

Física II

Tercera parte: Óptica

Dr. Mario Enrique Álvarez Ramos(Responsable)

Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

Dr. Ezequiel Rodríguez Jáuregui

Dr. Santos Jesús Castillo

Webpage: <http://paginas.fisica.uson.mx/qb>

©2017 Departamento de Física

Universidad de Sonora

Tema 10: Óptica geométrica.

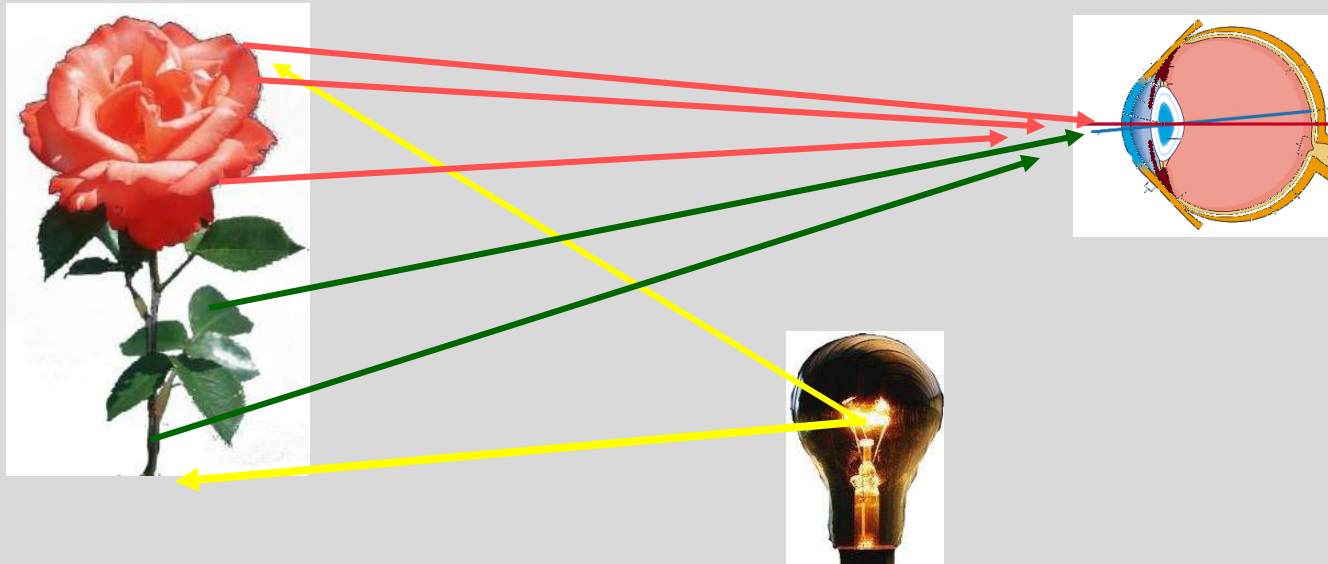
- i. Reflexión en superficies planas y esféricas.
- ii. Imágenes formadas por espejos esféricos.
- iii. Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.
- iv. Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.
- v. Instrumentos ópticos: El ojo humano, la cámara fotográfica, el microscopio, etc.

Óptica Geométrica y Óptica Física

- La **Óptica Física** tiene en cuenta el carácter ondulatorio de la luz y es necesaria para explicar fenómenos como son las interferencias y la difracción de la luz.
- La **Óptica Geométrica** no tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz y la representa o considera como un haz de rayos. Es una aproximación válida siempre que la longitud de onda de la luz es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos o discontinuidades a través de los cuales se propaga.

Principios de la Óptica Geométrica

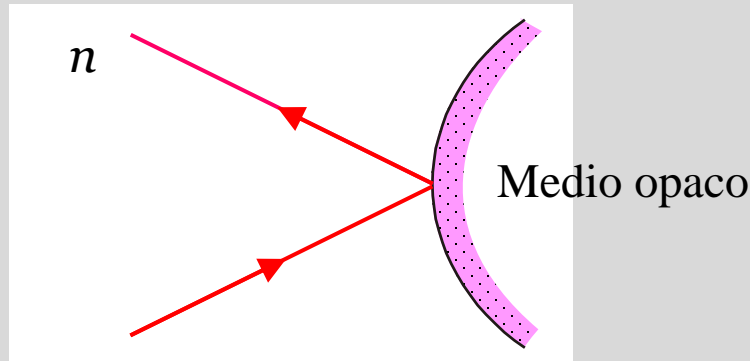
1. Trayectorias rectilíneas en medios homogéneos e isótropos.
2. Se cumple la ley de la reflexión
3. Se cumple la ley de la refracción
4. Rayo incidente, refractado y reflejado están en un mismo plano.
5. Las trayectorias de la luz son reversibles.



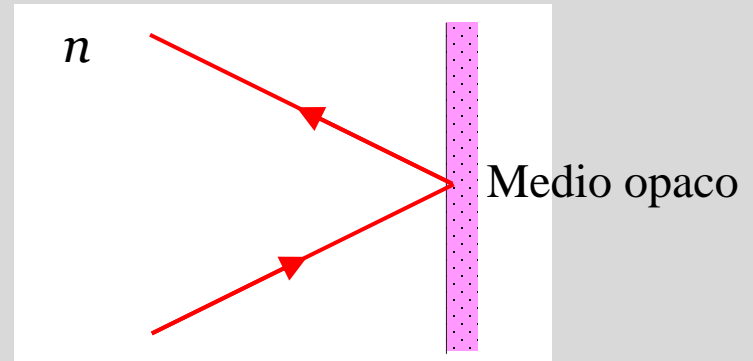
Para observar las cosas la los rayos de luz se reflejan en los objetos y son detectados por los ojos, cámaras etc

Elementos básicos

Espejo. Cuando la superficie límite de un medio es totalmente reflejante constituye un espejo. **Solamente se presenta el fenómeno de reflexión.**

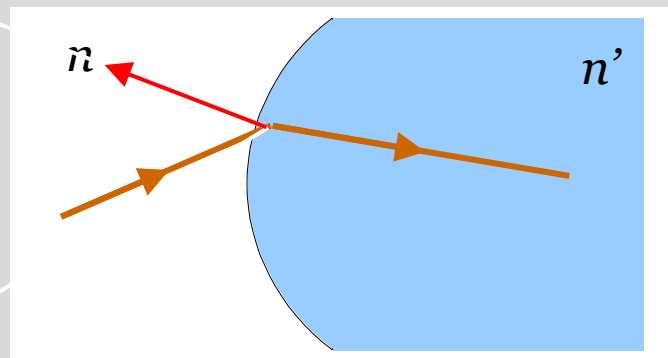


Espejo esférico

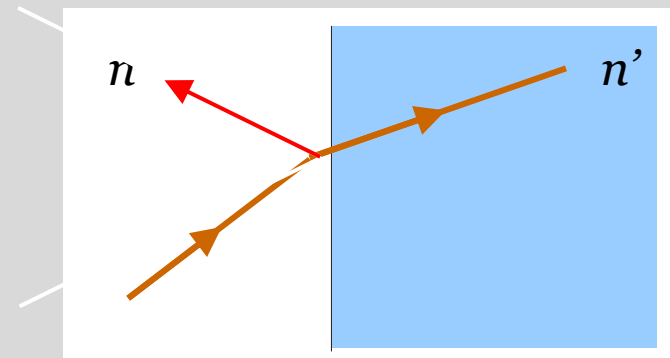


Espejo plano

Dioptrio. Formado por dos medios de distinto índice de refracción con una superficie de separación perfectamente definida **Se presenta el fenómeno de reflexión y refracción**



Dioptrio esférico



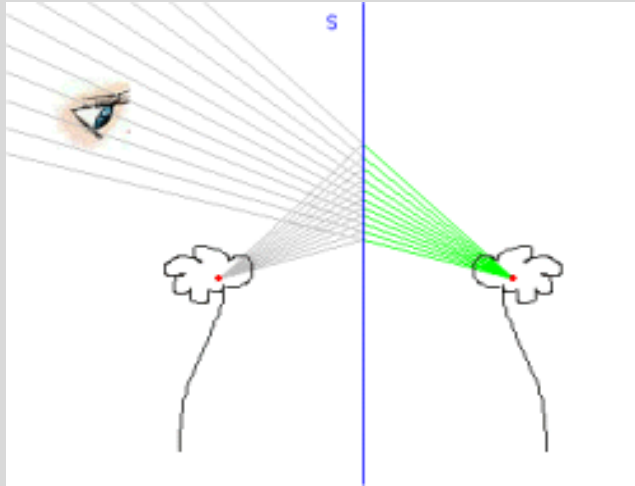
Dioptrio plano

Formación de imágenes por reflexión



Espejos planos

Un espejo plano es una superficie plana muy pulida que puede reflejar la luz que le llega con una capacidad reflectora de la intensidad de la luz incidente del 95%



Los espejos planos se utilizan con mucha frecuencia. Son los que usamos cada mañana para mirarnos. En ellos vemos nuestro reflejo, una imagen que no está distorsionada.



¿Cómo se hacen?

Los espejos comunes y corrientes son placas de vidrio plateadas. Para construir un espejo se limpia muy bien un vidrio y sobre él se deposita plata metálica por reducción del ión plata contenido en una disolución amoniacal de nitrato de plata. Después se cubre esta capa de plata con una capa de pintura protectora .

¿Qué imágenes dan?

Una imagen en un espejo se ve como si el objeto estuviera detrás y no frente a éste ni en la superficie.

La imagen obtenida en un espejo plano no se puede proyectar sobre una pantalla, colocando una pantalla donde parece estar la imagen no recogería nada. Es, por lo tanto **virtual**, una copia del objeto "que parece estar" detrás del espejo. El espejo sí puede reflejar la luz de un objeto y recogerse sobre una pantalla, pero esto no es lo que queremos decir cuando decimos que la imagen virtual no se recoge sobre una pantalla.

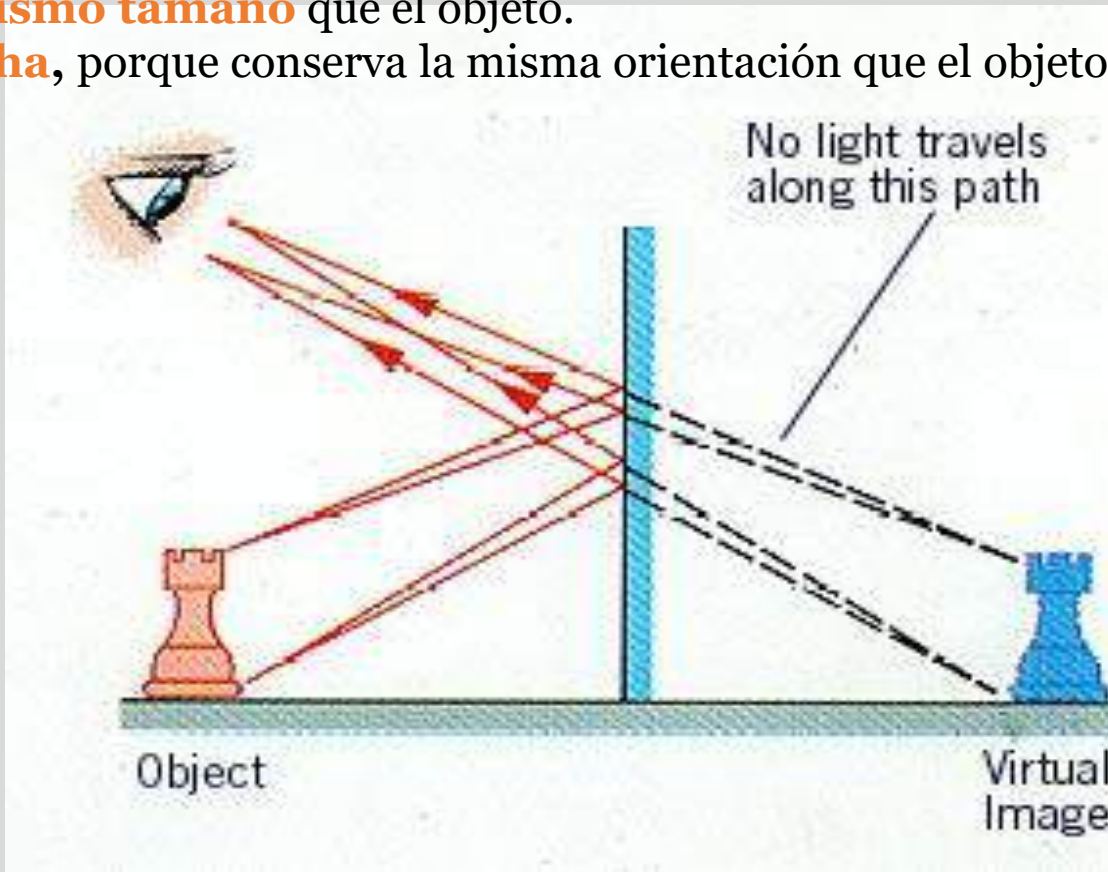
Características de la imagen formada en un espejo plano

Simétrica, porque aparentemente está a la misma distancia del espejo

Virtual, porque se ve como si estuviera dentro del espejo, no se puede formar sobre una pantalla pero puede ser vista cuando la enfocamos con los ojos.

Del mismo tamaño que el objeto.

Derecha, porque conserva la misma orientación que el objeto.



Reflexión de rayos de luz un espejo plano



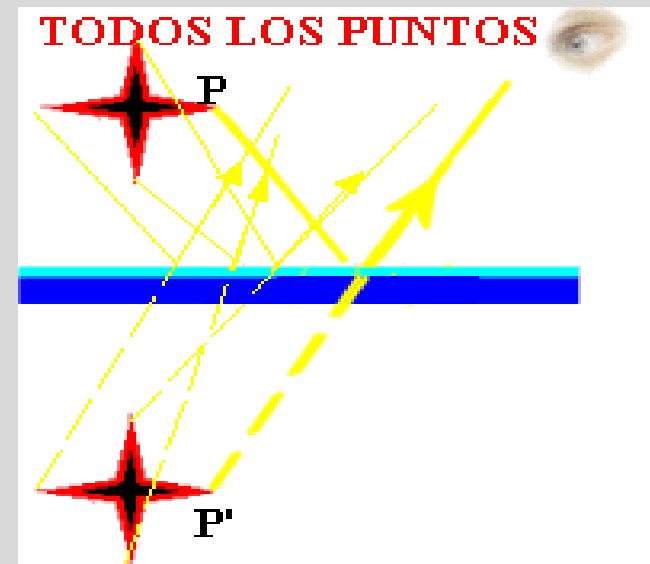
Formación de imágenes en un espejo plano

La formación de imágenes en los espejos son una consecuencia de la reflexión de los rayos luminosos en la superficie del espejo.

La óptica geométrica explica este familiar fenómeno suponiendo que los rayos luminosos cambian de dirección al llegar al espejo siguiendo las leyes de la reflexión.

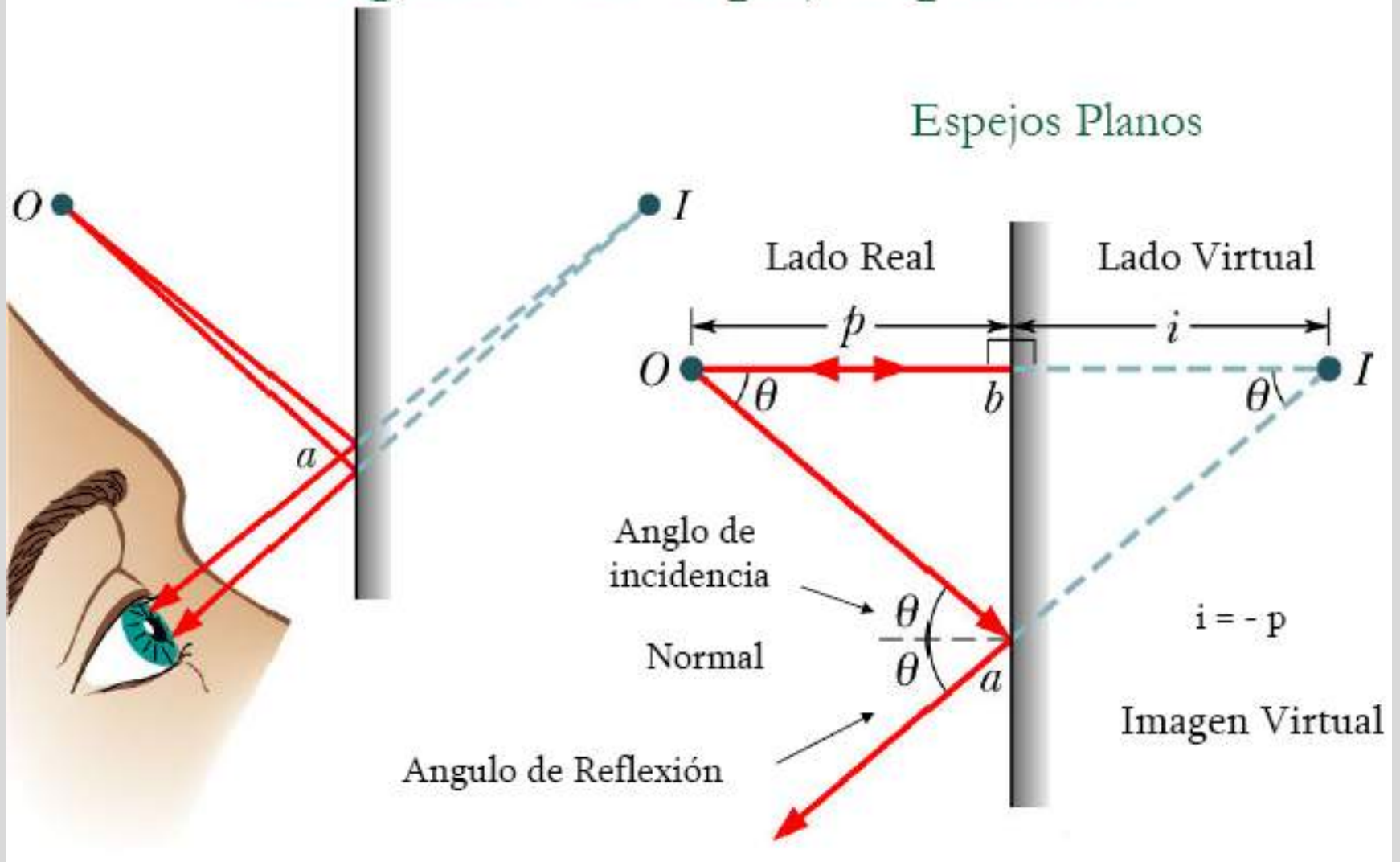
Suponiendo un punto **P**, que emite o refleja la luz, y que está situado frente a un espejo. En el contexto de la óptica geométrica, se dice que de este punto emergen rayos que se reflejan en el espejo (cumplen las leyes de la reflexión) y divergen.

El punto simétrico respecto al espejo es el punto imagen **P'**.



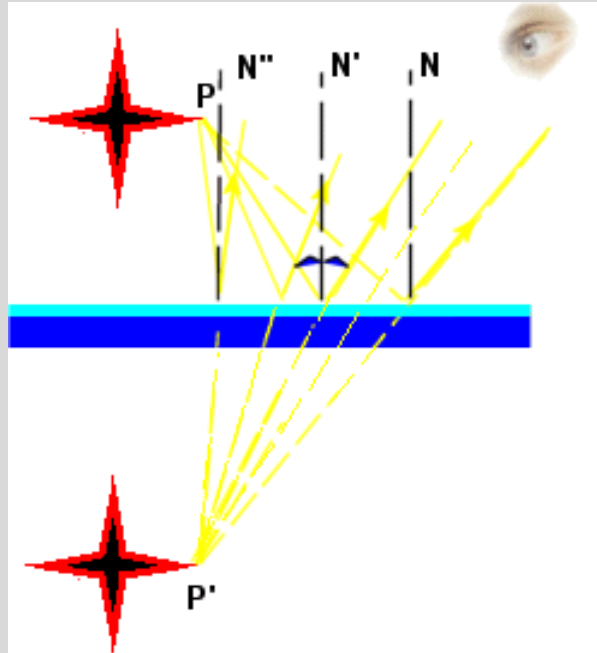
El ojo capta los rayos, y con la ayuda de la córnea y del cristalino (lentes), los hace converger en la retina. Al cerebro, al interpretarlos, **parecen** que le llegan todos los rayos desde un punto **P'** situado detrás del espejo.

Imágenes en espejos planos



Trazo de rayos

Para construir la trayectoria de los rayos procedemos de la siguiente manera:



Para cada punto del objeto hallamos su simétrico (**imagen**) respecto al espejo: del punto P obtenemos el punto P'.

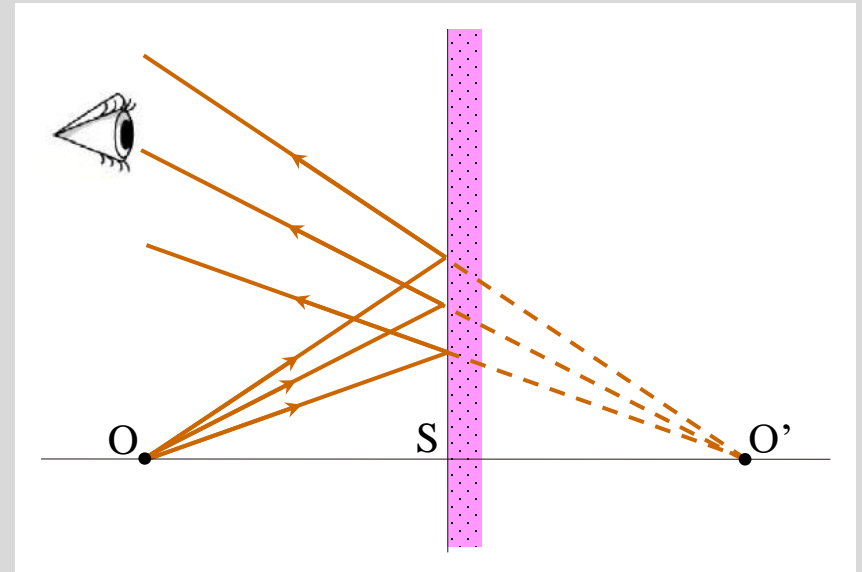
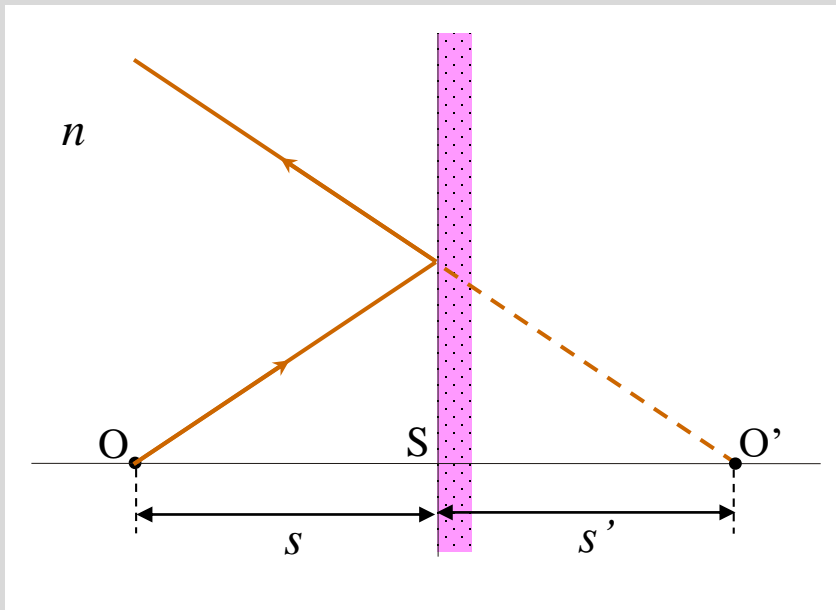
Trazamos rayos desde P hasta el espejo. Los rayos reflejados se obtienen prolongando la recta de unión de P' con el punto de impacto del rayo que va de P al espejo.

El rayo incidente y el rayo reflejado forman el mismo ángulo con la normal

Los rayos siguen, desde el objeto hasta el ojo el camino más corto, por lo que emplean un tiempo mínimo (Fermat). De la misma manera construimos imágenes de los demás puntos de un objeto material .

