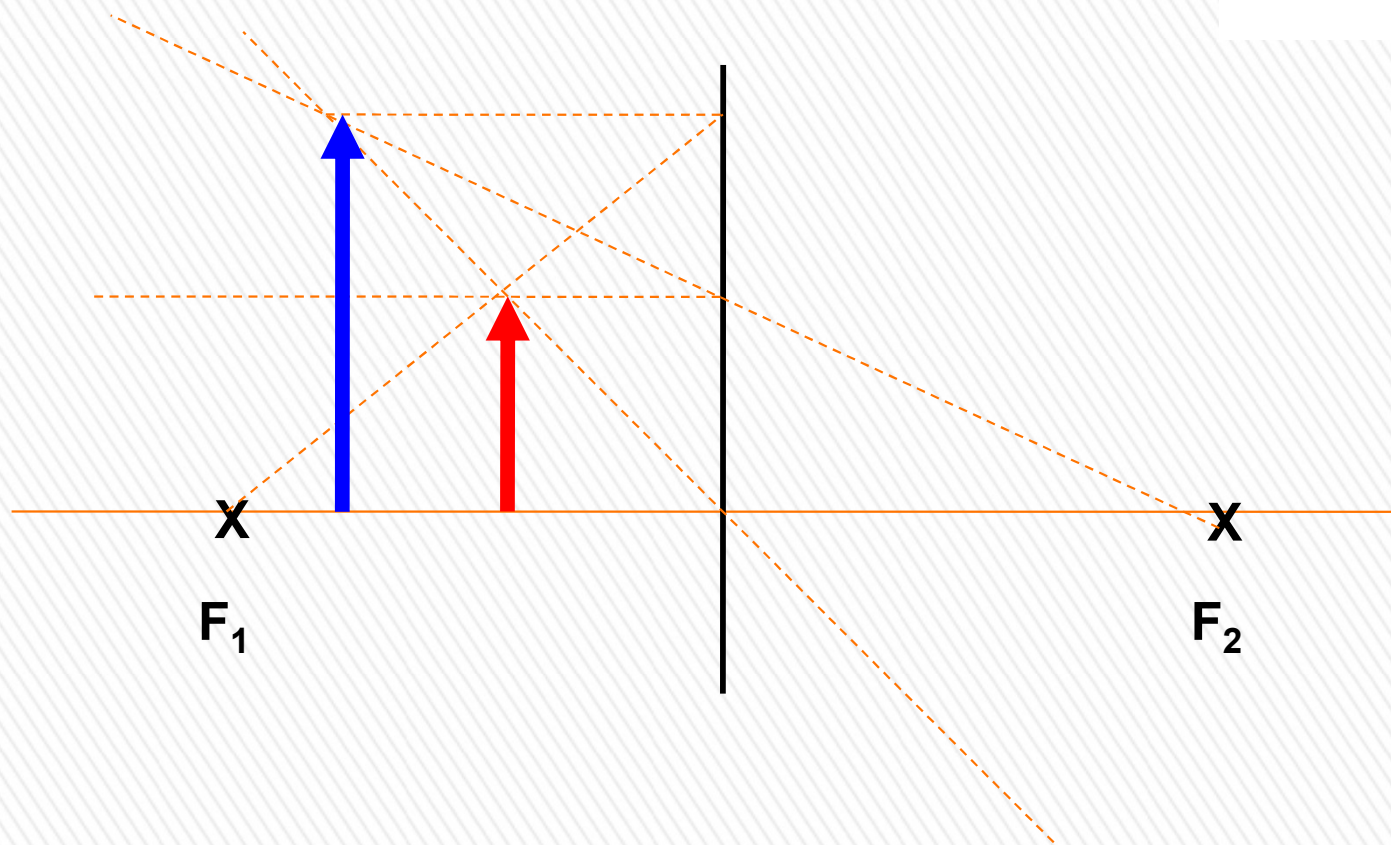
$$f = 20,0 \text{ cm} \quad s = 8,00 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} = \frac{s - f}{s \cdot f}$$

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f} = \frac{(8,00) \times (20,0)}{(8,00) - (20,0)} = -\frac{160}{12,0} = -13,3 \text{ cm}$$

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{(-13,3)}{8,00} = 1,67$$



La imagen es virtual, derecha y aumentada en un factor de 1,67. Se encuentra en  $s' = -13,3 \text{ cm}$  (delante de la lente). El aumento es de 1,67.