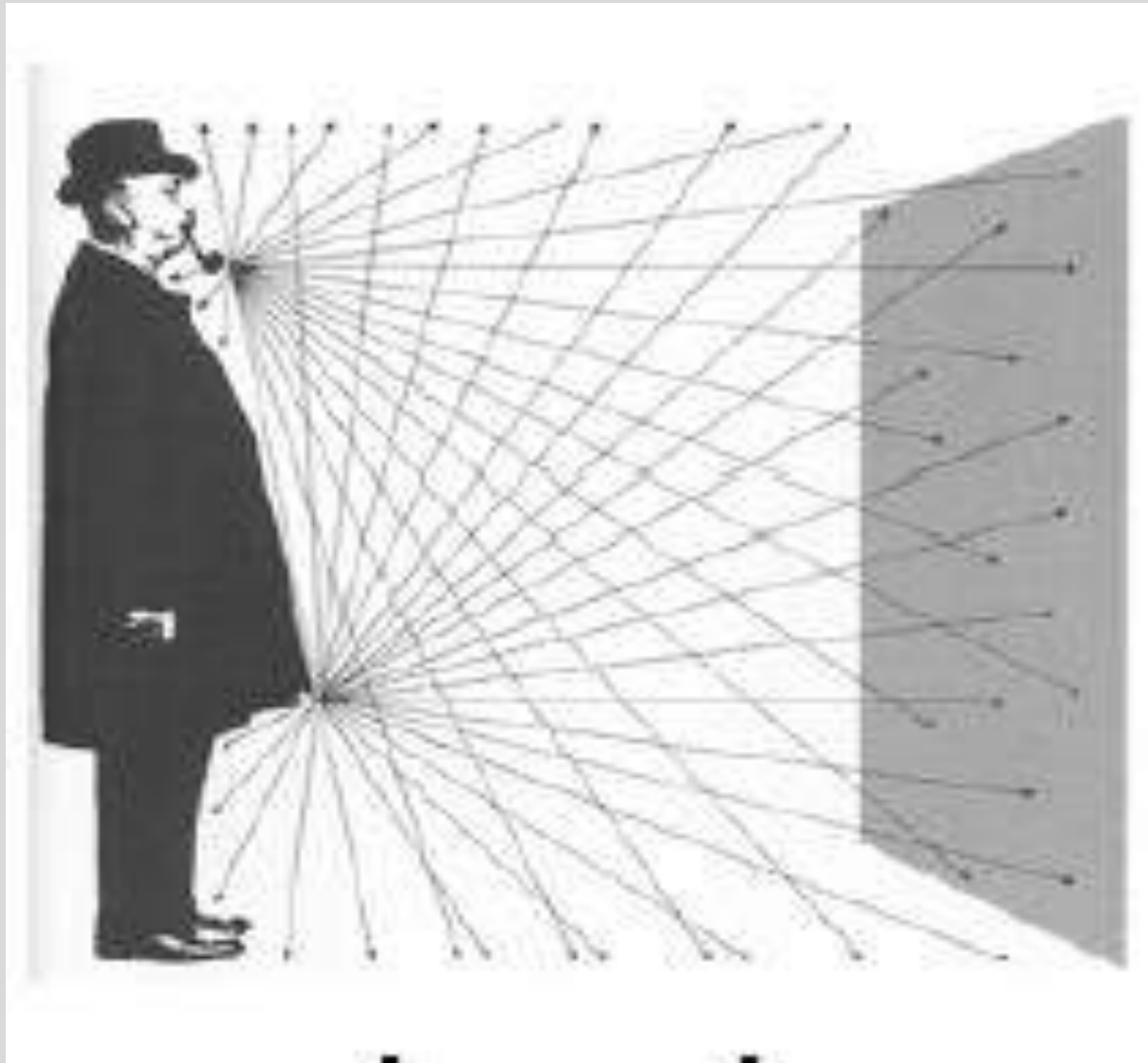
Relación entre puntos conjugados

$$s' = -s$$

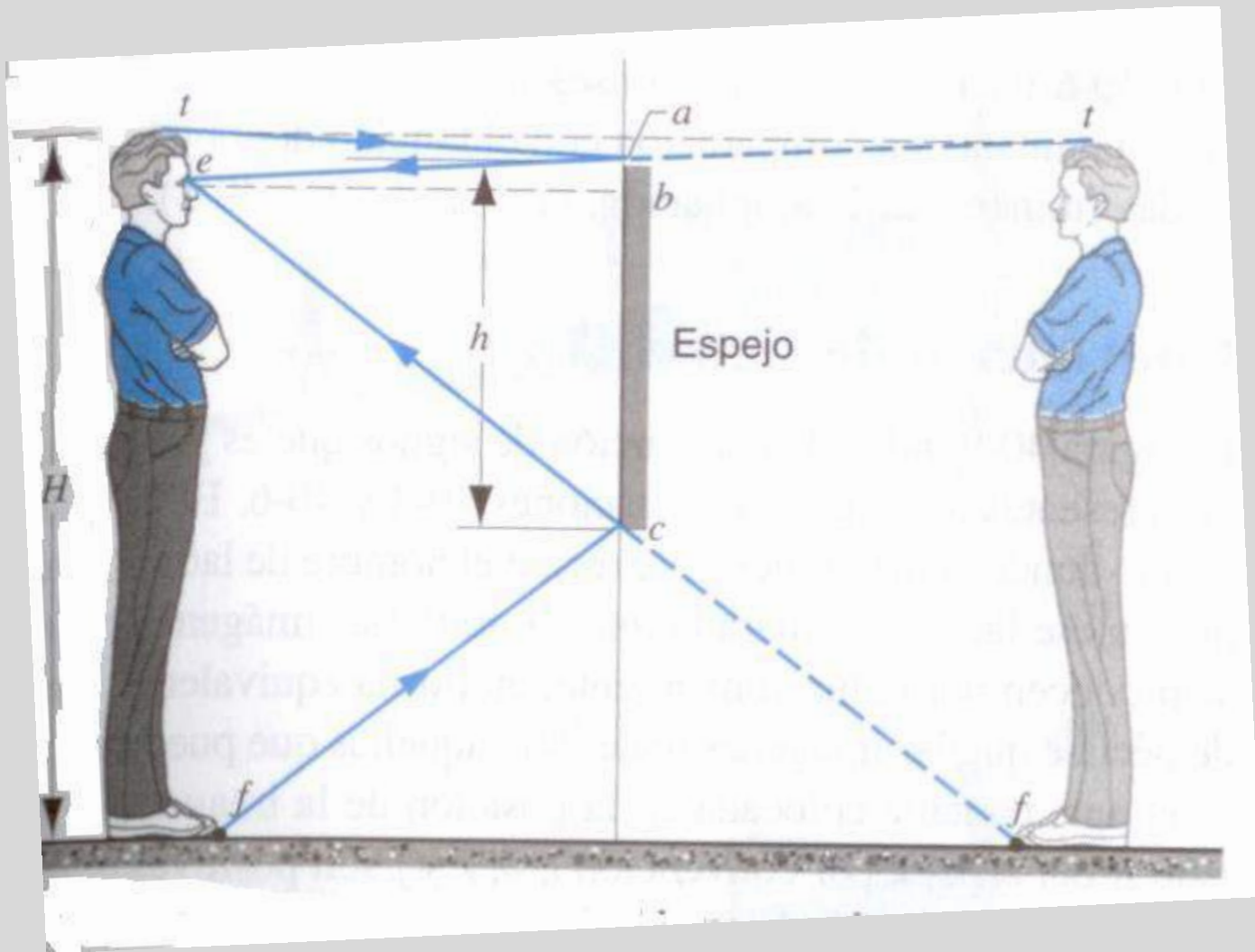


La imagen ofrecida por un espejo plano es virtual.

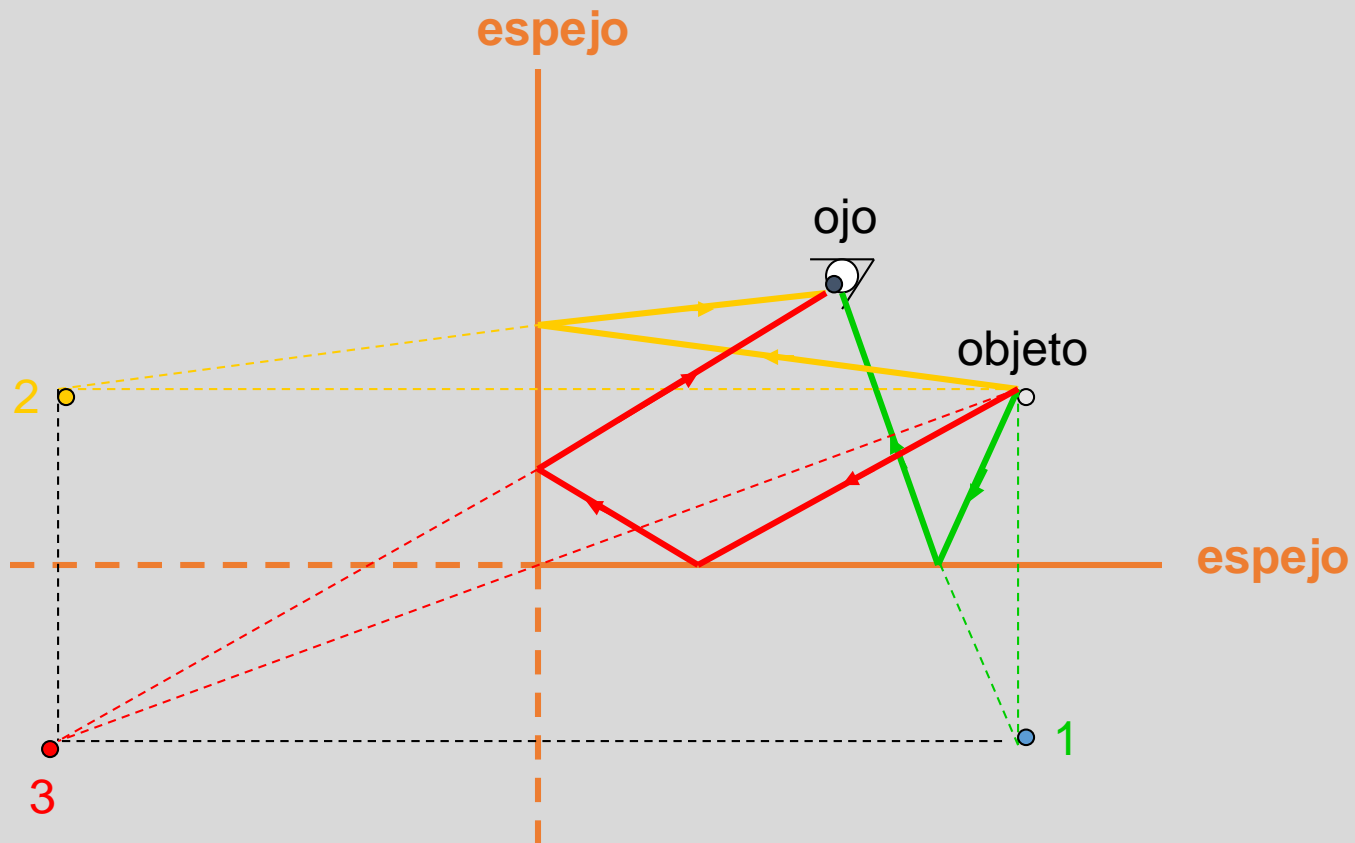
Formación de una imagen completa



Formación de una imagen completa



**Problema: Dos espejos plano forman un ángulo de 90° .
¿Cuántas imágenes existen para un objeto colocado
ente los espejos?**



Espejos curvos

Según la forma de la superficie pulimentada de los espejos curvos, estos pueden ser esféricos, parabólicos, etc.



Espejos cóncavo



Espejo convexo

Espejo Esférico

Los espejos esféricos tienen forma de casquete, como una parte de una esfera hueca pueden ser cóncavos o convexos.

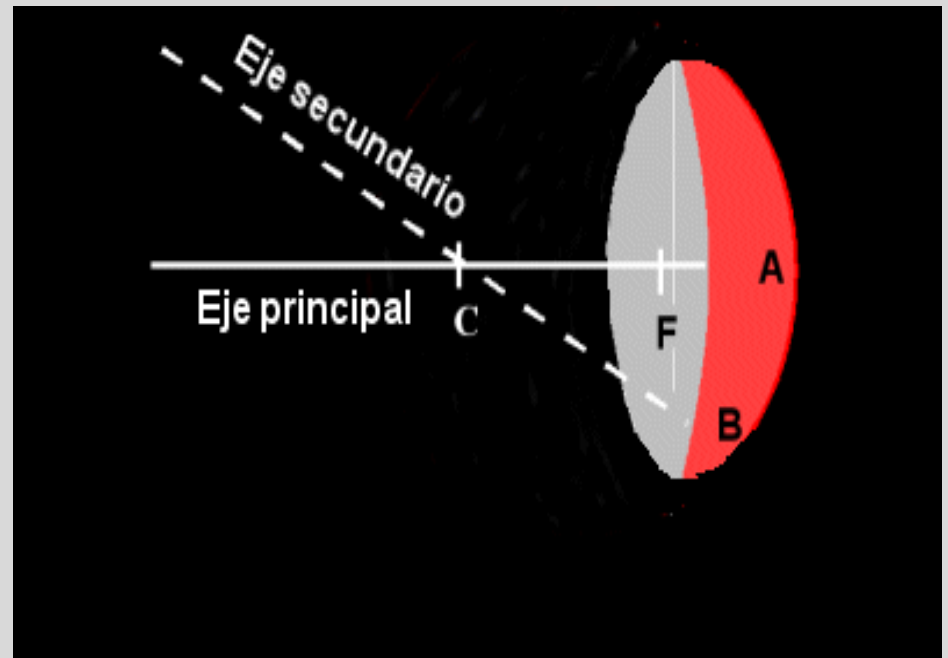
El espejo es cóncavo si la parte plateada (pulida) es la interior del casquete y es convexo si la parte plateada (pulida) es la exterior del casquete.

En un espejo esférico podemos definir las siguientes partes:

Centro de curvatura del espejo. Es el centro de la esfera a la que pertenece el casquete espejo. En la figura es el punto C.

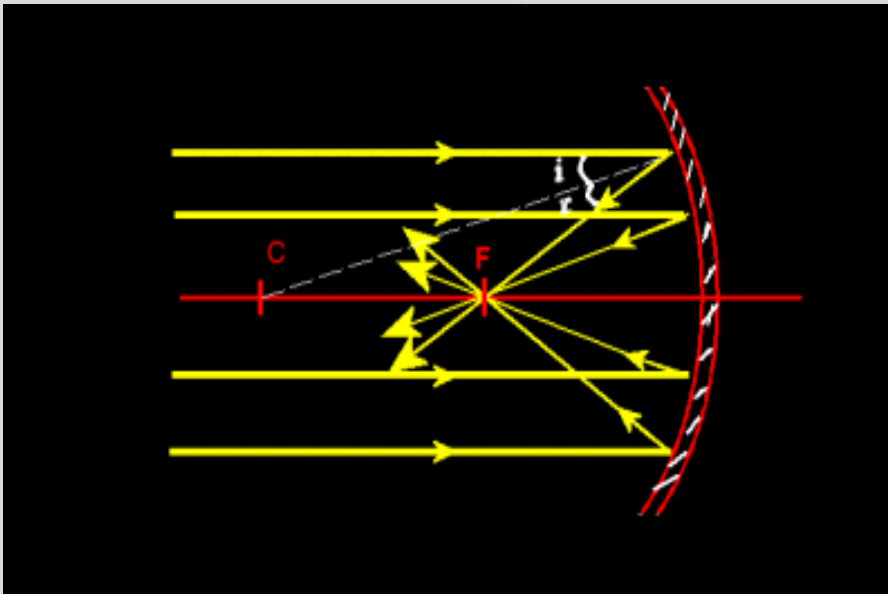
Centro de figura del espejo. Es el polo o centro geométrico del casquete. El punto A de la figura

Eje principal. Es la recta que pasa por el centro de curvatura del espejo y por el centro de figura. Queda definido por la recta CA.



Eje secundario. Es cualquier recta que pasa por el centro de curvatura. Existen infinitos ejes secundarios. En la figura se ve el marcado por la recta CB.

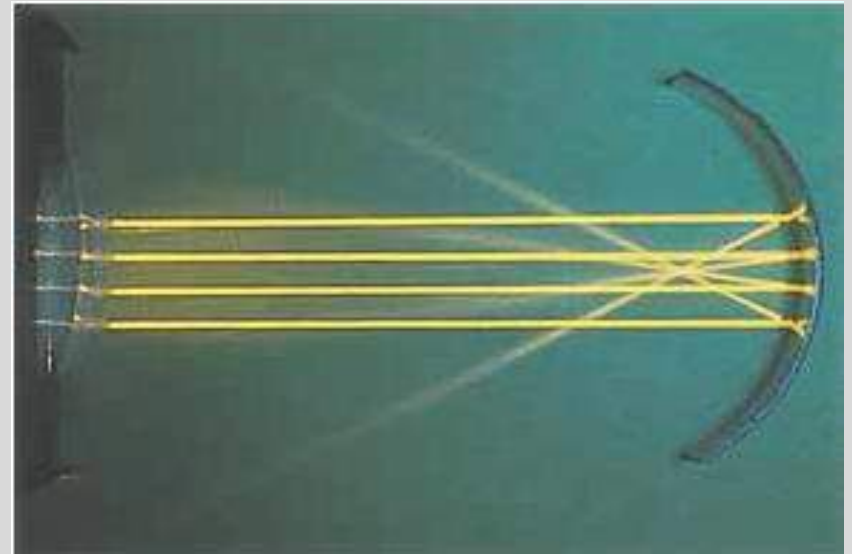
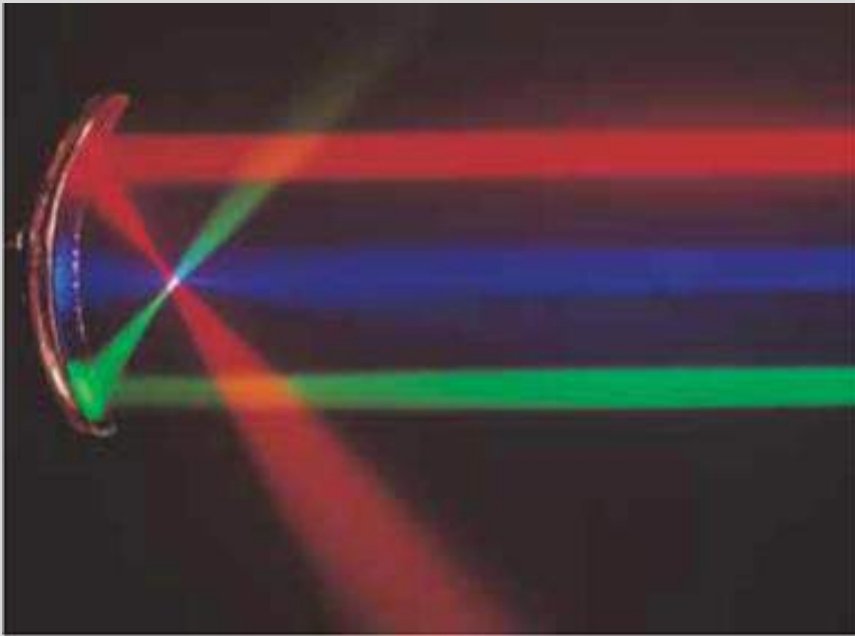
Foco principal del espejo. Es un punto del eje principal en el que se cortan, una vez reflejados, los rayos que llegan al espejo paralelos al eje principal.



Para espejos de radio de curvatura pequeño (muy cerrados), el foco principal se encuentra a la mitad de la distancia entre el centro de curvatura y el de la figura.

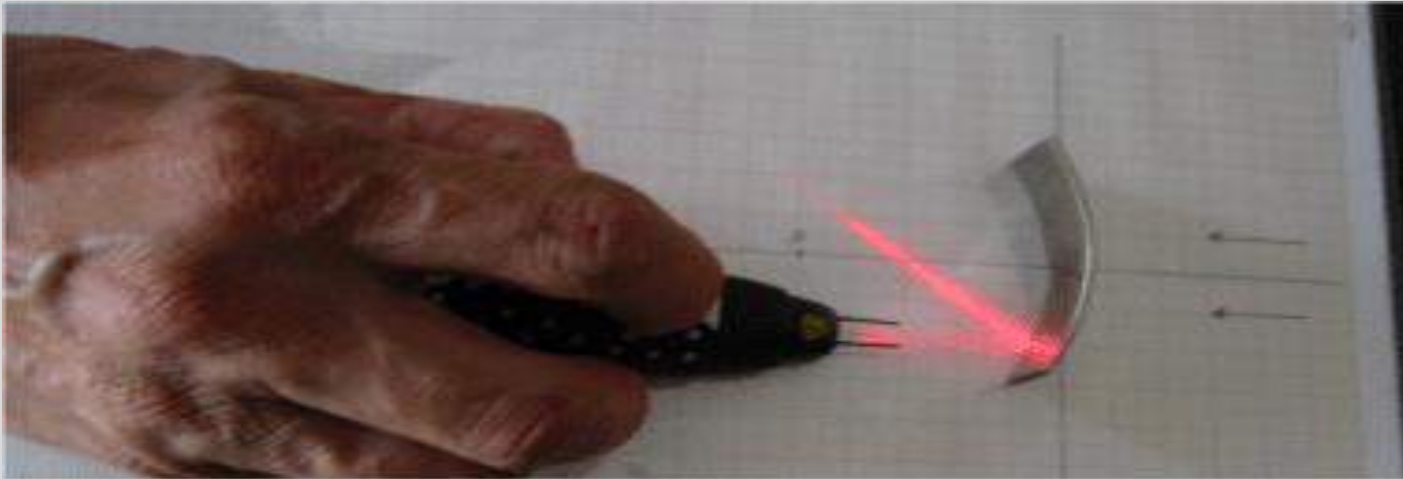
El espejo cóncavo es un dispositivo óptico que puede formar imágenes sobre una pantalla debido a la reflexión de la luz que procede de la superficie de un objeto.

Trayectorias de rayos en espejos curvos



**Los rayos rojo, azul y verde reflejados en un espejo curvo,
note el color blanco en el foco**

Cálculo del radio de curvatura de un espejo curvo (hecho con un fleje metálico) con la ayuda de un puntero láser.

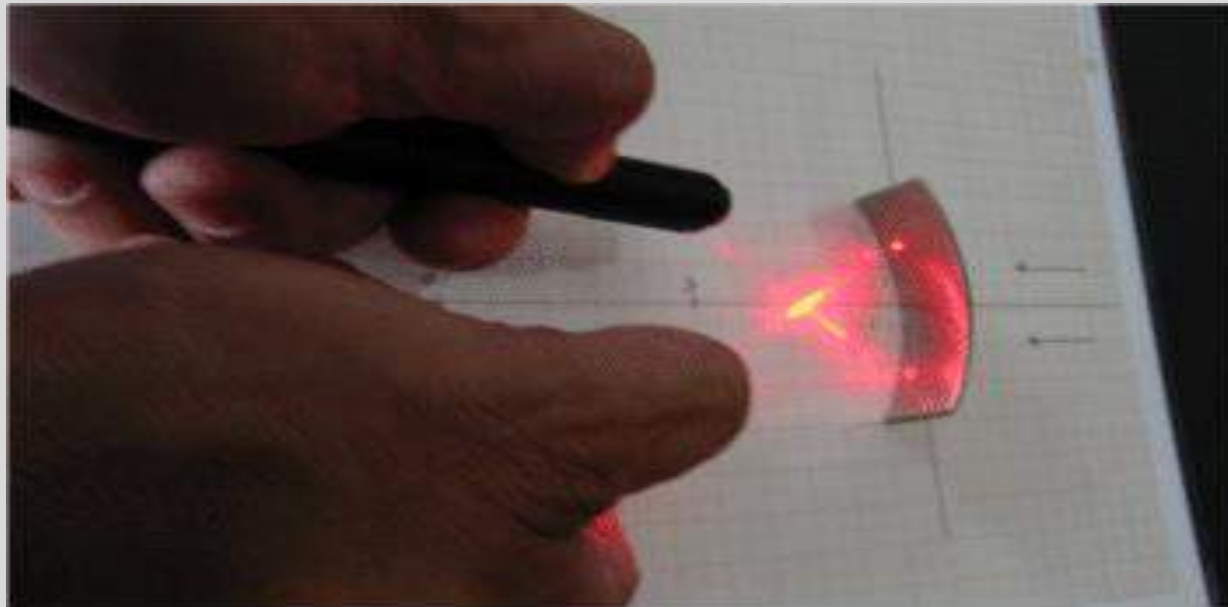


Traza dos ejes perpendiculares en una hoja de papel milimetrado, o por lo menos de papel cuadriculado.

Coloca el espejo en el papel tal como se ve en la foto y envía hacia él un rayo láser paralelo a uno de los ejes.

Observa como se refleja. Marca el punto donde el rayo corta al eje y mide la distancia desde el centro del espejo hasta ese punto: esa será la distancia focal. El radio de curvatura es el doble de esa distancia.

Todos los rayos paralelos al eje principal se reflejan y se cortan en ese punto: es el **FOCO**.



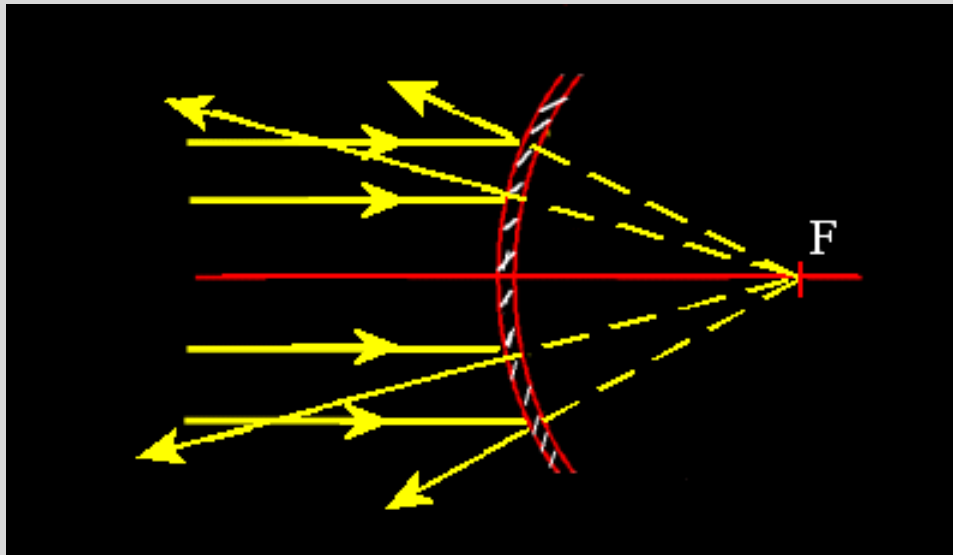
En un espejo convexo puedes construir los rayos divergentes y a partir de sus prolongaciones buscar el foco. Si está pulido por las dos caras como el que ves en la foto con darle la vuelta lo tienes solucionado.

Según como dobles el fleje metálico puedes hacer un espejo cóncavo o convexo

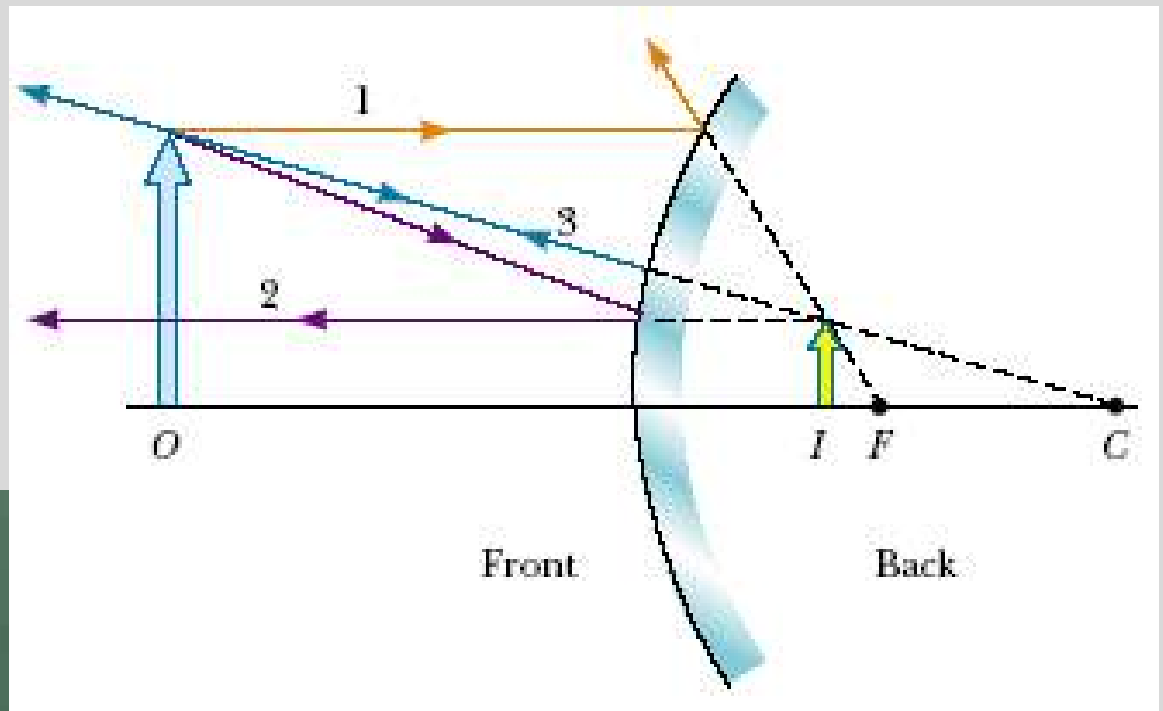


Imagen formada en un espejo convexo

En los espejos convexos el **foco es virtual** (está situado a la derecha del centro del espejo distancia focal positiva). Los rayos reflejados divergen y solo sus prolongaciones se cortan en un punto sobre el eje principal.



Los espejos ofrecen frente a las lentes una serie de ventajas que permiten usarlos en determinados instrumentos ópticos: no muestran aberración cromática y solo es preciso pulir una superficie curva (mientras que en las lentes deben pulirse dos).



Los rayos reflejados no convergen en ningún punto, rebotan en el espejo y divergen, y por lo tanto no pueden formar una imagen sobre una pantalla. La imagen virtual detrás del espejo

Formación de imágenes en un espejo cóncavo esférico

Para abordar la formación de imágenes en los espejos cóncavos es necesario ver primero las reglas del trazo de rayos reflejándose en espejos cóncavos.

Las de imágenes formadas en estos espejos pueden ser **reales o virtuales, invertidas o derechas**, dependiendo de la ubicación del objeto frente al espejo.



Imagen invertida



Imagen derecha

Reglas para el trazado de rayos en los espejos esféricos



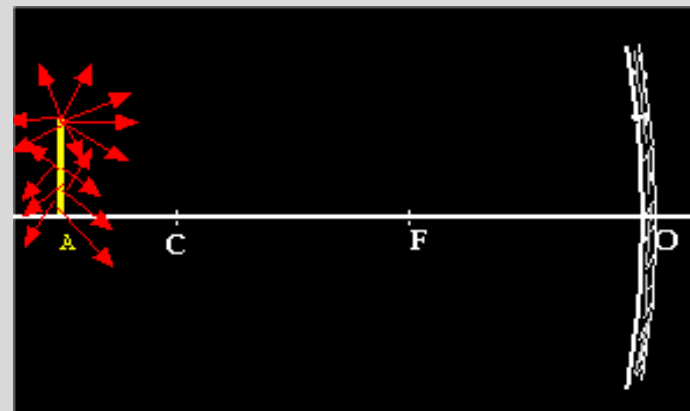
Desde cualquier punto de un objeto iluminado salen infinitos rayos en todas las direcciones.

No solo salen de la punta del dedo, sino también de todos los puntos del cuerpo, en todas las direcciones del espacio.

Salen radialmente, no solamente en un plano, como si el objeto fuera el centro de una esfera que emite luz.

Para saber donde se forma la imagen de los rayos que recoge el espejo y construir con ellos el esquema escogemos solamente algunos rayos situados en un plano.

Seleccionamos solamente algunos de los infinitos rayos que salen del objeto (varilla amarilla).

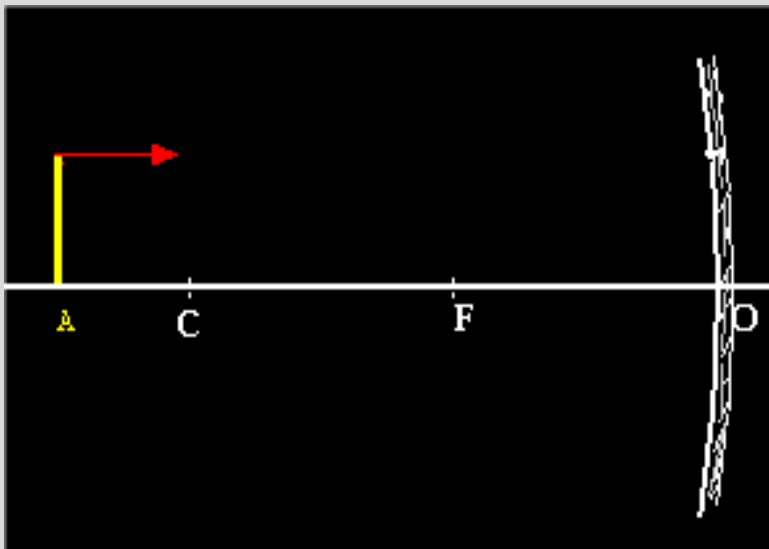


Reglas para el trazado de rayos en los espejos

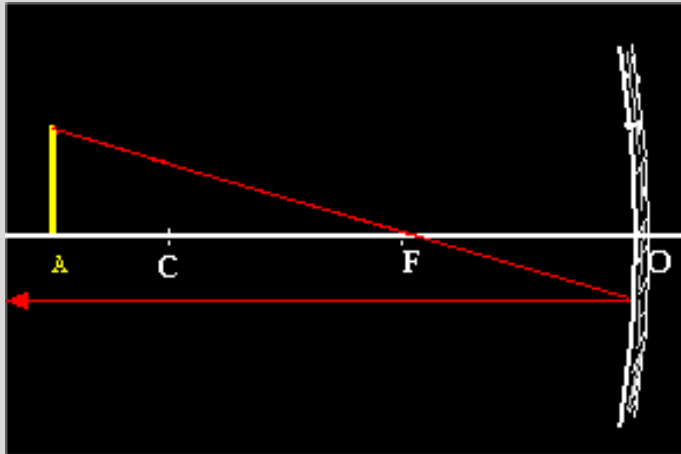
La trayectoria de los rayos al incidir en el espejo cumple las leyes de la reflexión

Escogemos tres rayos: uno que sale paralelo al eje principal, otro que va hacia el foco y otro que va hacia el centro de curvatura.

Reglas de la trayectoria de los rayos



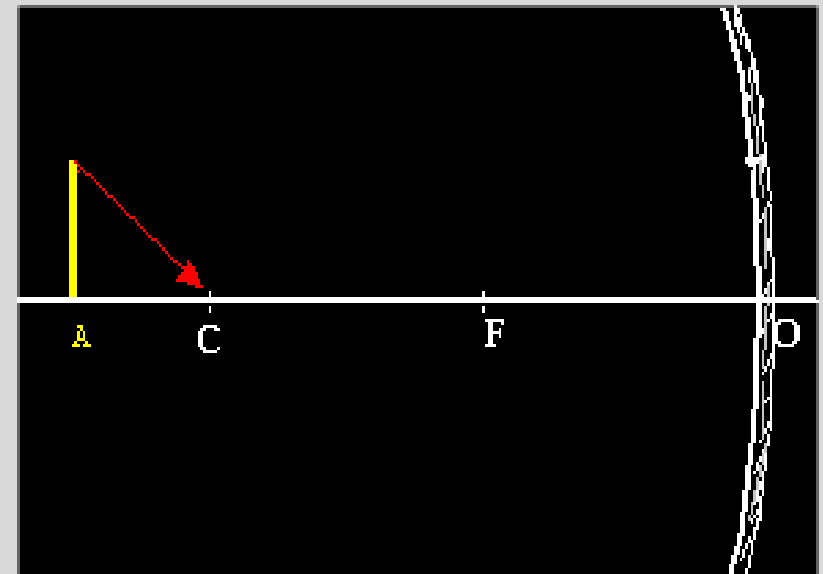
a) Todo rayo paralelo al eje principal se refleja pasando por el foco.



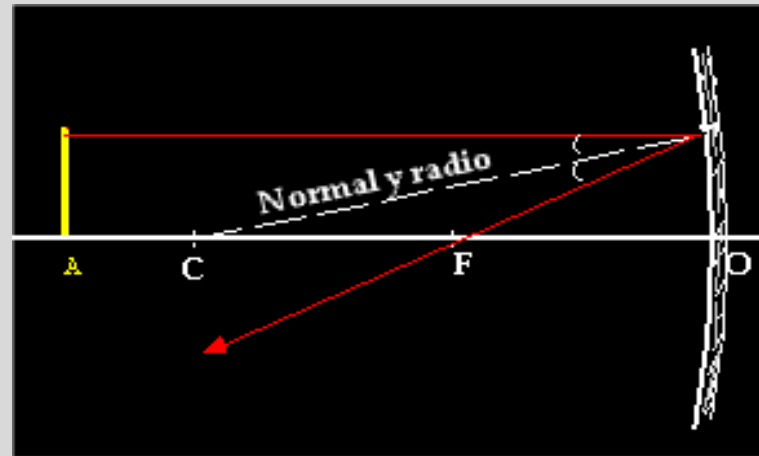
b) Todo rayo que pasa por el foco sale paralelo al eje principal.

c) Todo rayo que pasa por el centro de curvatura C, se refleja en la misma dirección, pero en sentido contrario.

¡Su dirección coincide con la normal en el punto de impacto!



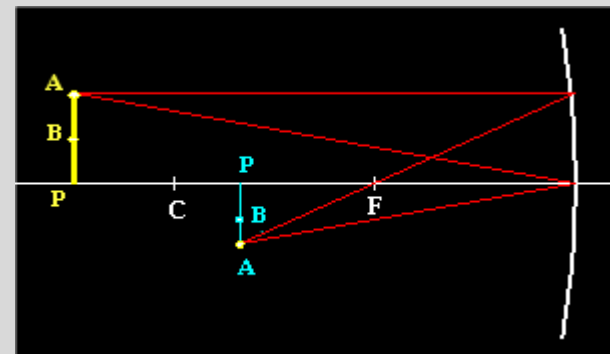
El rayo que incide en el espejo forma con la normal en ese punto un ángulo igual al que forma el que se refleja.



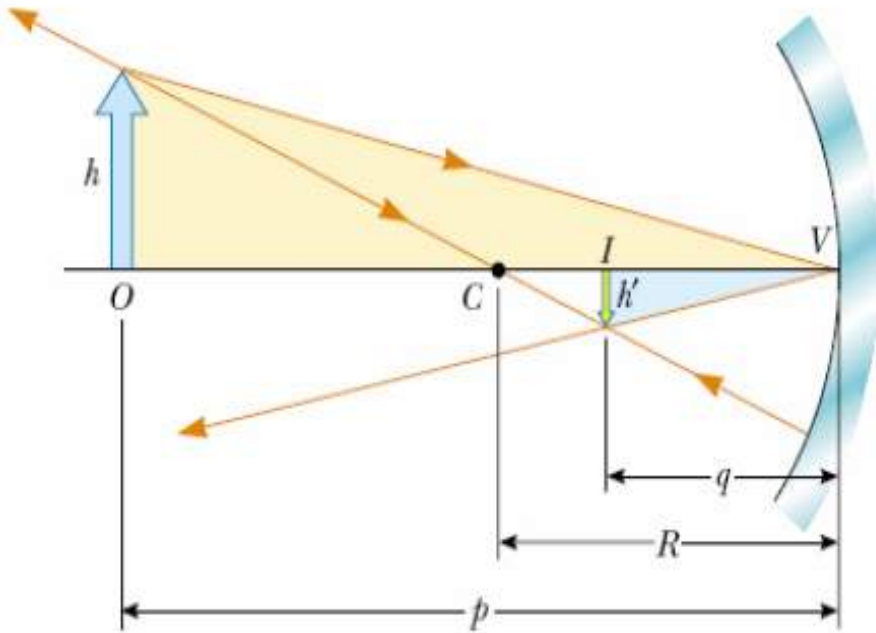
La normal de cada punto del espejo coincide con el radio de curvatura

Siguiendo las reglas anteriores desde el punto P solo se pueden trazar tres rayos:

Un rayo que pasa por C (que se refleja sobre si mismo), otro que pasa por F (va paralelo al eje principal y se refleja pasando por F), y el que pasa por F (que sale paralelo al eje principal).



Convenio de signos



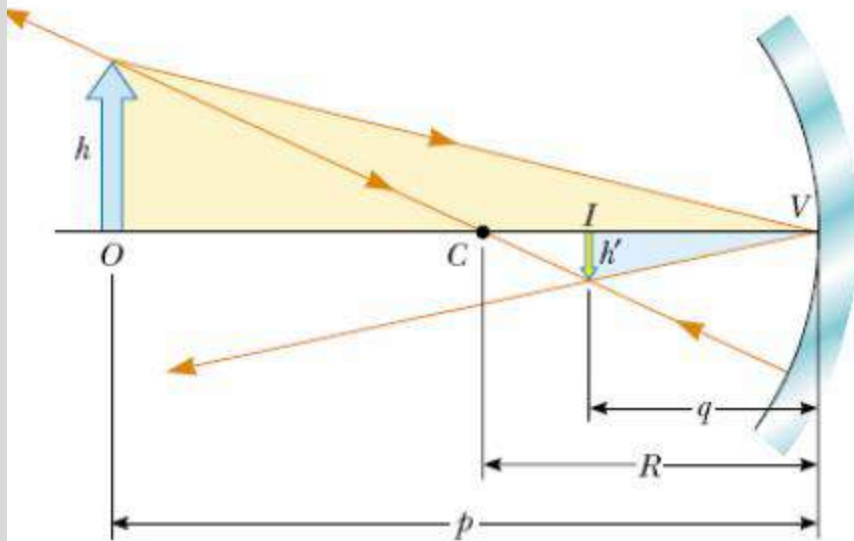
Como centro de las coordenadas se toma el vértice V del espejo, cuyo centro de curvatura es el punto C .

Todos los puntos situados frente al espejo tienen abscisa **positiva**, y los situados detrás del espejo tienen abscisa **negativa**.

Todos los puntos situados por **encima** del eje principal poseen ordenada **positiva**, y los situados **debajo**, tienen abscisa **negativa**.

El radio de curvatura R será **positivo** si el centro se ubica frente al espejo (lo que ocurre con espejos cóncavos) y será **negativo** si está detrás del espejo (lo que aplica para espejos convexos).

Convención de signos:

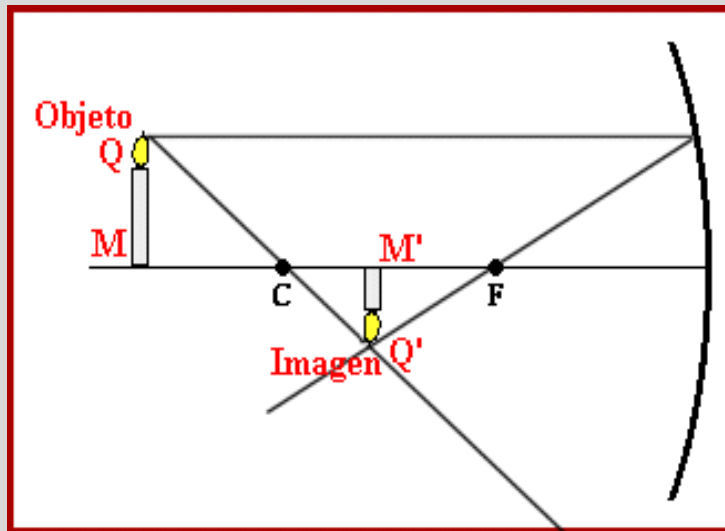


Considerando que

- p es la distancia del objeto al vértice,
 - q es la distancia de la imagen al vértice,
 - R es el radio de curvatura (igual al doble de la distancia focal f)
- podemos resumir la convención en la siguiente figura:

Frente, lado real	Detrás, lado virtual
p, q, R positivos	p, q, R negativos
→ luz incidente	no hay luz
← luz reflejada	

Formación de imágenes en los espejos cóncavos

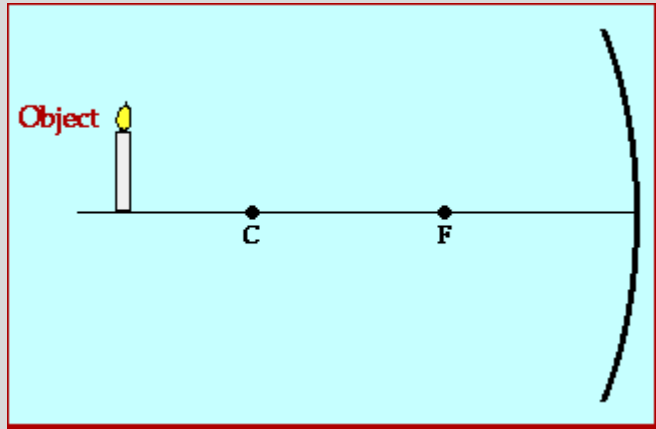


Un objeto iluminado o que emite luz (como la punta de una vela) se considera un **Objeto** en óptica geométrica.

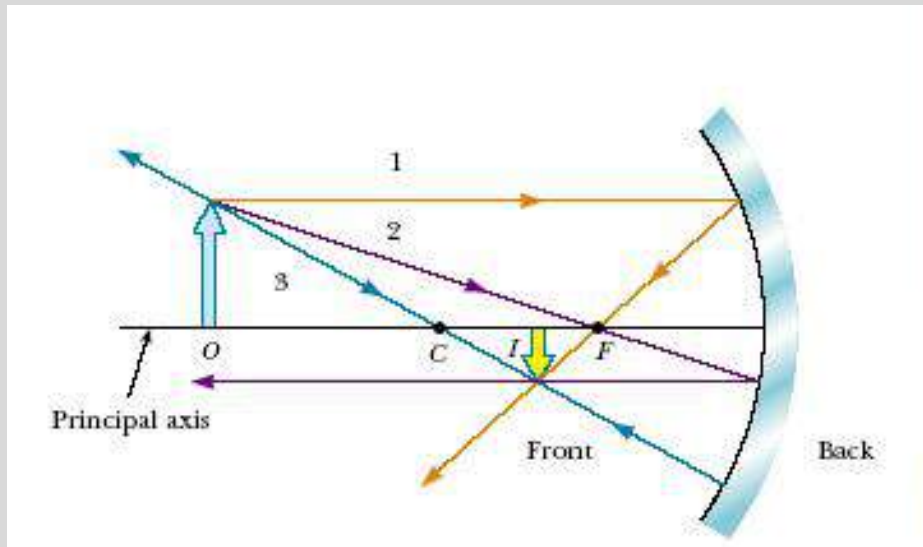
Colocando un objeto delante de un espejo cóncavo este formará una **Imagen** real de ese objeto

Debido a que la imagen se puede formar sobre una pantalla, se le denomina imagen real.

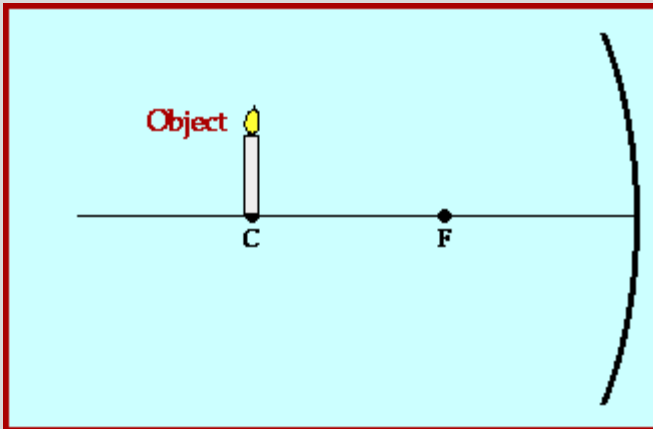
Formación de imágenes en espejos cóncavos



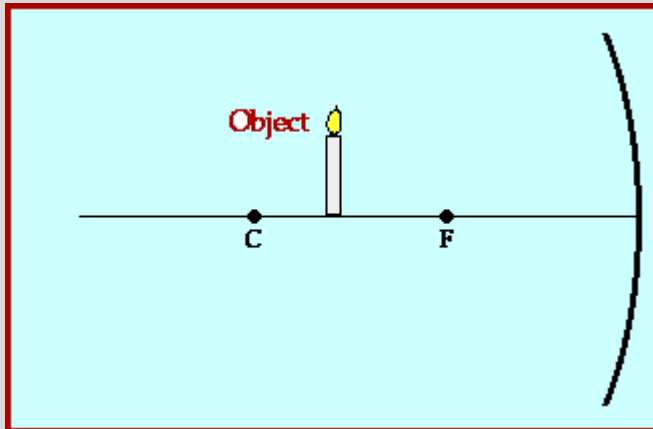
Objeto colocado entre el centro de un espejo y el infinito, **la imagen es real invertida, localizada entre el foco y el centro**



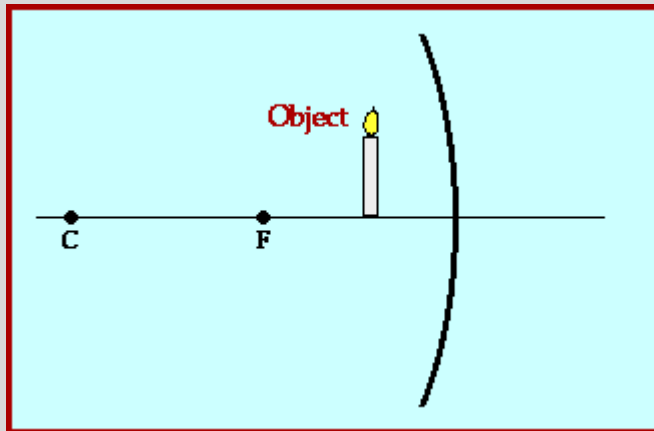
Formación de imágenes en espejos cóncavos



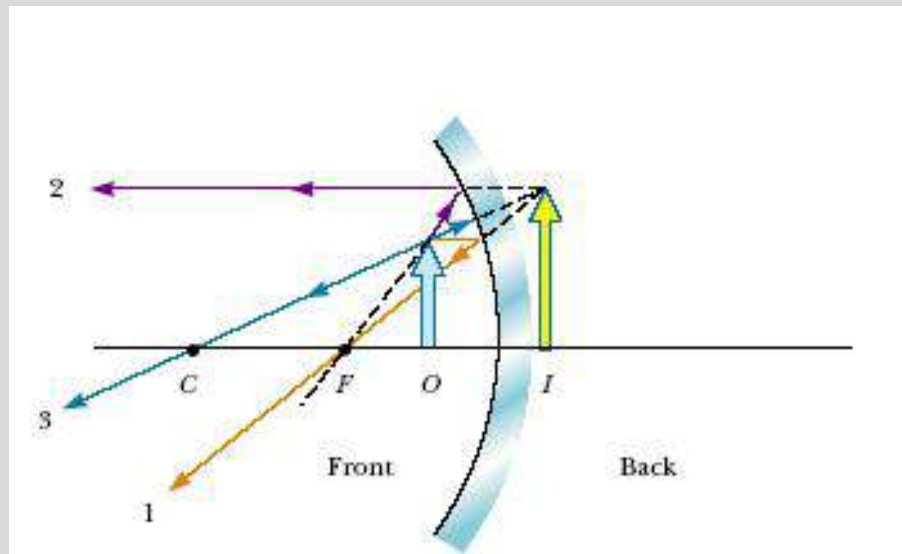
Objeto colocado en el centro de un espejo, **la imagen es real invertida, localizada en el centro**



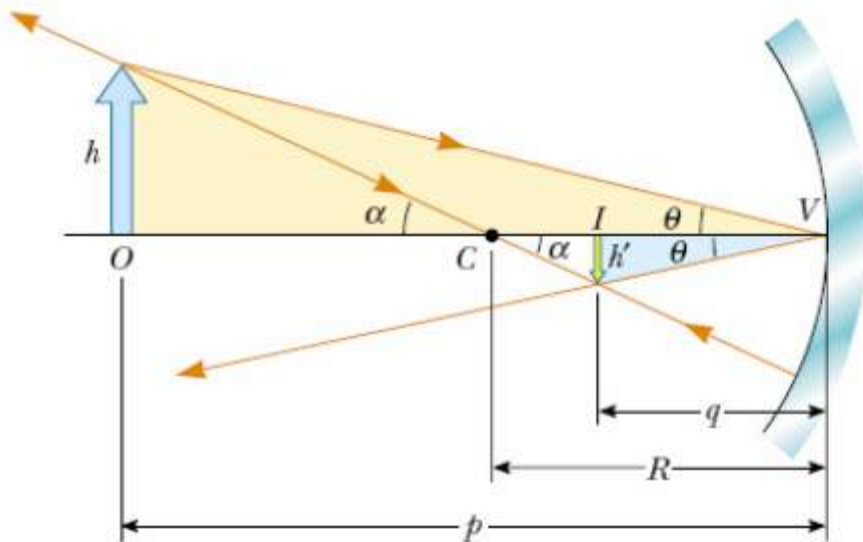
Objeto colocado entre el centro de un espejo y el foco, **la imagen es real invertida, localizada entre el centro y el infinito.**



Objeto colocado entre el foco y el espejo, **la imagen es virtual y derecha, localizada atrás del espejo**



Magnificación:



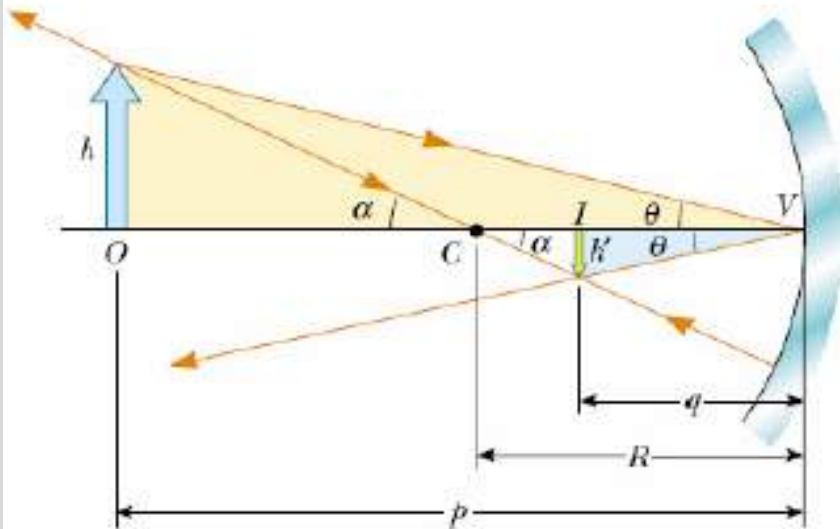
Se define la magnificación M de un espejo como la relación entre los tamaños de la imagen (h') y del objeto (h), es decir

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$

Una magnificación mayor que 1 significa una amplificación, mientras que si M es menor que uno tenemos una reducción en el tamaño.

El signo de M también es importante, si M es positiva entonces la imagen está derecha, mientras que una M negativa significa que la imagen está invertida.

Ley de los espejos:



Si nos auxiliamos de los ángulos α de la figura, es posible deducir la llamada ecuación de los espejos, que nos da una relación entre p , q y R (o f), a saber

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

o

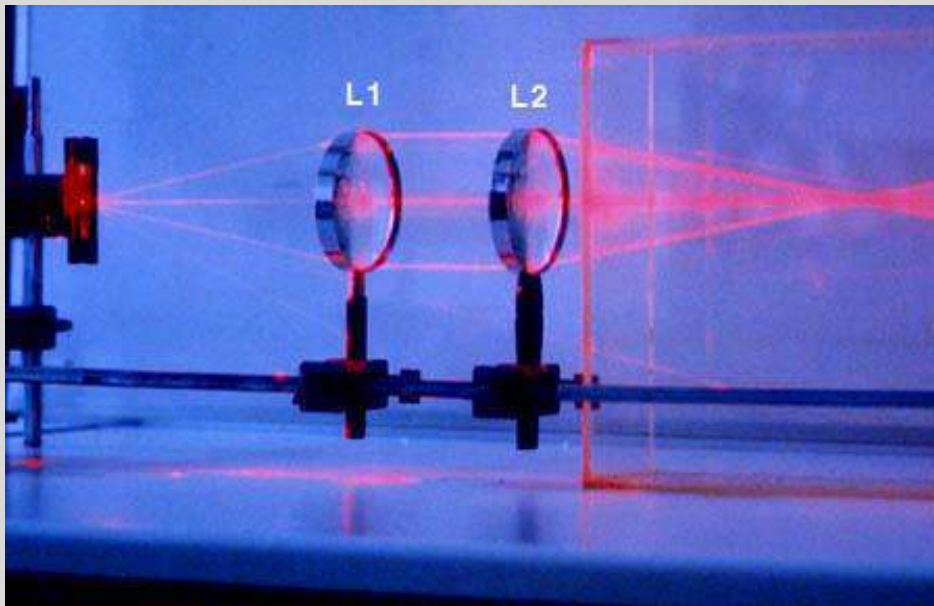
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Al emplear la anterior ecuación, es sumamente importante tomar en cuenta la convención de signos establecida previamente para las cantidades involucradas.

Ejemplo

Espejo convexo y de cóncavo.

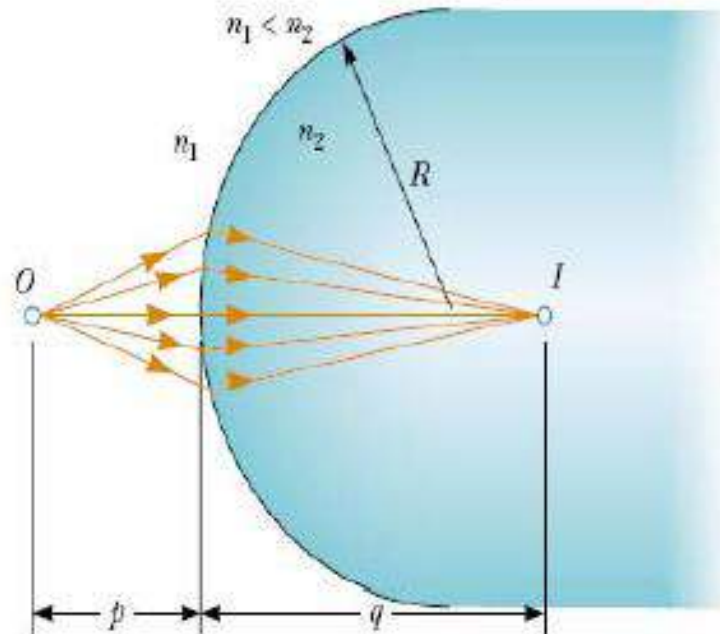
Formación de imágenes por refracción



Refracción en una superficie esférica

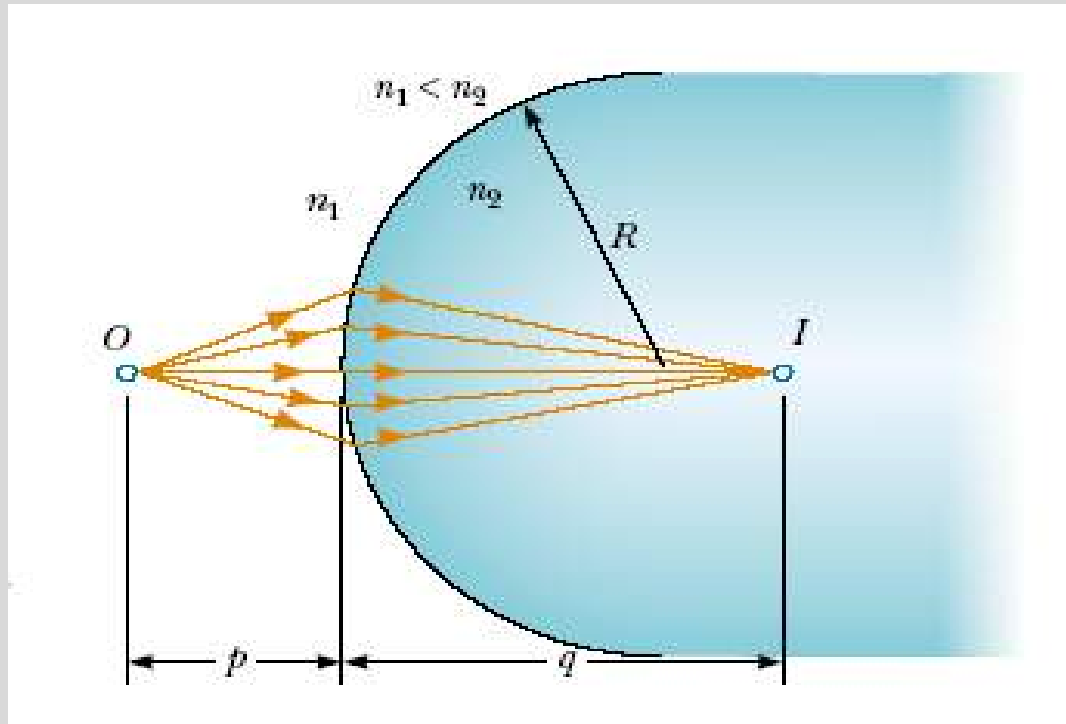
Una vez estudiada la formación de imágenes mediante la reflexión en superficies planas y curvas, pasemos a analizar cómo se forma la imagen cuando la luz es refractada al pasar de un medio a otro. Para ello consideremos una frontera esférica de radio R , entre dos medios de índices de refracción n_1 y n_2 , tal como se muestra en la figura.

El objeto se coloca en el medio de menor índice de refracción, a una distancia p de la superficie, y la imagen se forma a una distancia q de la superficie.



Elementos de la refracción en superficies esféricas

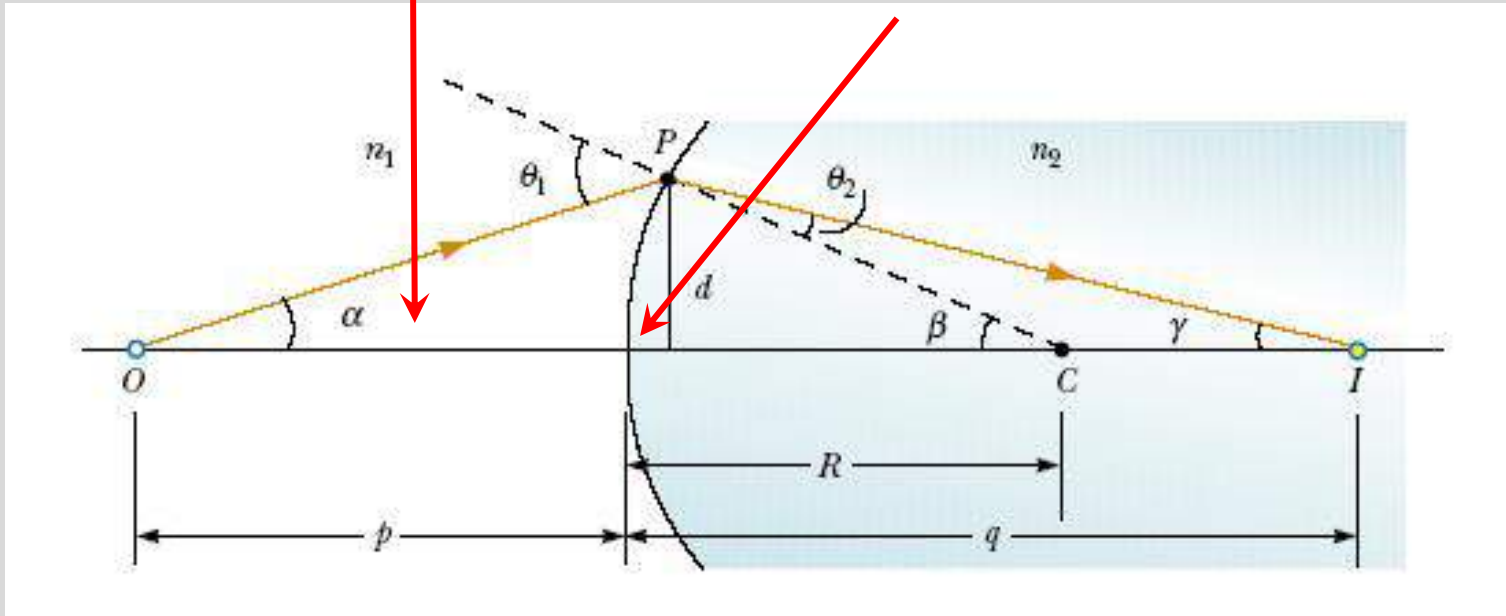
El centro de curvatura de la superficie esférica es **C**. El radio de curvatura de dicha superficie es **r**.



Según que la forma que enfrenta la entrada de la luz sea cóncava o convexa
Según la convención el radio de curvatura es mayor que cero ($\mathbf{R} > \mathbf{0}$) en la superficie convexa.

El eje de simetría de la superficie esférica es el eje óptico.

El punto de corte de este eje con la superficie esférica es el polo o vértice de la misma



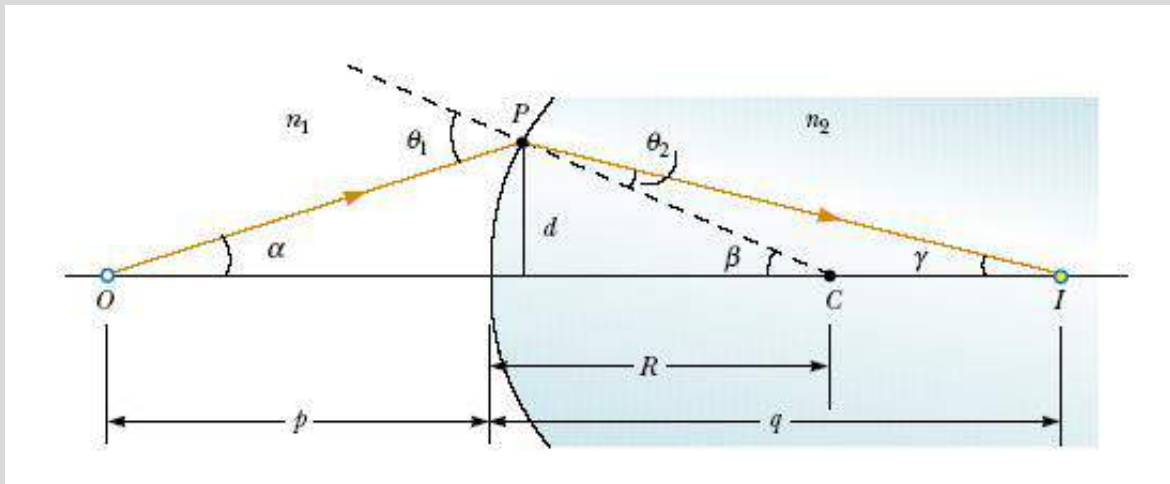
La distancia del punto objeto, **O**, al vértice de la superficie, es la distancia objeto, p .

La distancia del vértice de la superficie esférica, al punto imagen **I**, es la distancia imagen, q

Ecuación fundamental de la refracción en una superficie esférica

Un punto luminoso O situado sobre el eje óptico emite un rayo OP hacia la superficie. Este rayo forma un ángulo α con el eje y se refracta siguiendo el camino PI formando un ángulo α' con el eje óptico. De acuerdo a

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

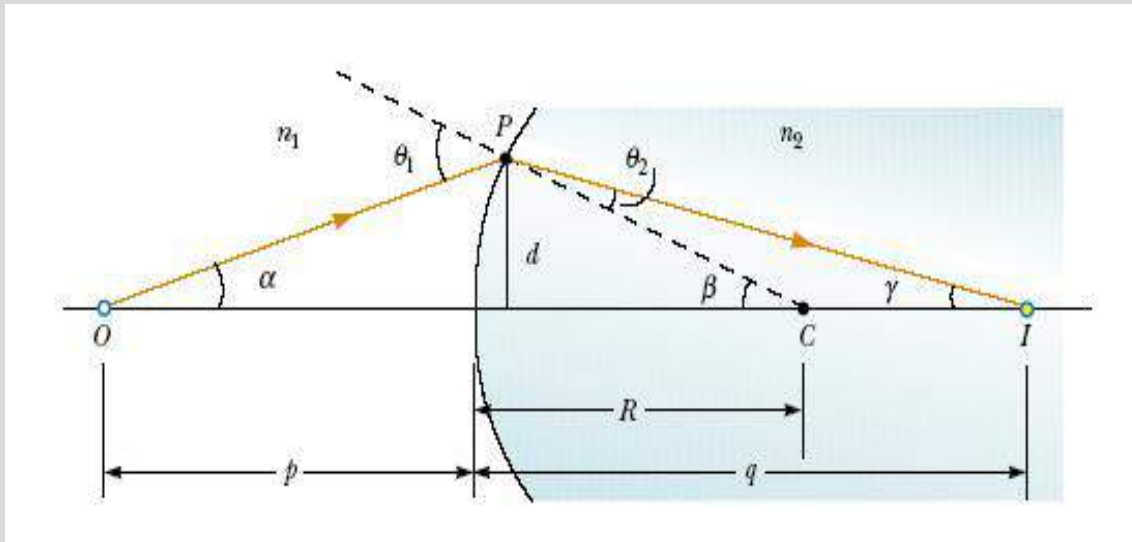


Como $n_2 > n_1$ el rayo refractado se aproxima a la normal y $\gamma < \alpha$

El rayo que viaja a lo largo del eje óptico coincide con la normal, es perpendicular a la superficie y no se desvía al incidir sobre él.

Este rayo corta al rayo PI en el punto I . Este punto I es la imagen de O .

Los rayos son paraxiales, es decir están muy próximos al eje óptico E por lo que los ángulos $\theta_1 \sim 0$ y $\theta_2 \sim 0$

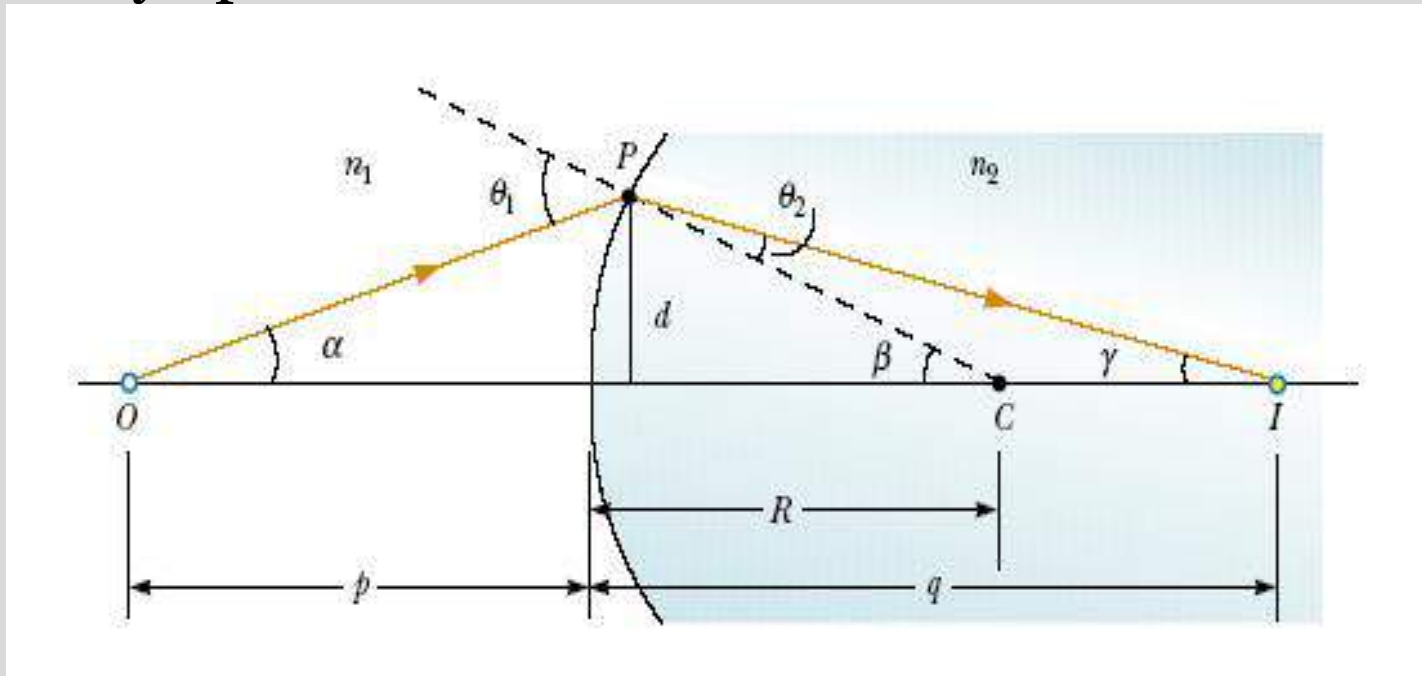


En esta zona los senos de los ángulos y las tangentes coinciden pudiendo sustituirse por los valores de los propios ángulos.

Aplicando la ley de Snell para la refracción:

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

Haciendo uso del resultado de geometría; el ángulo externo de un triángulo es igual a la suma de los dos ángulos interiores y opuestos:



así para el triángulo **OPC**

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$

y para el triángulo **PIC**

$$\beta = \theta_2 + \gamma$$

Así tenemos un sistema de 3 ecuaciones

$$1 \quad n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

$$2 \quad \theta_1 = \alpha + \beta$$

$$3 \quad \beta = \theta_2 + \gamma$$

Despejando θ_1 y θ_2 de las ecuaciones 2 y 3, sustituyendo en la ecuación 1 (**ley de Snell**)

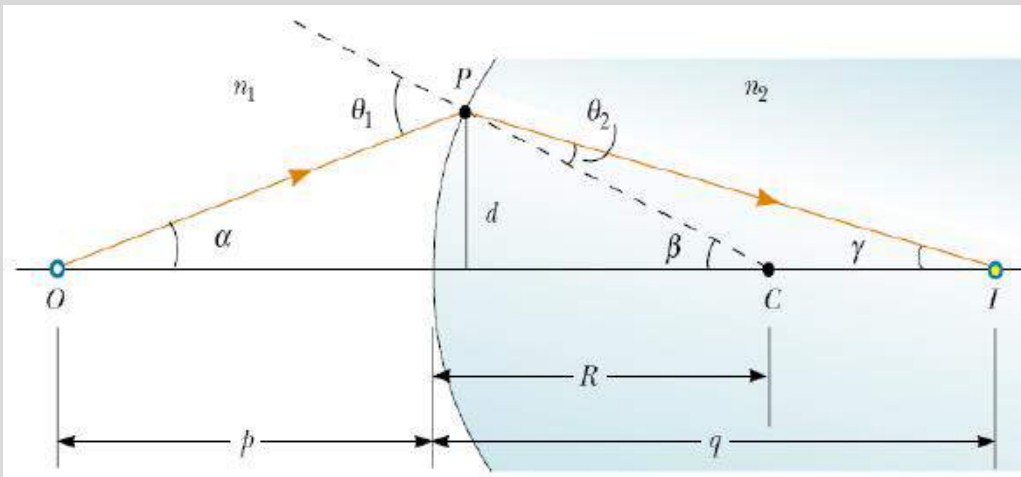
$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta$$

Por otro lado, recordando que estamos considerando la aproximación paraxial, en la cual Los ángulos de los rayos son pequeños

$$\gamma \sim 0; \alpha \sim 0 \text{ y } \beta \sim 0$$

En la figura podemos establecer las relaciones siguientes:

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{d}{p} \quad \tan \beta \approx \beta \approx \frac{d}{R} \quad \tan \gamma \approx \gamma \approx \frac{d}{q}$$



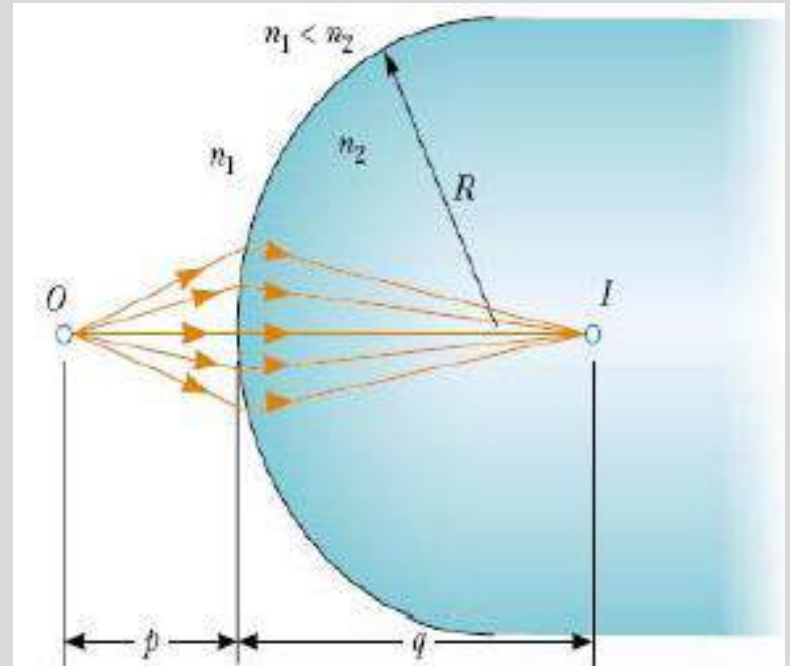
Al sustituir α , β γ en la Ley de Snell:

$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta$$

Se obtiene:

La Ecuación fundamental de la refracción en una superficie esférica

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$



Esta ecuación

- Permite conocer la posición de la imagen si previamente conocemos la posición del objeto y las características de la superficie esférica.
- Solamente es válida para los rayos paraxiales.
- Todos los rayos que salen de O son paraxiales (se separan poco del eje principal) y convergen en el punto I.

Convenio de signos

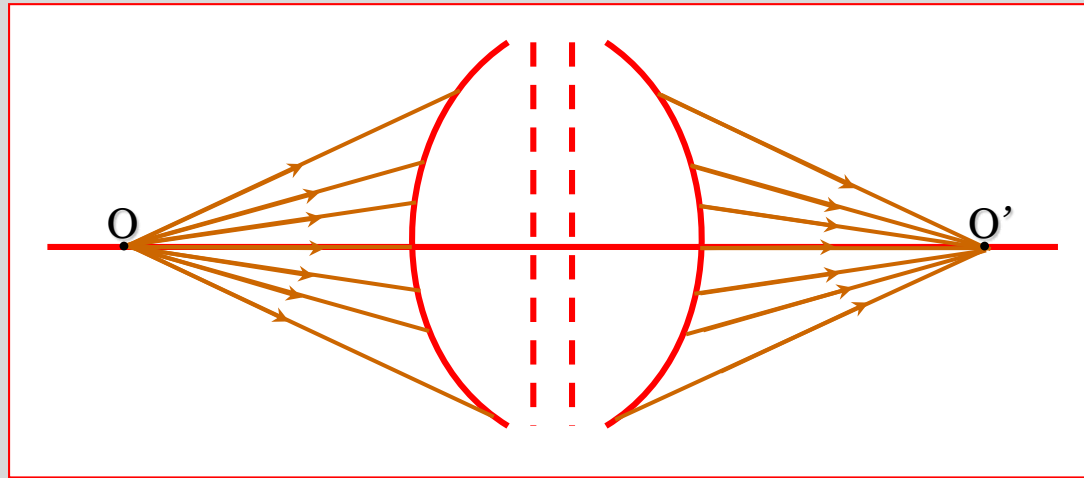
$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

En el empleo de esta relación es importante recordar que el objeto se sitúa en el medio de menor índice de refracción (n_1), de tal forma que n_2 es mayor a n_1 . La convención de signos aplicable es la siguiente.

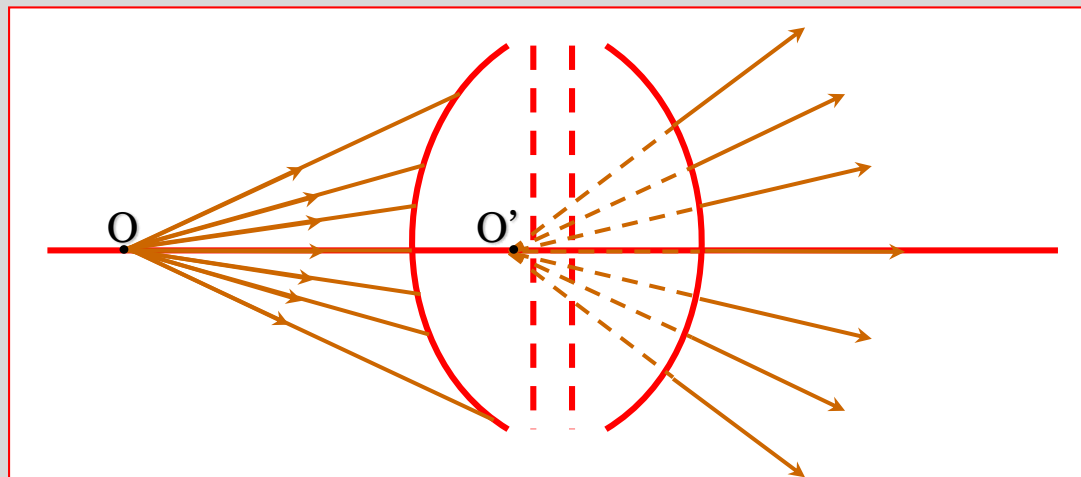
- p es positivo si el objeto está frente a la superficie (objeto real), y negativo si está detrás de la superficie (objeto virtual).
- q es positivo si la imagen está detrás de la superficie (imagen real), y negativo si está frente a la superficie (imagen virtual)
- R es positivo si el centro de curvatura está detrás (superficie convexa), y negativo si está enfrente (superficie cóncava).

Objetos e imágenes reales y virtuales

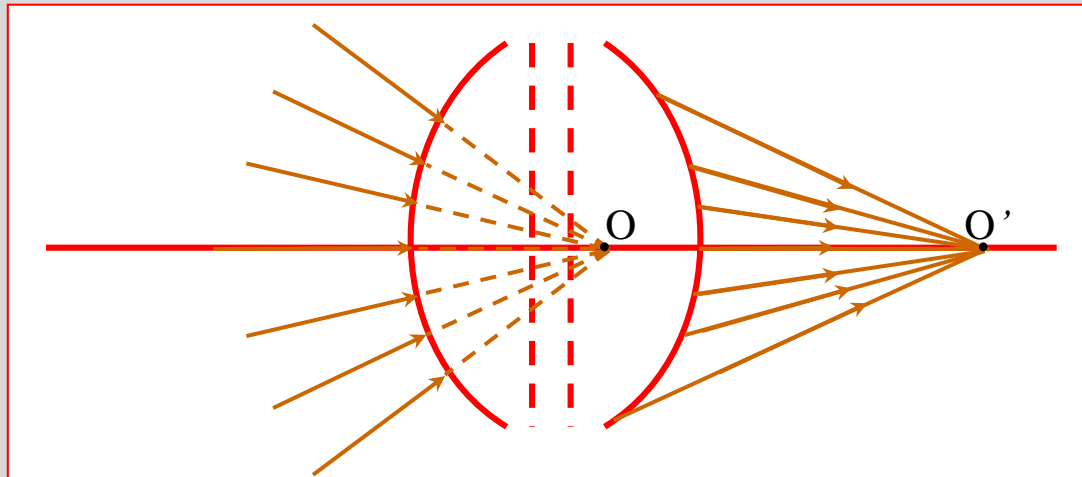
- Objeto real e imagen real



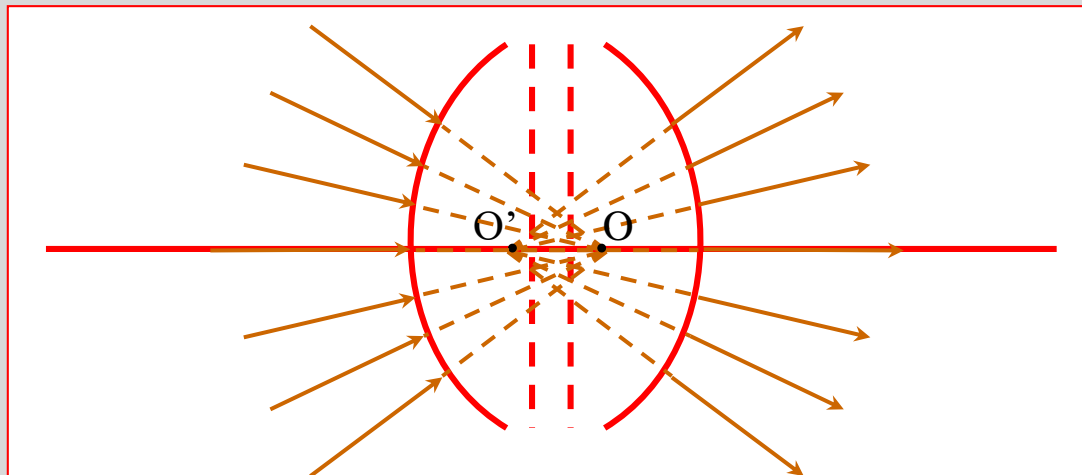
- Objeto real e imagen virtual



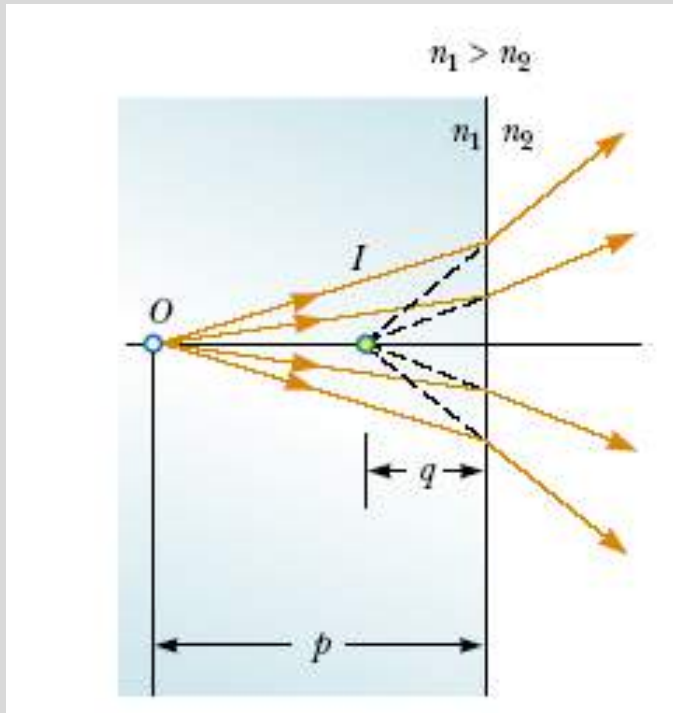
- Objeto virtual e imagen real



- Objeto virtual e imagen virtual



Ejemplo: Refracción sobre una superficie plana



$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

En este caso el radio de curvatura es infinito

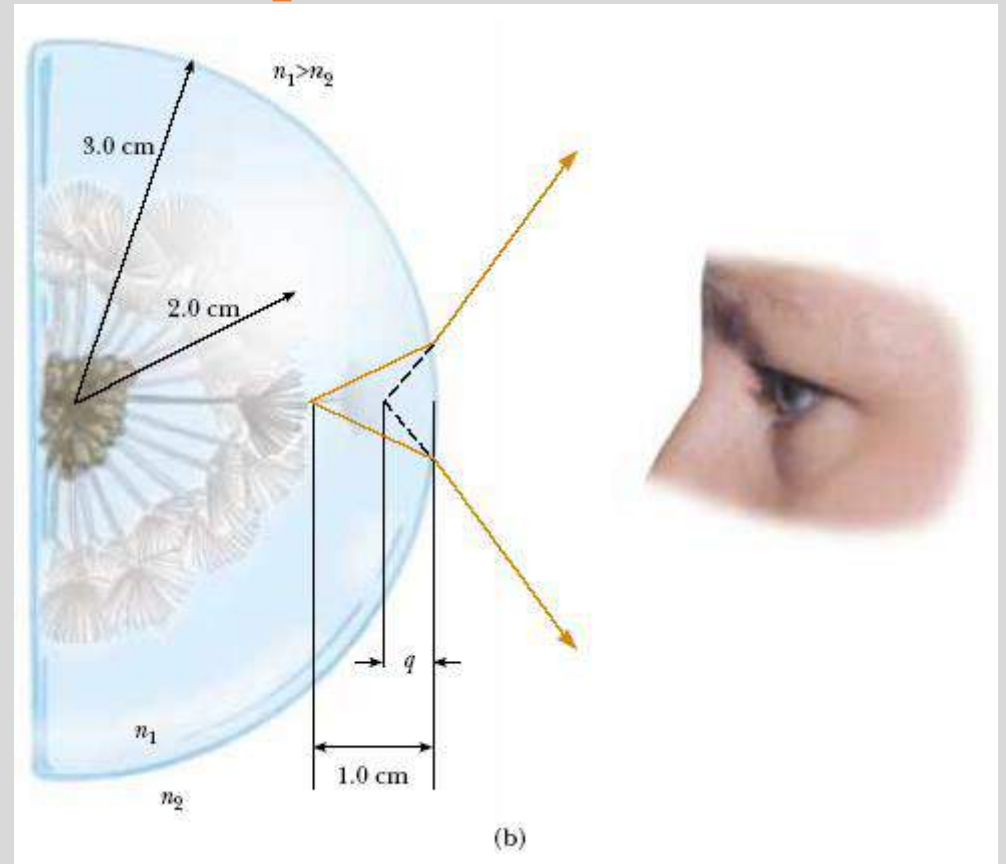
$$\frac{n_1}{p} = -\frac{n_2}{q}$$

Despejando la distancia imagen q se tiene

$$q = -\frac{n_2}{n_1} p$$

Objeto virtual e imagen real

Refracción sobre una superficie esférica



$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$\frac{1.50}{1.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1.00 - 1.50}{-3.0 \text{ cm}}$$

$$q = -0.75 \text{ cm}$$

*Nuevamente un
Objeto virtual e imagen real*

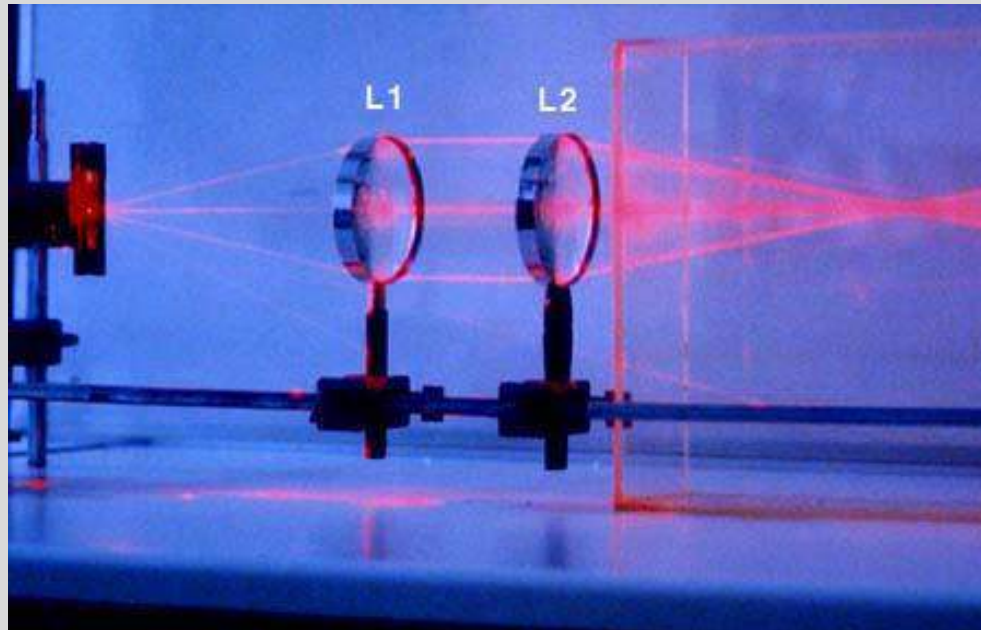
Lentes delgadas

LENSES DELGADAS

¿Qué son?

Una lente es un sistema óptico centrado formado por dos superficies, por lo menos una suele ser esférica, y los medios externos que limitan la lente y tienen el mismo índice de refracción. Su utilidad es la formación de imágenes usando la propiedad de la refracción de la luz.

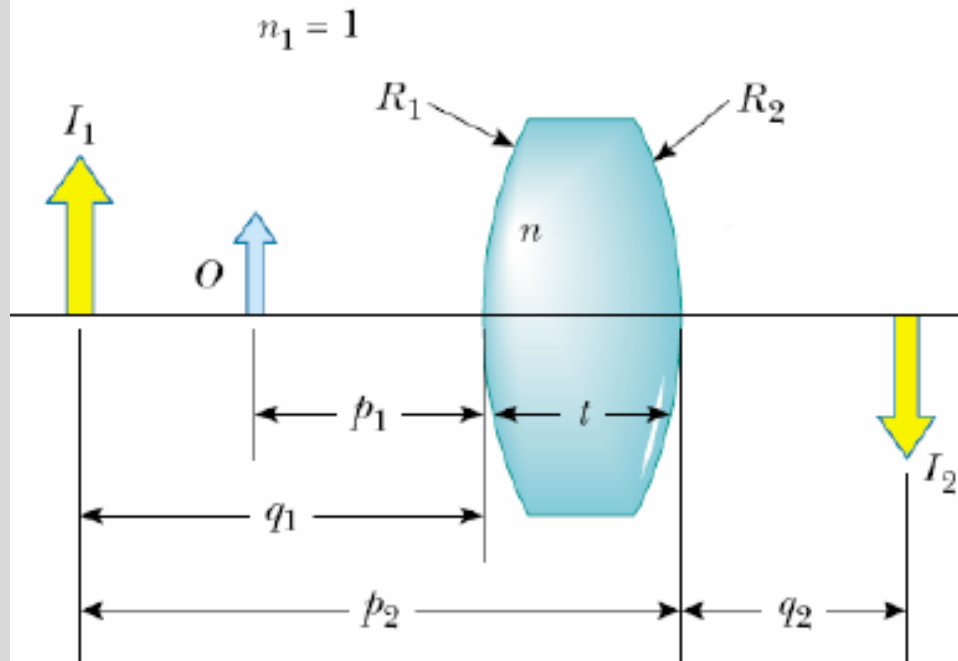
Las lentes se emplean para muy diversos fines: podemos encontrarlas en las gafas, las lupas, los prismáticos, los microscopios, los objetivos de las cámaras fotográficas, proyectores de diapositivas, etc.



Formación de imágenes por lentes delgadas

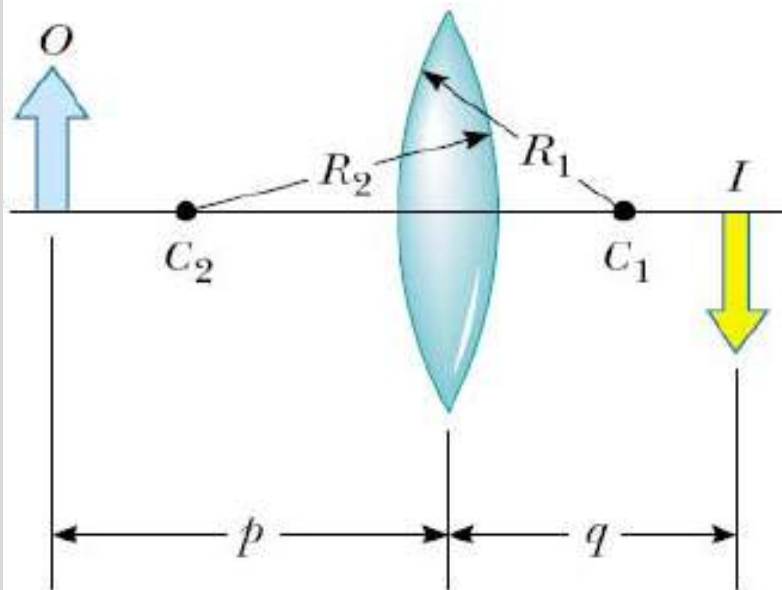
La formación de imágenes en lentes se basa en la idea de que la imagen de una superficie se puede tomar como el objeto (virtual) de la segunda superficie.

Para visualizar lo anterior, consideremos un material con índice de refracción n y con dos superficies esféricas de radios R_1 y R_2 .



Para ubicar la imagen de la lente se usa la imagen I_1 , formada por la superficie 1 (de radio R_1), como el objeto (virtual) para la superficie 2 (de radio R_2), encontrándose que la imagen del objeto O es justamente I_2 .

Se considera una lente delgada cuando las dimensiones y espesor t de una lente, son pequeñas comparadas con los radios de curvatura R_1 y R_2 .



Así que considerando lo anterior, para el caso de una lente delgada podemos encontrar una relación entre las distancias objeto p e imagen q con los radios R_1 y R_2 .

Para lograrlo, y tomando en cuenta la convención de los signos para la formación de imágenes en superficies refractantes, vamos a considerar que $n_1=1$ y que $n_2=n$, con lo que llegamos a la relación

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

La distancia focal se considera como la correspondiente a la distancia imagen cuando el objeto frente a la lente se ubica en infinito, así que si en la ecuación anterior tomamos el límite p tiende a infinito, entonces q se aproxima a f , obteniéndose

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

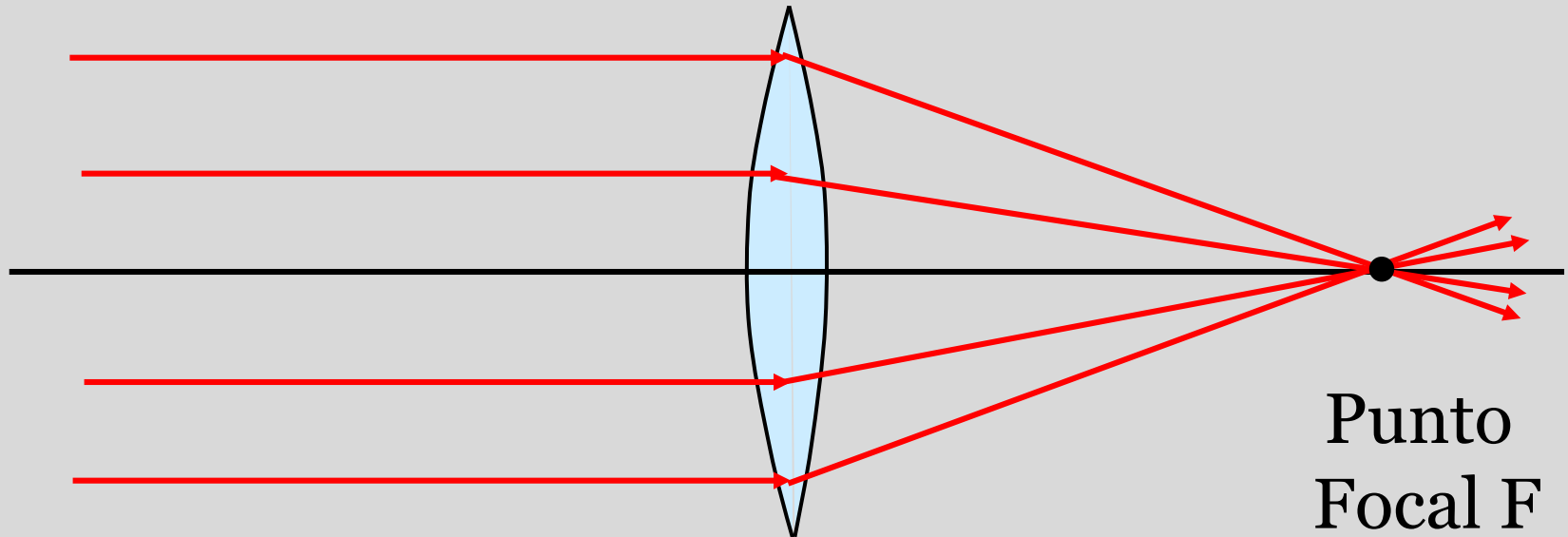
Esta ecuación se conoce como la *Ecuación del fabricante de lentes*, porque da una relación entre radios que permiten obtener la distancia focal requerida en una lente. En esta ecuación se considera que n es el índice de refracción del material con que se fabricará la lente, considerando que estará rodeada de aire, en caso de que tenga que ser sumergida en algún material, entonces n será la razón del índice del material del lente entre el índice del material que rodeará a la lente.

Tipos de lentes



Lentes divergente y convergente

Lente convergente



→ una lente convergente enfoca los rayos paralelos en un punto llamado Punto Focal o Foco de la lente

Tipos de lentes convergentes son más gruesas en la parte central que en los extremos

Según el valor de los radios de las caras pueden ser:

Biconvexas



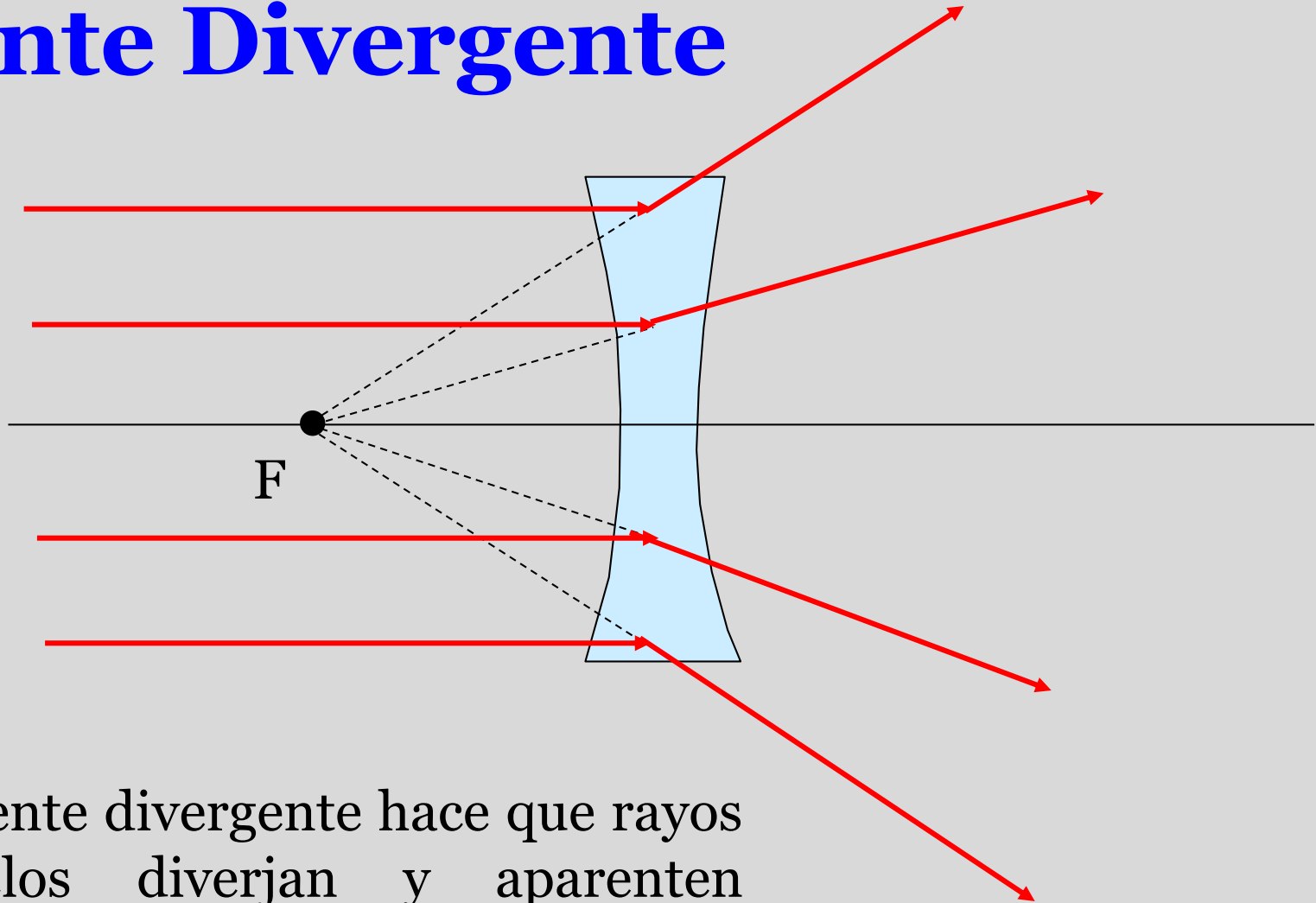
Menisco convergente



Plano convexas



Lente Divergente

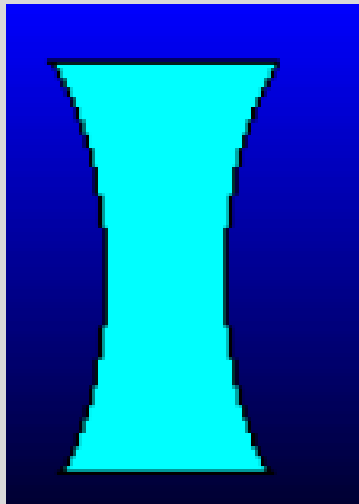


Una lente divergente hace que rayos paralelos diverjan y aparenten emerger desde el punto focal F

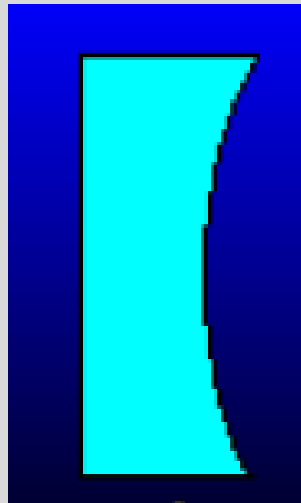
Divergentes: Son más delgadas en la parte central que en los extremos

Según el valor de los radios de las caras pueden ser:

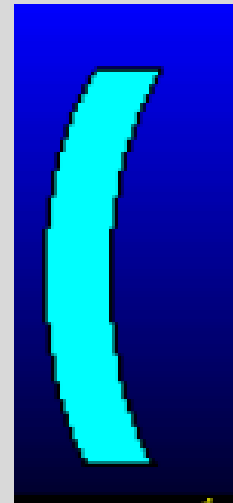
Bicóncavas



Plano cóncavas



Menisco divergente



Elementos de las lentes

Una lente está compuesta por dos superficies esféricas, cada una con su centro de curvatura. La línea que une los centros de curvatura se llama **eje principal**.

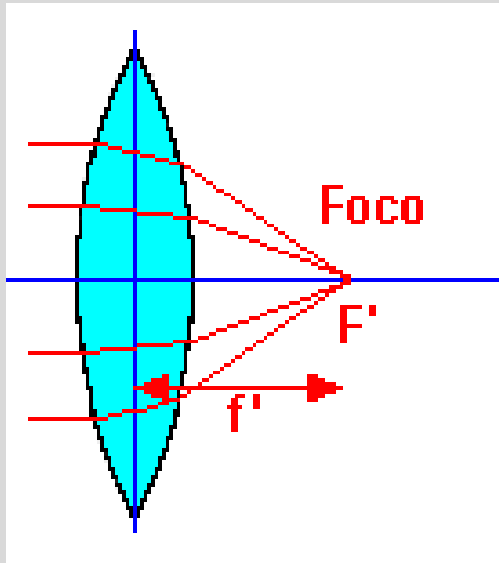


El centro geométrico de la lente es el **Centro óptico**, O.

Centro de curvatura, C y C', son los centros de las superficies que forman sus caras.

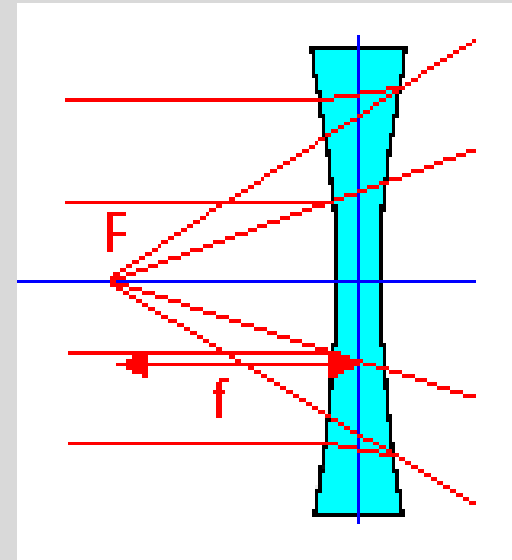
Todas las rectas que pasan por el **Centro óptico** son **ejes secundarios**.

Foco principal imagen



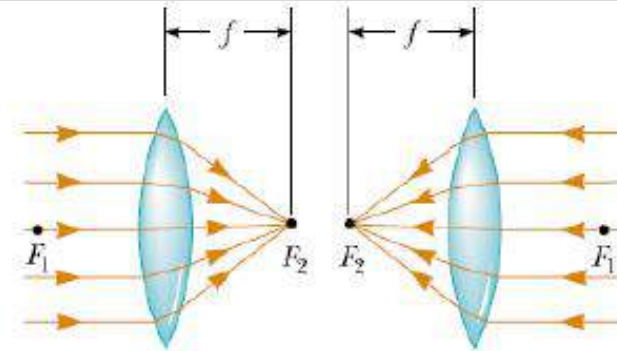
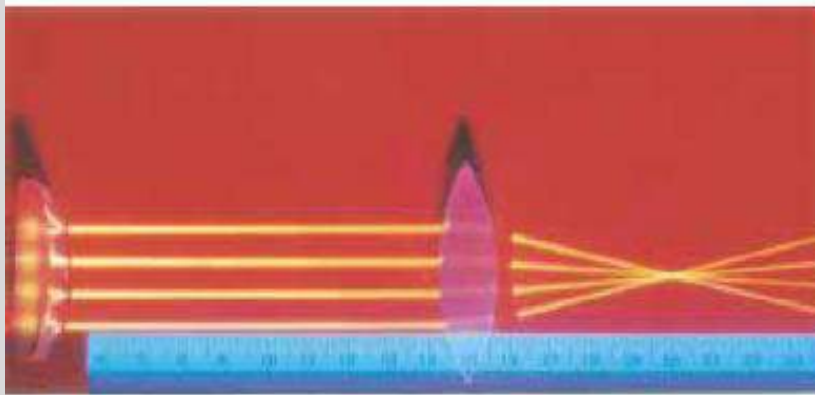
En las lentes convergentes es el punto situado sobre el eje en el que inciden los rayos que vienen paralelos al eje principal.

En las lentes divergentes es el punto del eje del que parecen divergir los rayos que vienen del infinito después de atravesarla.

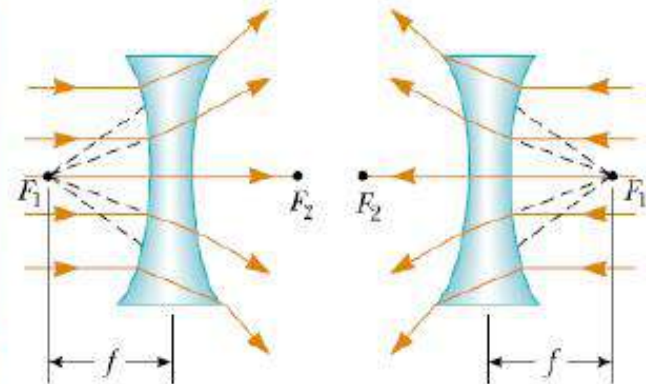
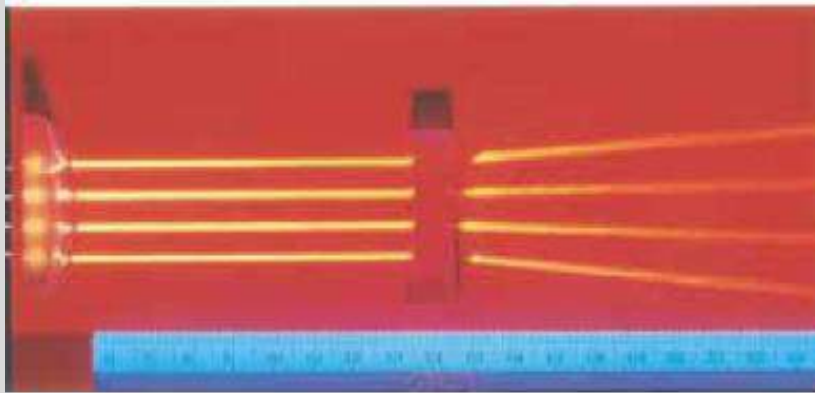


Existe un **foco objeto** y un **foco imagen**. ¿Podrías definirlos? ¿Cómo salen de la lente los rayos que parten del foco objeto?

Las **distancias focales** son las distancias entre el foco principal y el centro óptico

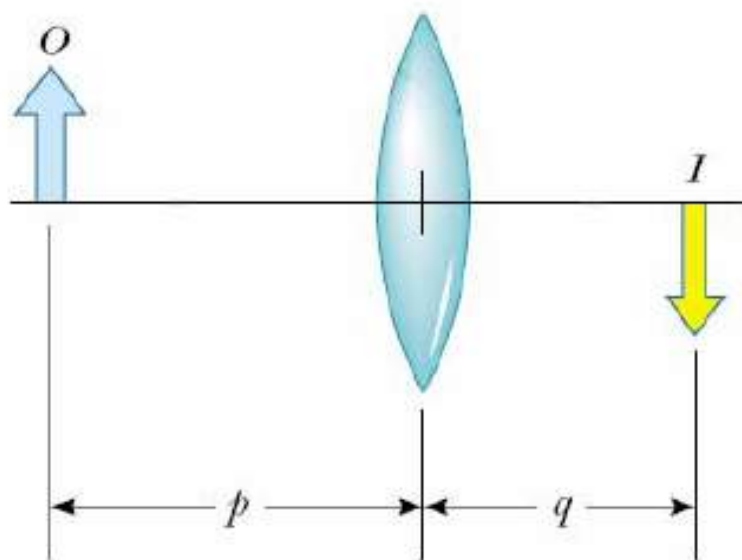


(a)



Existe un foco objeto y un foco imagen. ¿Podrías definirlos? ¿Cómo salen de la lente los rayos que parten del foco objeto?

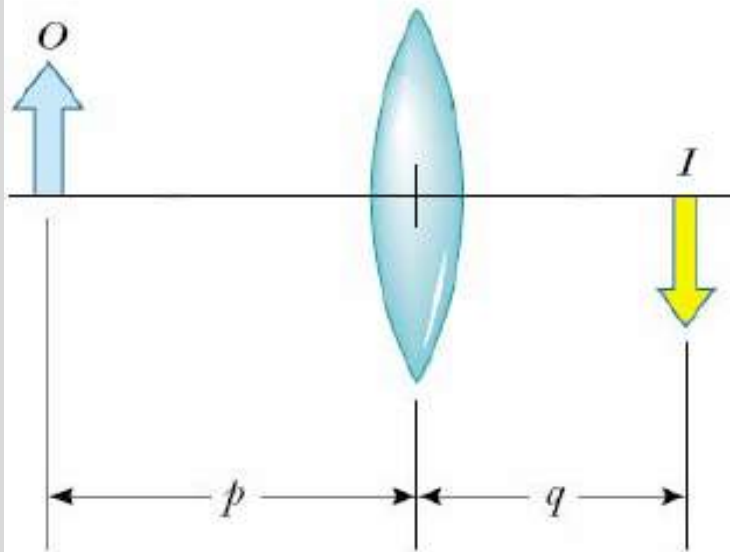
Convención de signos



Como centro de las coordenadas se toma el centro geométrico de la lente, y a través de él se traza el eje principal. Todos los puntos situados frente a la lente tienen abscisa **positiva**, y los situados detrás tienen abscisa **negativa**. Todos los puntos situados por **encima** del eje principal poseen ordenada **positiva**, y los situados **debajo**, tienen abscisa **negativa**.

La distancia focal f será **positiva** si se trata de una lente *convergente* y será **negativa** si se trata de una lente *divergente*.

Convención de signos:



Considerando que

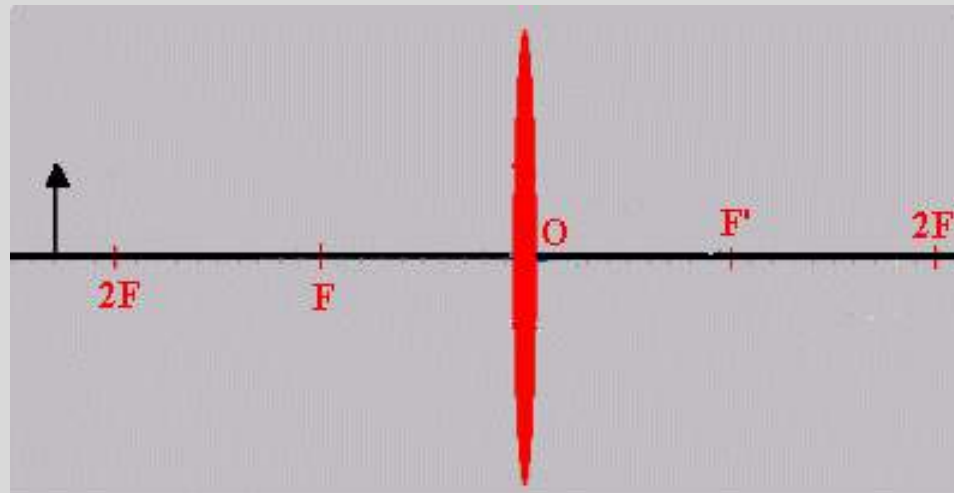
- p es la distancia del objeto al centro,
 - q es la distancia de la imagen al centro,
 - f es la distancia focal
- podemos resumir la convención en la siguiente figura:



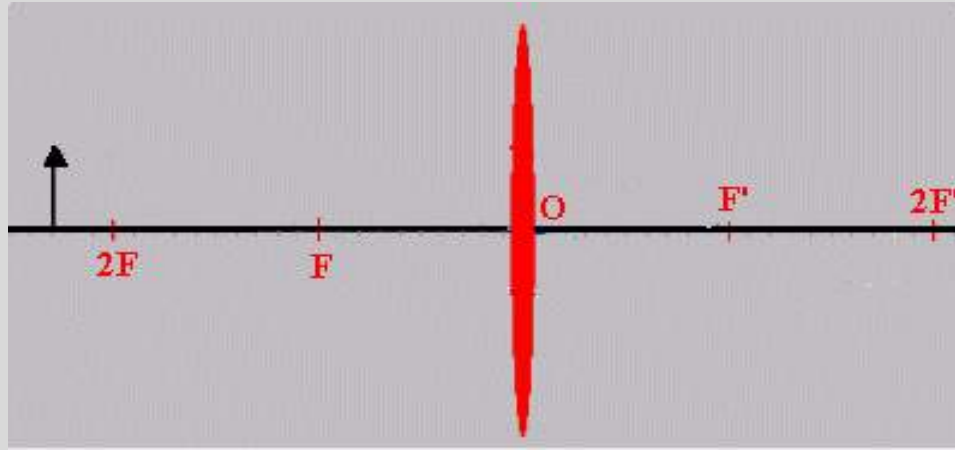
Reglas de construcción de imágenes en las lentes.

Las trayectorias de los infinitos rayos que salen de un objeto están definidas por estas reglas:

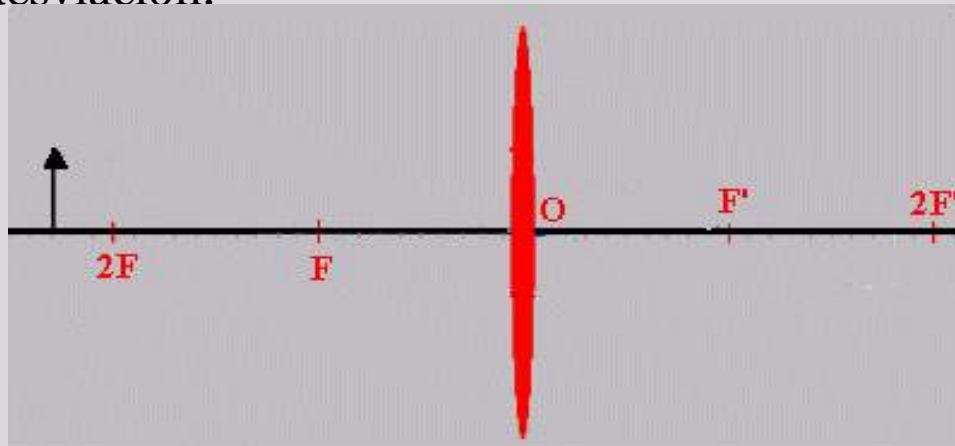
Todo rayo que viaja paralelo al eje óptico antes de entrar en la lente, pasa, al salir de ella, por el foco imagen, F' .



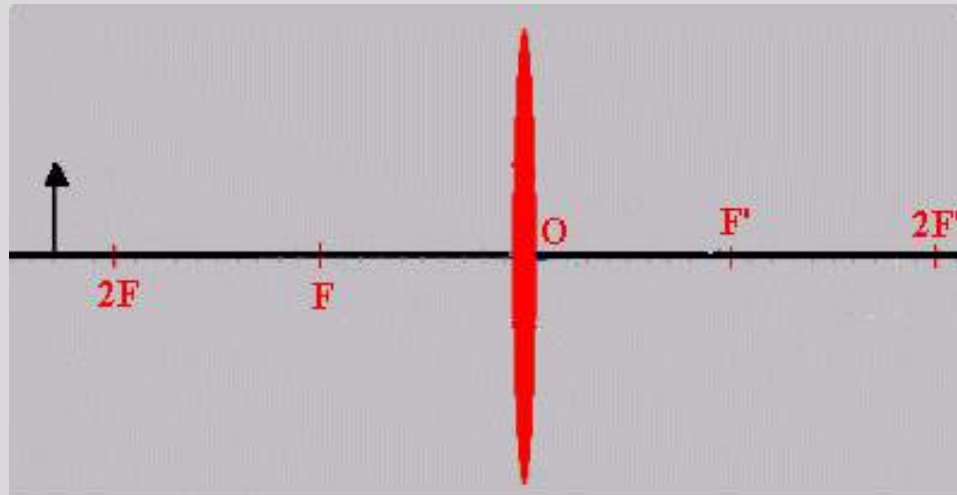
Todo rayo que pasa por el foco objeto, F , llega a lente y se refracta en ella, emergiendo paralelo al eje óptico.



Todo rayo que pasa por el centro óptico (que es el centro geométrico de la lente) no sufre desviación.



Para localizar el punto imagen que de un objeto de una lente, se debe construir al lo menos la trayectoria de dos de los rayos mencionados justo anteriormente . **En el punto de cruce se forma el punto imagen**



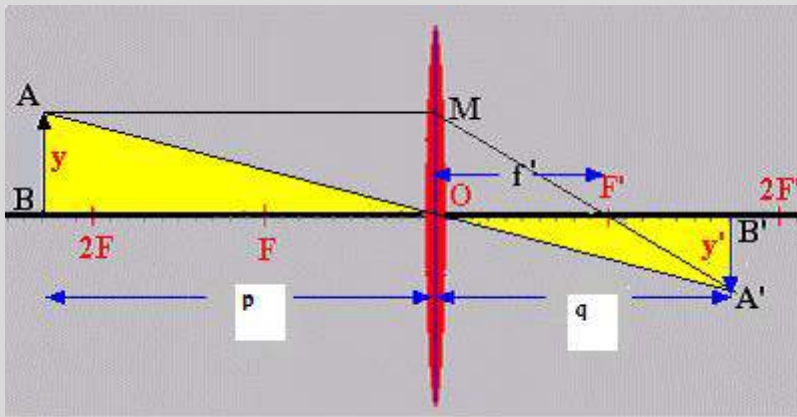
Lentes delgadas: Fórmulas

La fórmula de las lentes delgadas permite relacionar la posición del objeto y de la imagen con la distancia focal.

Esta es la fórmula:

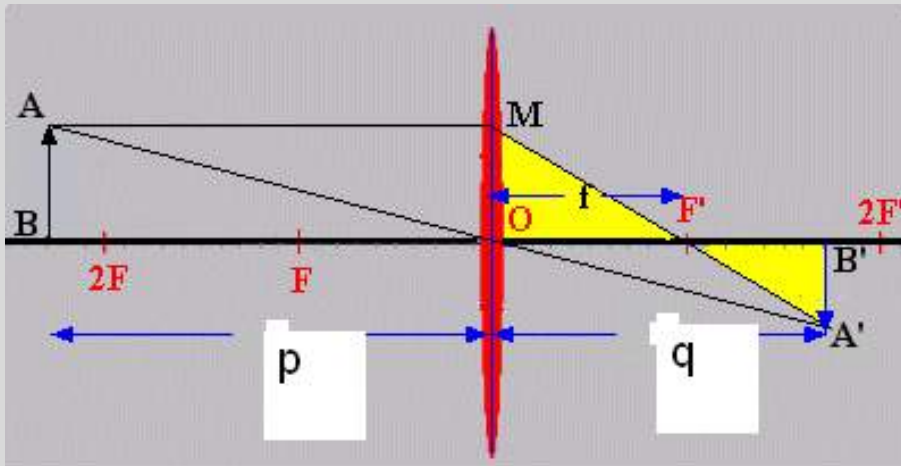
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Vamos a deducirla mediante relaciones geométricas sencillas. También se deduce a partir de la fórmula de refracción en superficies curvas.



En los triángulos semejantes amarillos **ABO** e **OA'B'**, limitados por el objeto, la imagen y la lente, podemos establecer:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB} \Rightarrow \frac{\text{imagen}}{\text{objeto}} = \frac{q}{p}$$



En los triángulos OMF' e o F'A'B'

$$\frac{A'B'}{OM} = \frac{F'B'}{OF'}$$

$$\frac{A'B'}{OM} = \frac{F'B'}{OF'} = \frac{q - f}{f} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\text{imagen}}{\text{objeto}} = \frac{q - f}{f}$$

Igualando las dos relaciones:

$$\frac{q}{p} = \frac{q - f}{f} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Imágenes en lentes

Magnificación:

De manera similar a los espejos, para el caso de lentes, se define la magnificación M de una lente como la relación entre los tamaños de la imagen (h') y del objeto (h), es decir

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$

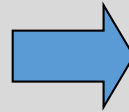
Una magnificación mayor que 1 significa una amplificación, mientras que si M es menor que uno tenemos una reducción en el tamaño.

El signo de M también es importante, si M es positiva entonces la imagen está derecha y del mismo lado que el objeto, mientras que una M negativa significa que la imagen está invertida y en el lado opuesto al objeto.

Aumento

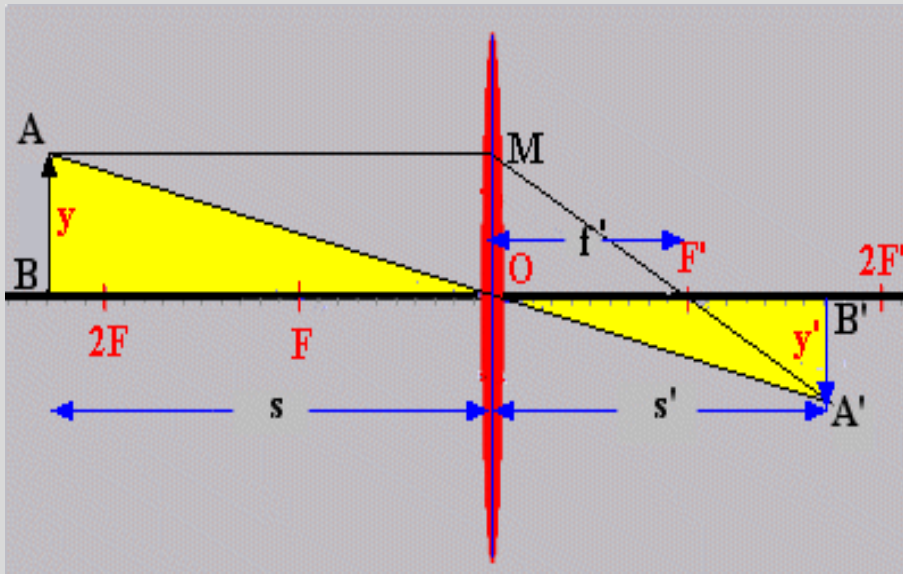
Aumento lateral de una lente es el cociente entre la altura de la imagen y la altura del objeto.

Aumento lateral = $\frac{\text{altura de la imagen}}{\text{altura del objeto}}$



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

Para demostrar esta fórmula establecemos relaciones geométricas en los triángulos de la figura siguiente:



En los triángulos semejantes BAO e OB'A' establecemos

$$\frac{B'A'}{BA} = \frac{s'}{s}$$

Como $B'A' = y'$, $BA = y$

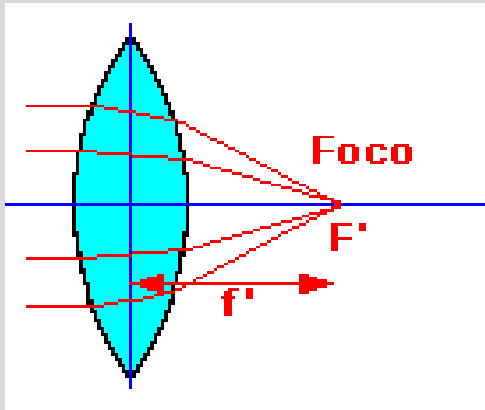
Aplicando el criterio de signos ("s" e "y" son negativos):

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

Potencia de las lentes

La potencia de una lente es la inversa de su distancia focal imagen

$$P = \frac{1}{f'}$$



La potencia se mide en m^{-1} y se conoce como dioptría.

Una dioptría es la potencia de una lente que tiene una distancia focal imagen de 1 m.

$$f = +0.20 \text{ m} \rightarrow P = +5.0 \text{ dioptrías}$$

$$f = -0.40 \text{ m} \rightarrow P = -2.5 \text{ dioptrías}$$

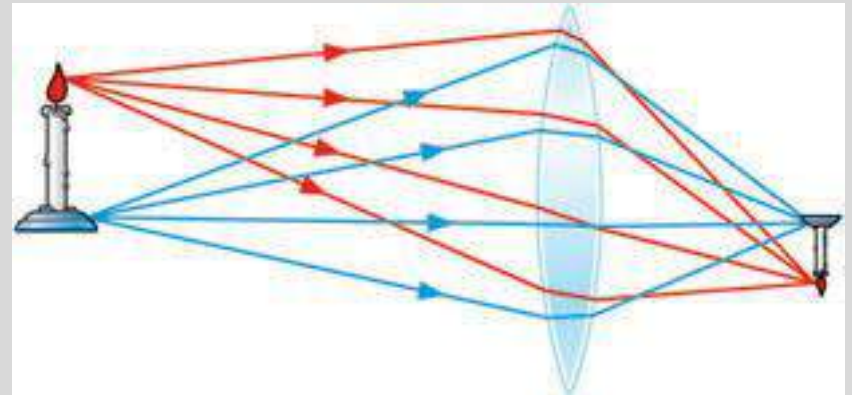
El signo de la potencia es el mismo que el de la distancia focal imagen, por lo que siguiendo las convenciones de signos la potencia de una lente convergente es positiva, $P > 0$.

La potencia amplificadora manifiesta la capacidad de la lente para aumentar la imagen, pero con la capacidad de aumento del cerebro humano, que lleva desde lo más grande a lo más pequeño del Universo.

Objetos Extendidos

Formación de la imagen según la posición del objeto

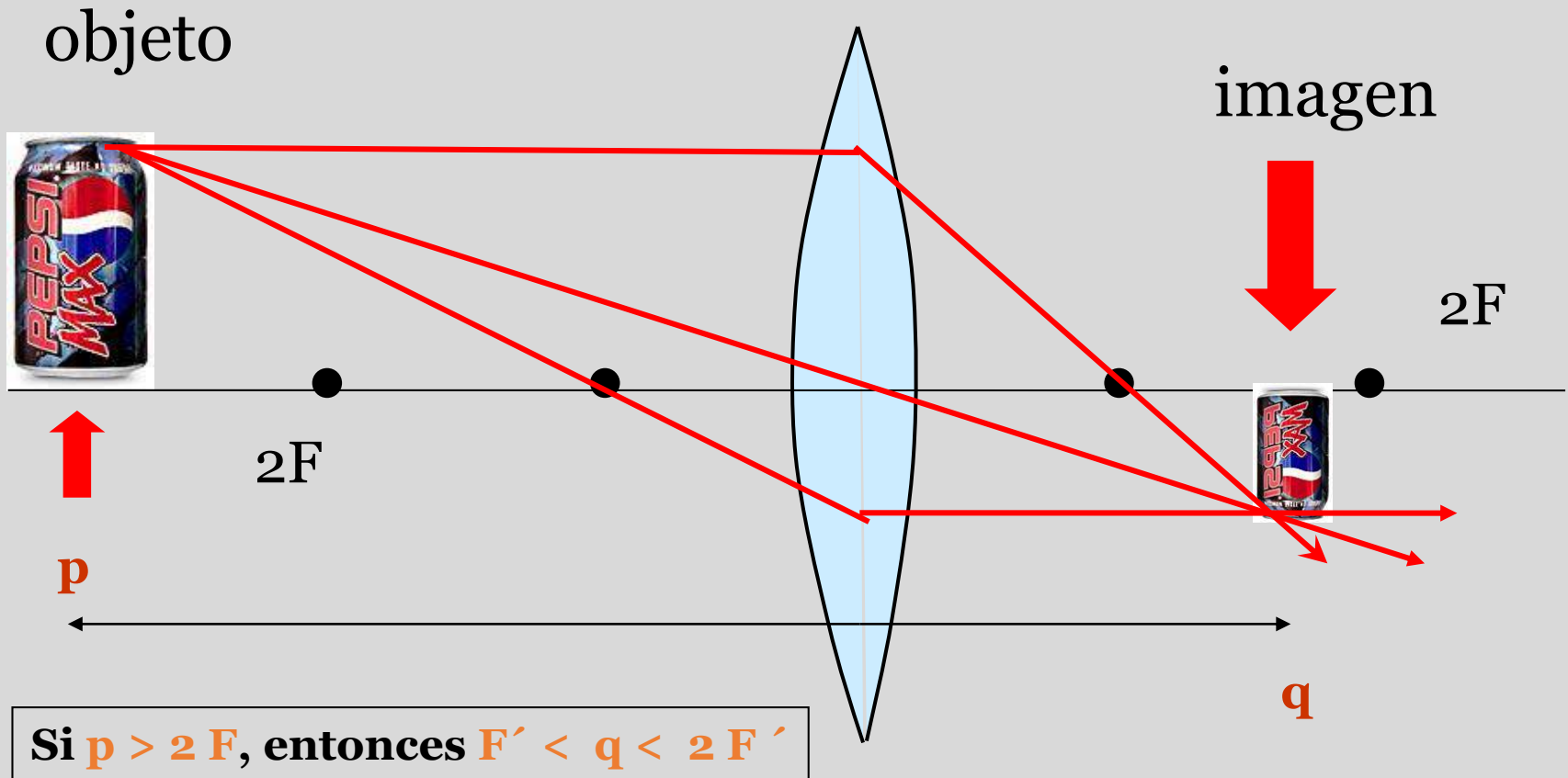
Las imágenes de objetos extendidos se encuentran mediante el trazo de rayos que emergen desde la parte alta y baja del objeto.



Existen diferentes situaciones que veremos a continuación

1.- Si el objeto está situado entre $2F$ y el infinito (menos infinito), la imagen estará entre F' y $2F'$ y será invertida, real y más pequeña.

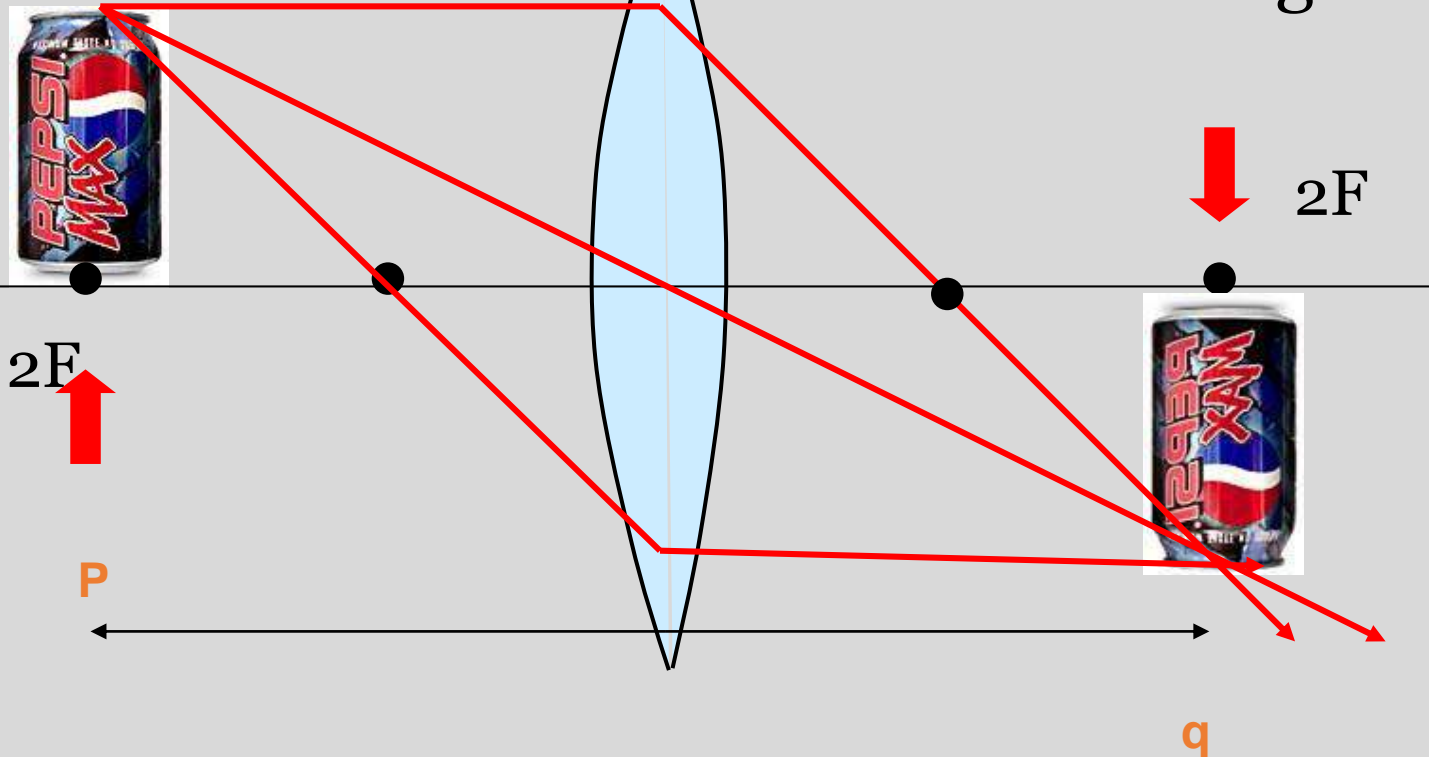
Llamemos P a la distancia del objeto a la lente y q a la de la imagen a la lente.



2.- Si el objeto está situado en $2F$, la imagen estará en $2F'$, y será igual, invertida y real.

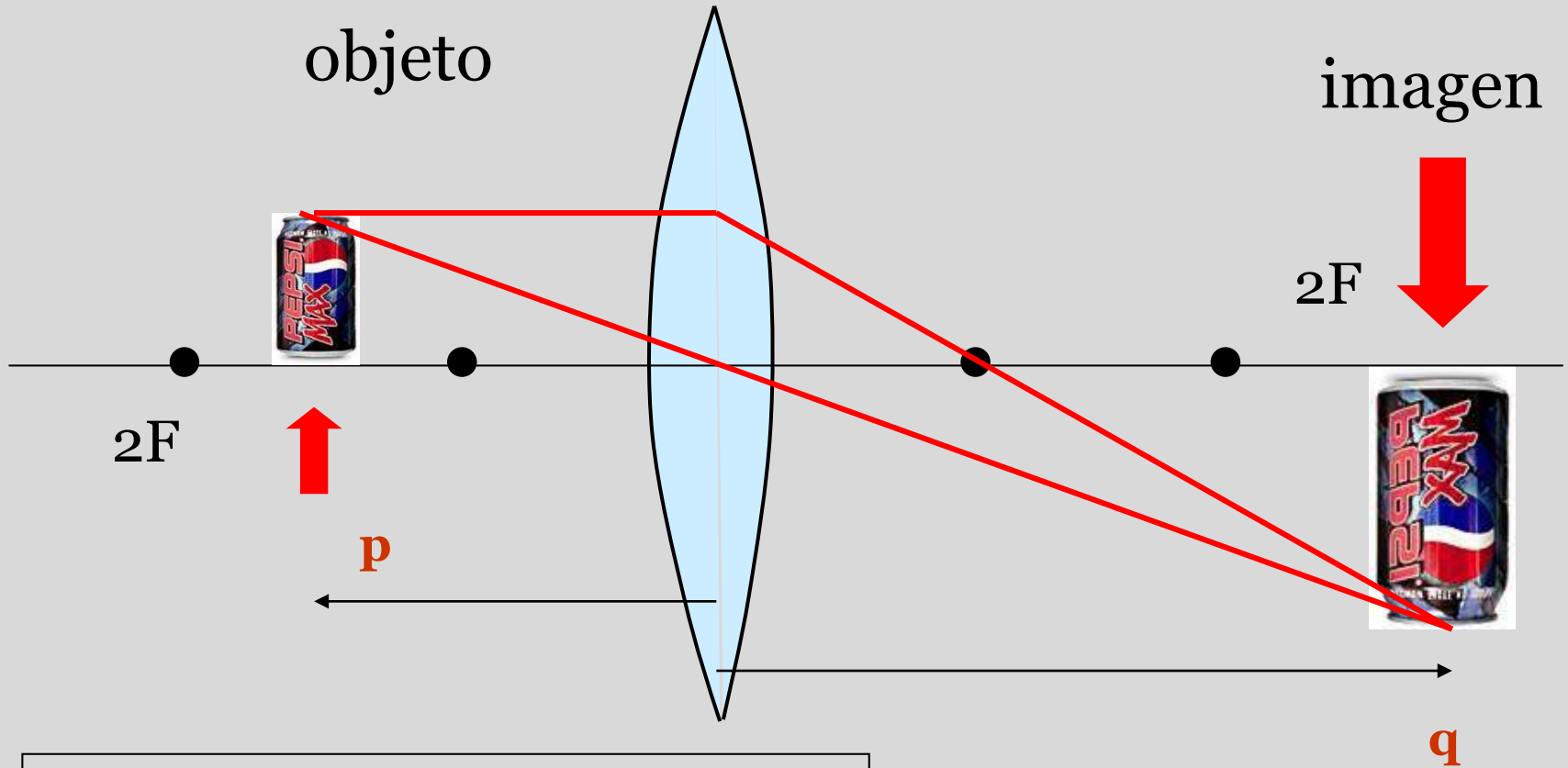
objeto

imagen



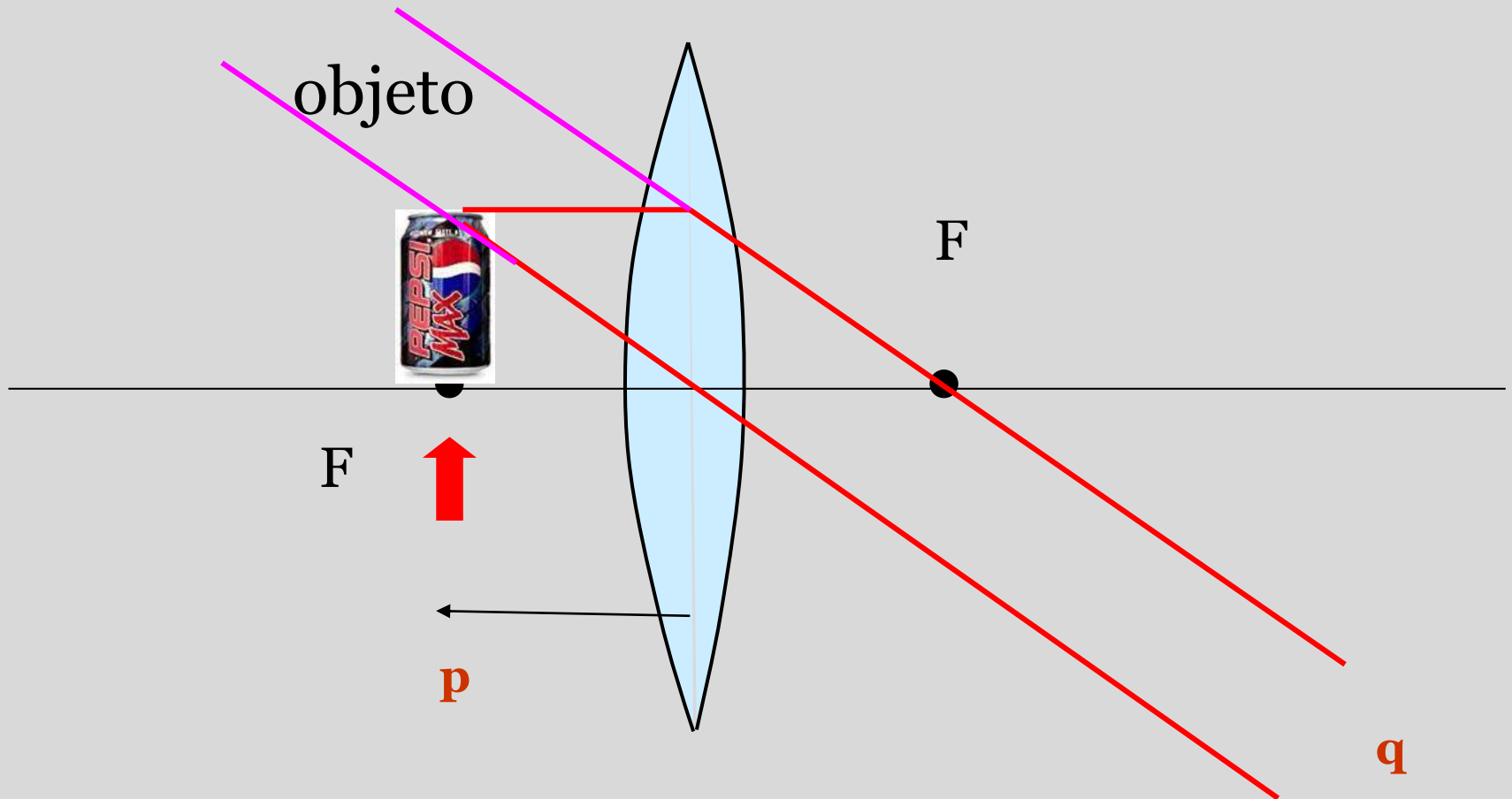
Si $P = 2F$ entonces $q = 2F'$

3.- Si el objeto está situado entre $2F$ y F , la imagen estará situada más allá de $2F'$ y será mayor, invertida y real.



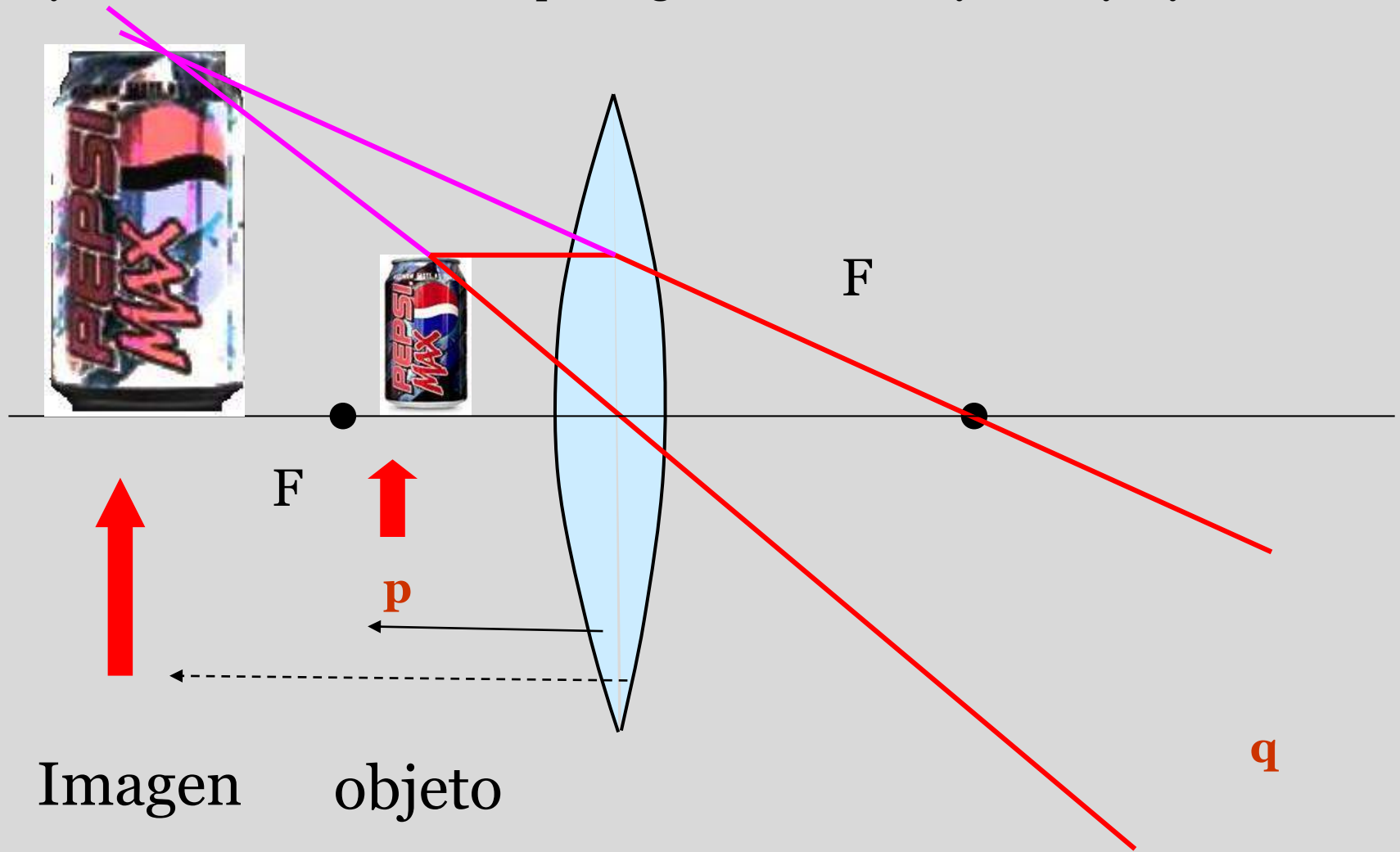
Si $2F > p > F$ entonces ; $q > 2F'$

4.- Si el objeto está situado en **F** la imagen no se forma (se formaría en el infinito)

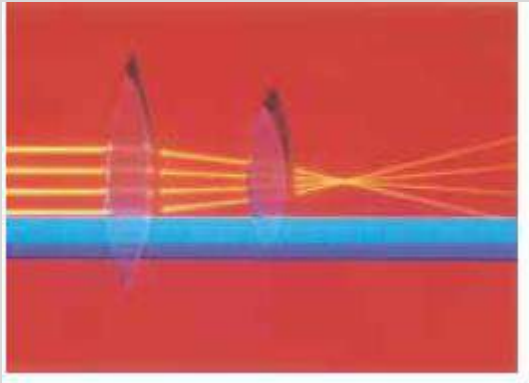


Si $F > p$ entonces ; q esta en e infinito

5.- Si el objeto está situado entre F y la lente, la imagen estará entre F y el infinito y será virtual (la forman las prolongaciones de los rayos), mayor y derecha.



Combinación de lentes



$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

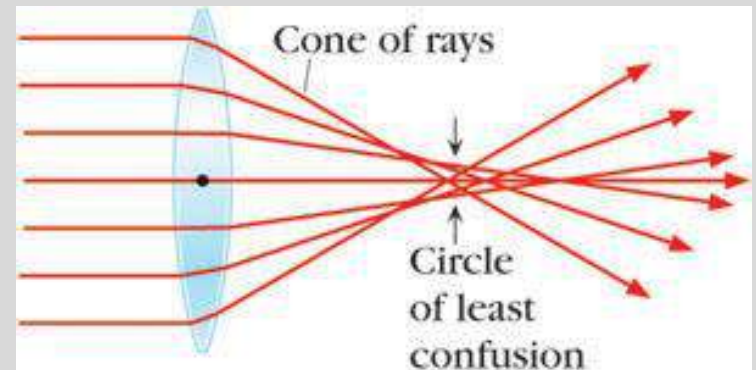
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Aberración de lentes

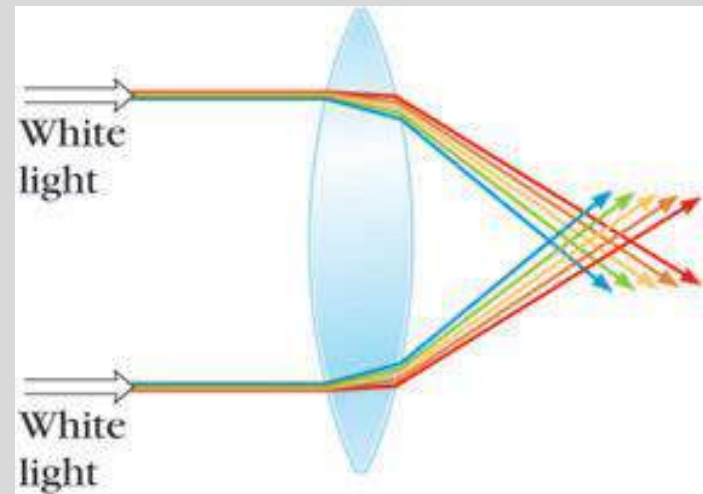
■ Aberración esférica

- Rayos de los extremos se refractan mas que los del centro



■ Aberración cromática

- El punto focal depende de n
- n depende de λ
- $n_{\text{violet}} > n_{\text{red}}$



Instrumentos ópticos



Instrumentos ópticos.

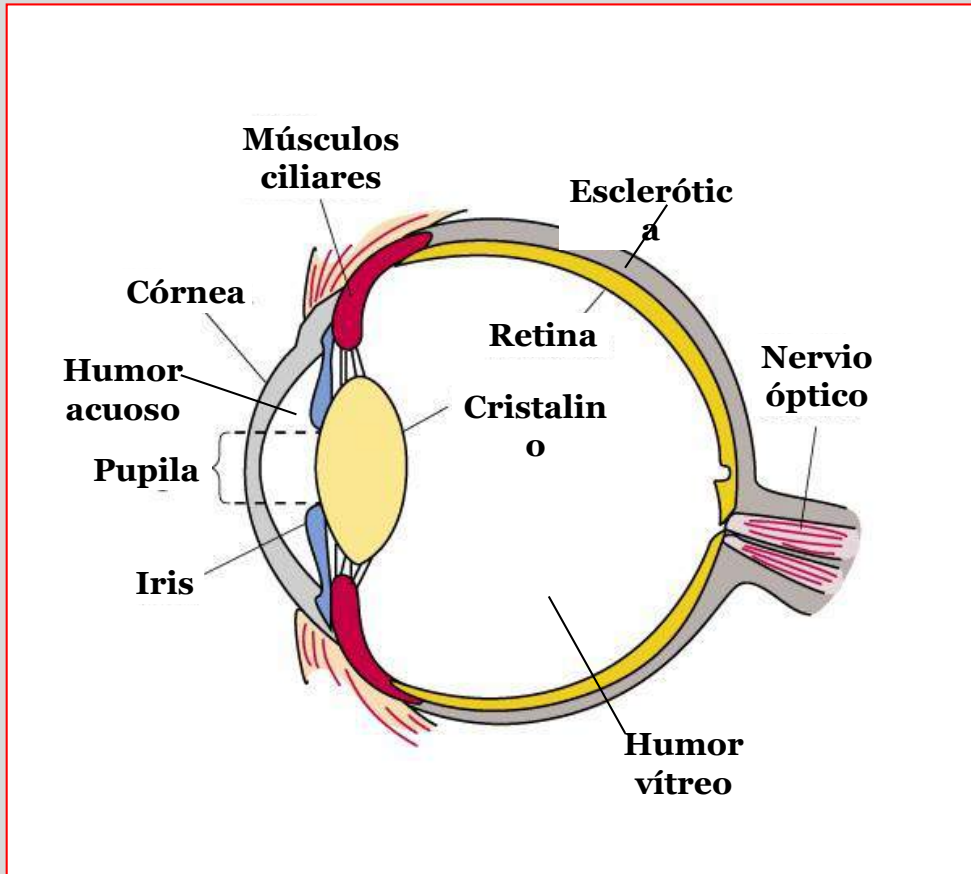
1. Introducción.
2. El ojo humano.
3. Instrumentos subjetivos u oculares.
4. La lupa.
5. El microscopio.
6. El telescopio.
7. Instrumentos objetivos o de proyección.
8. Cámara fotográfica.
9. El sistema de proyección.

Introducción

- El sistema o instrumento óptico más importante es el ojo.
- El resto de los instrumentos ópticos se pueden clasificar en instrumentos subjetivos también llamados oculares o de visión directa y en instrumentos objetivos o de proyección.
- Los instrumentos subjetivos forman imágenes virtuales que son observadas directamente por el ojo. Dentro de estos se encuentran:
 - La lupa.
 - El microscopio.
 - Anteojo o telescopio.
- Los instrumentos objetivos forman imágenes reales las cuales se recogen sobre una pantalla. Dentro de estos se encuentran:
 - La cámara fotográfica.
 - El sistema de proyección.

El ojo humano

Estructura del ojo



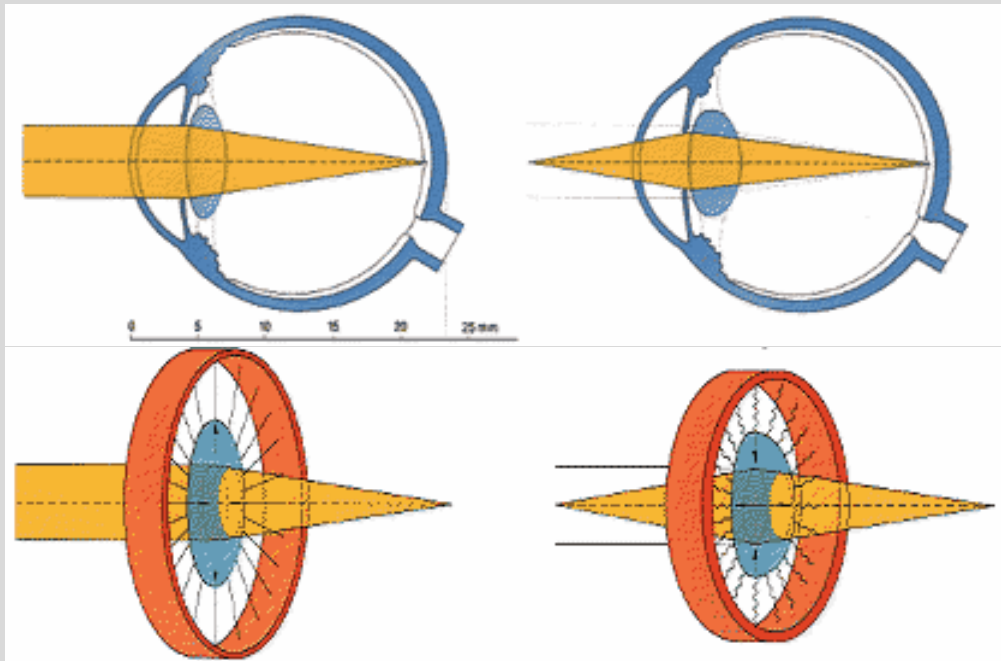
Índices de refracción:

- Córnea (1.376)
- Humor acuoso (1.336)
- Humor vítreo (1.336)
- Cristalino
- Centro (1.406)
- Borde (1.386)

Funcionamiento del ojo

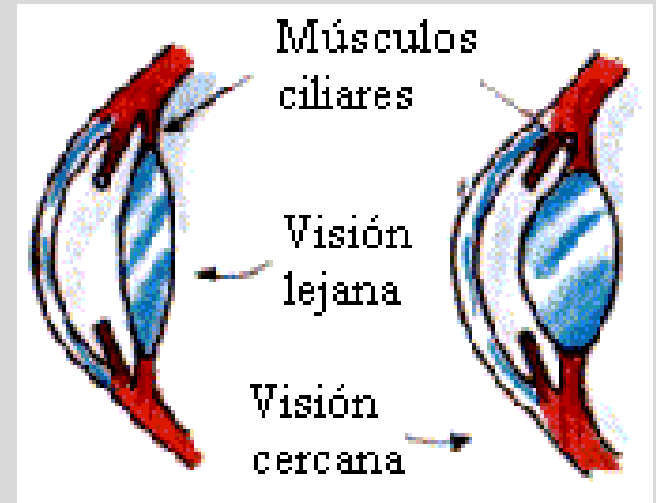
Visión sin acomodación

Visión con acomodación



Músculo relajado

Músculo contraído



Puntos cercanos

10 años	7 cm
25 años	12 cm
45 años	28 cm
50 años	40 cm
60 años	100 cm
70 años	400 cm

Conceptos de **punto lejano** y **punto cercano**

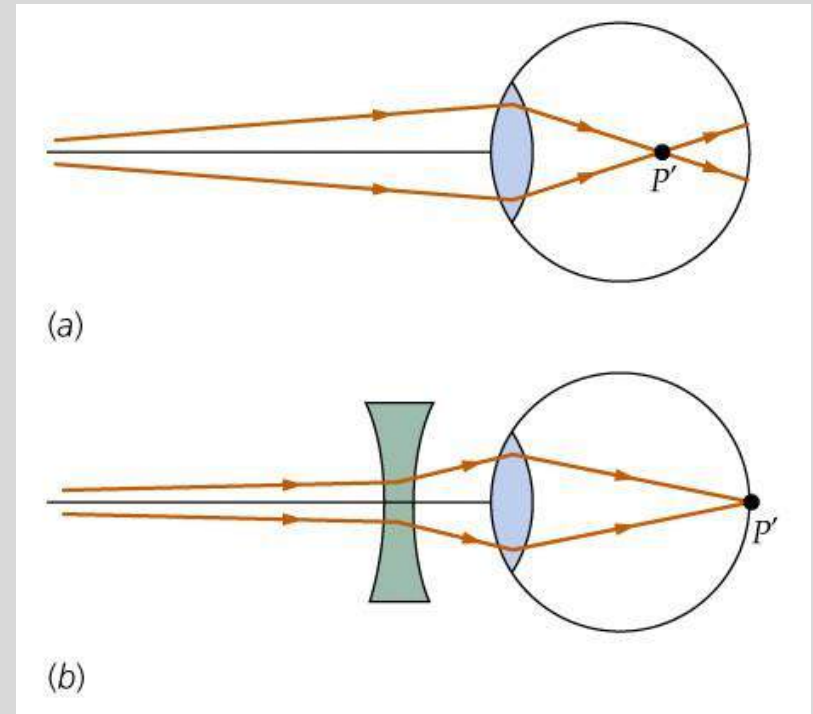
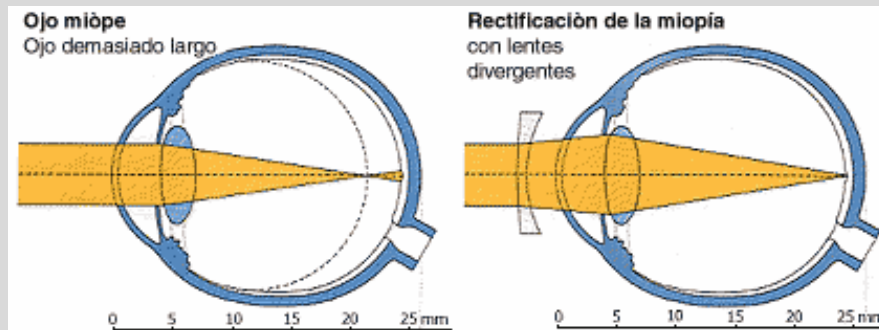
Defectos de la visión

Miopía

El ojo tiene una excesiva **convergencia** y cuando se encuentra relajado las imágenes de objetos alejados caen delante de la retina.

El **punto lejano** y el **punto cercano** se encuentran más próximos que en el ojo normal.

Los síntomas de la **miopía** se corrigen al colocar una lente divergente o negativa frente al ojo.

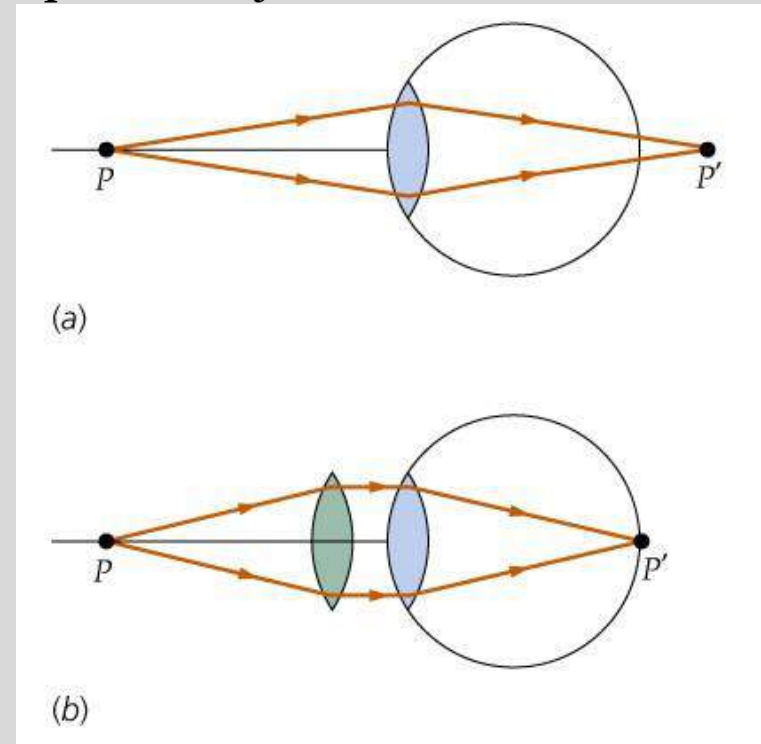
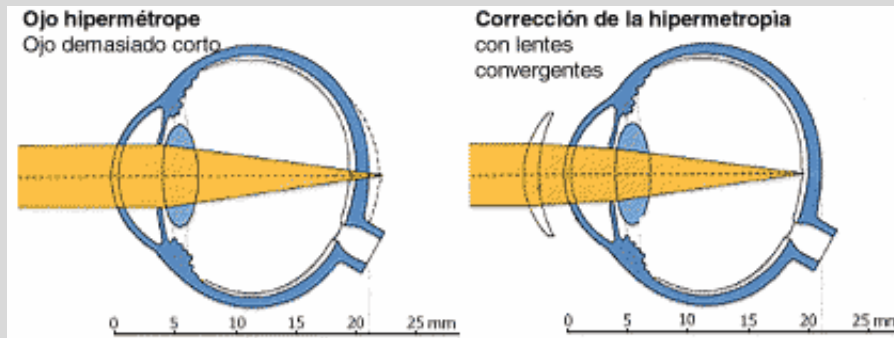


Hipermetropía

El ojo tiene **menos** convergencia que el ojo normal y cuando se encuentra relajado las imágenes de objetos alejados caen detrás de la retina.

El **punto lejano** se encontrará en el infinito como en el ojo normal, pero el **punto cercano** se encuentran más alejado que en el ojo normal.

Los síntomas de la **hipermetropía** se corrigen al colocar una **convergente o positiva** frente al ojo.

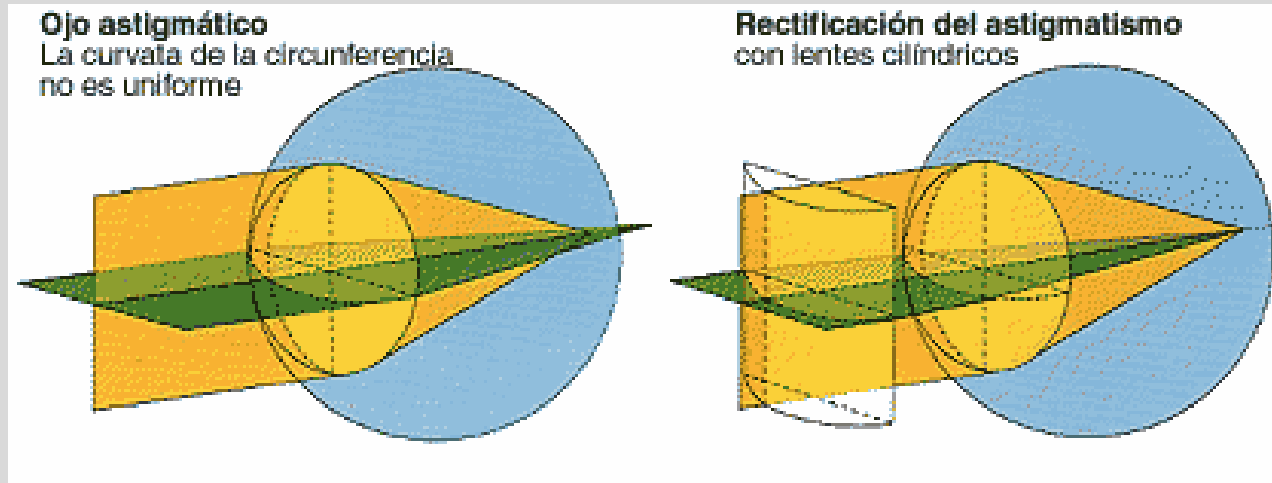


Presbicia

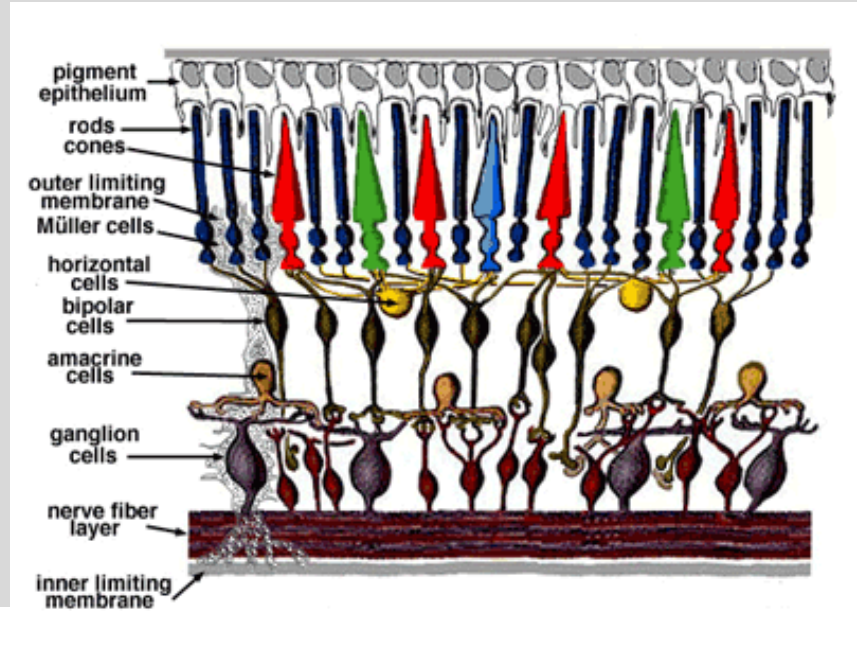
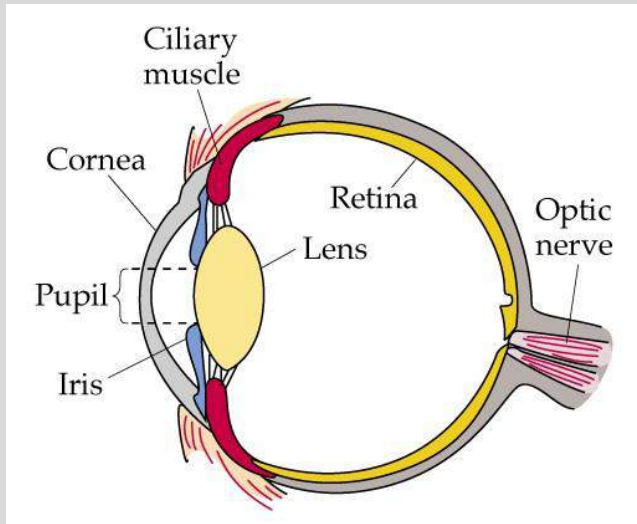
Al **perder flexibilidad el cristalino** con la edad se produce un **alejamiento del punto cercano**. Se corrige mediante una lente convergente.

Astigmatismo

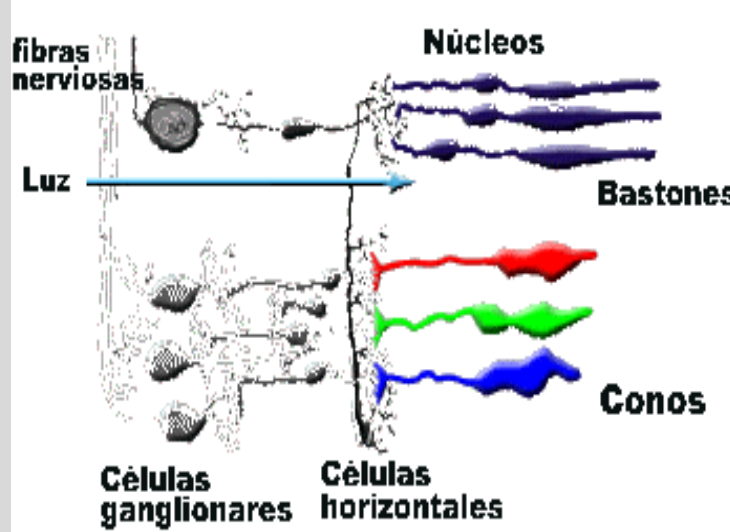
Se origina cuando la **córnea no es perfectamente esférica** y se encuentra más curvada en un plano que en el otro. Se corrige con **lentes cilíndricas**.



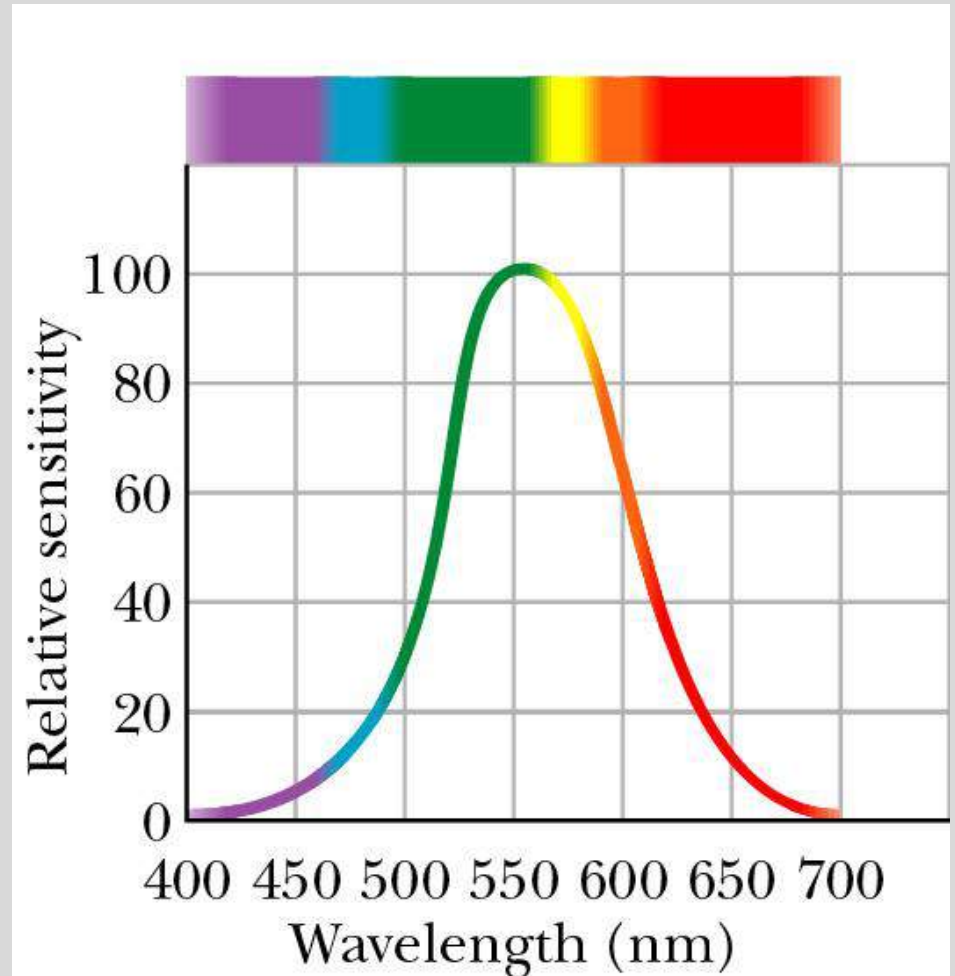
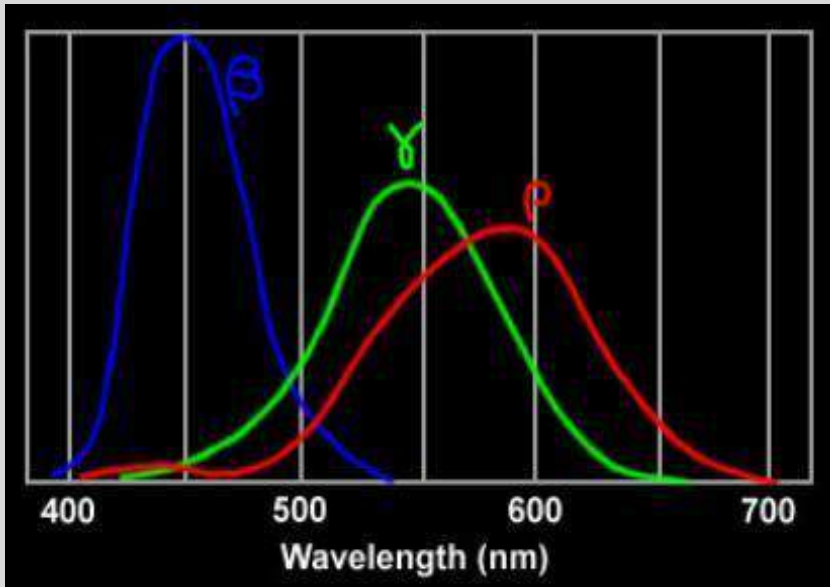
La Retina



La Retina

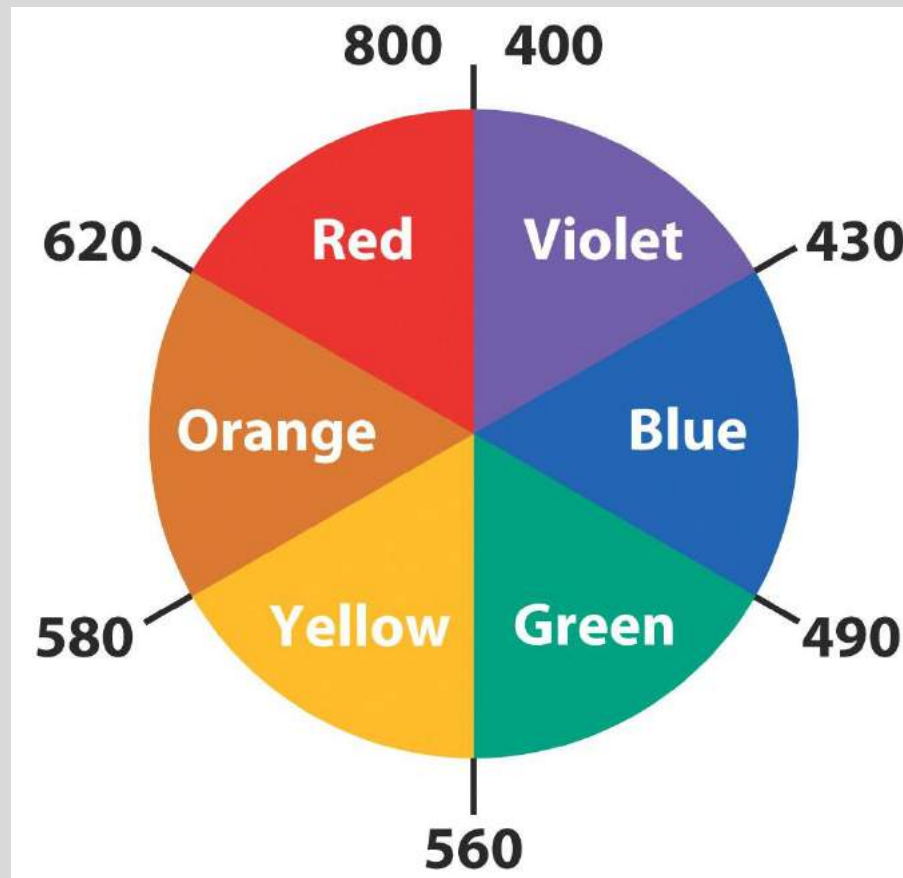


Sensibilidad de ojo humano

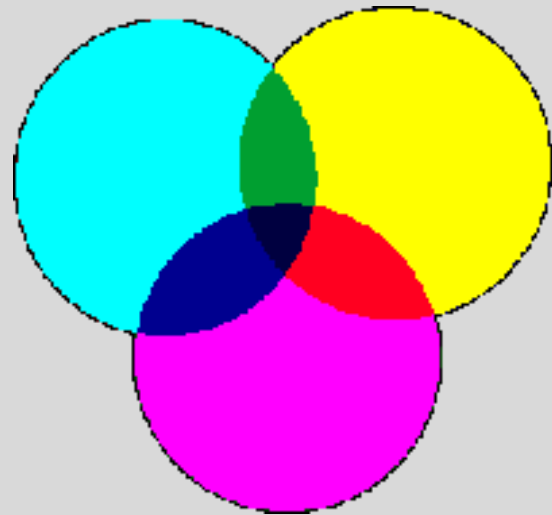
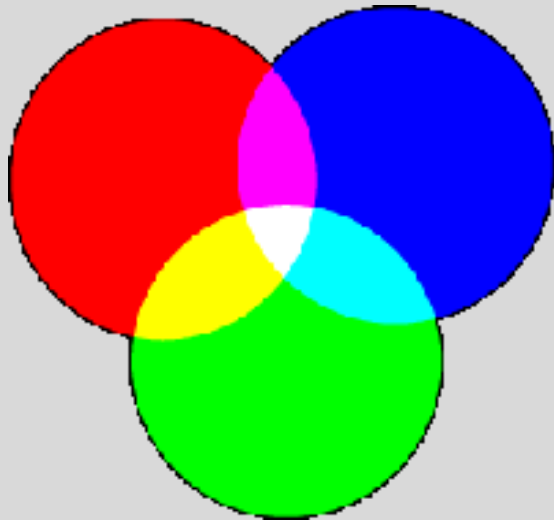


Colores Complementarios

La absorción y la percepción de las bandas espectrales son diametralmente opuestas en el círculo del color



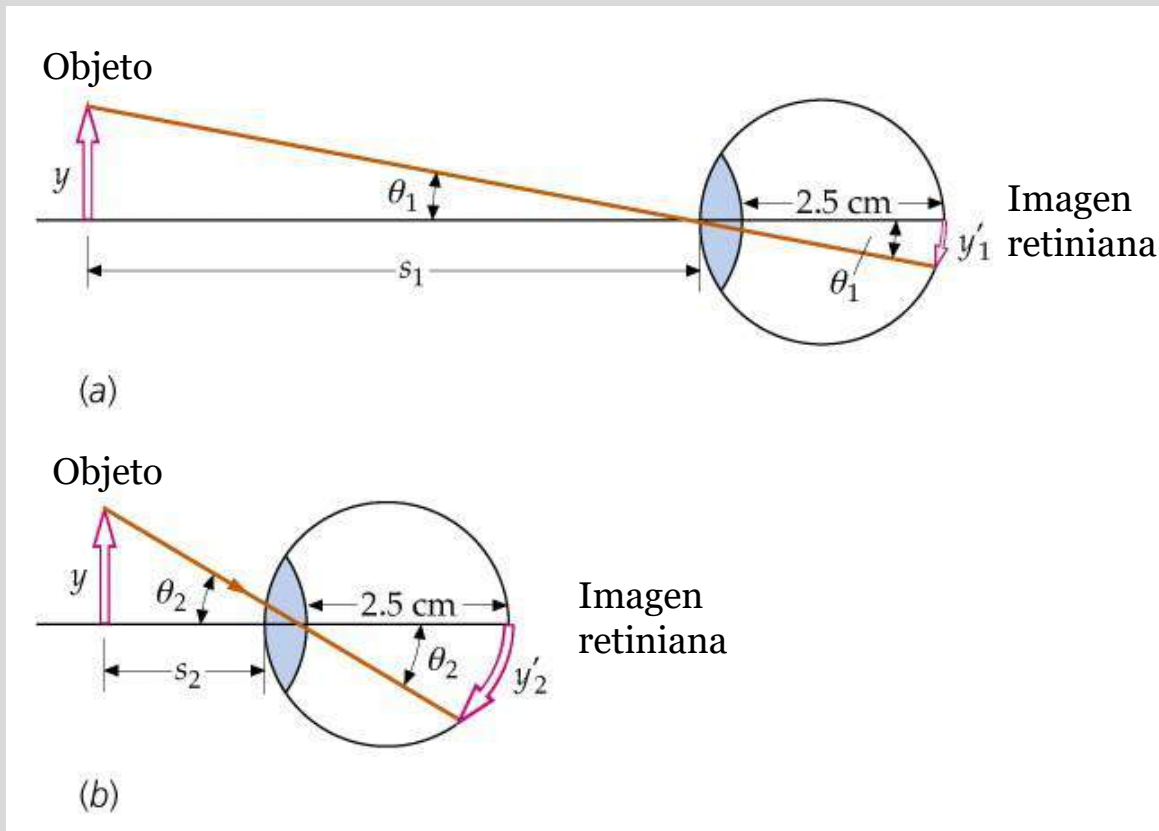
Suma de colores



Instrumentos subjetivos u oculares

Punto cercano

Tamaño aparente de los objetos en la retina dependen del ángulo θ subtendido. Este ángulo toma su valor máximo cuando el objeto se encuentra en su punto cercano.



De la figura

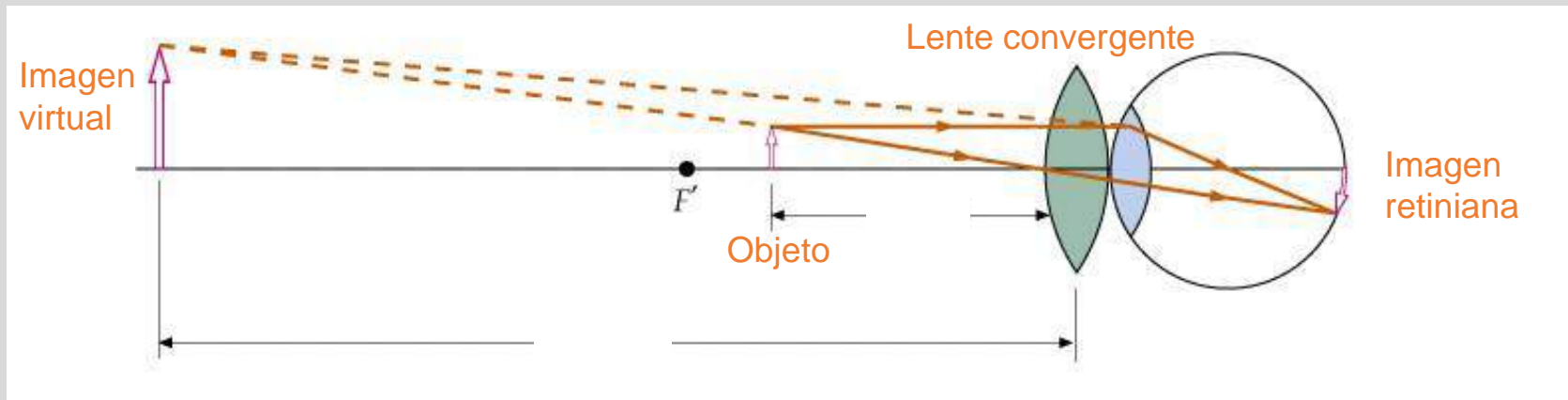
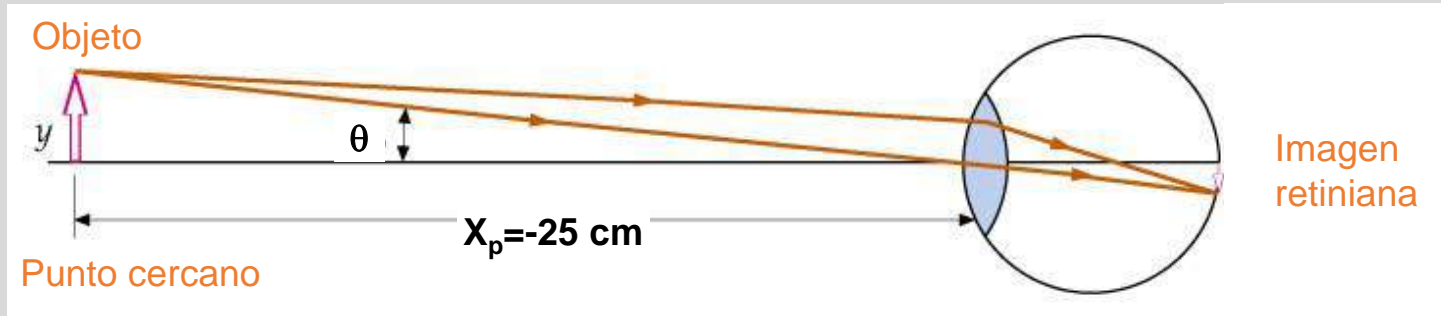
$$\theta = \frac{y'}{2.5}$$

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{y}{s}$$

Combinándolas

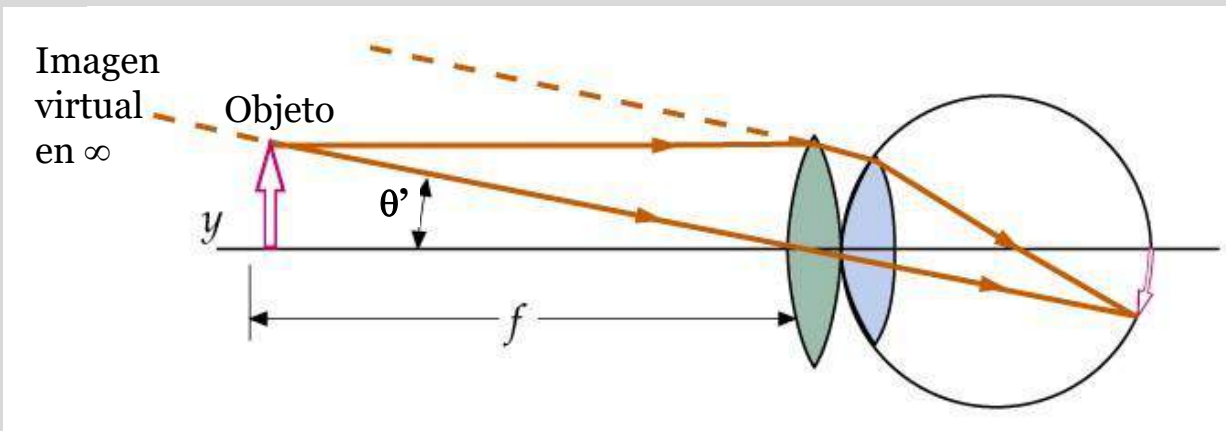
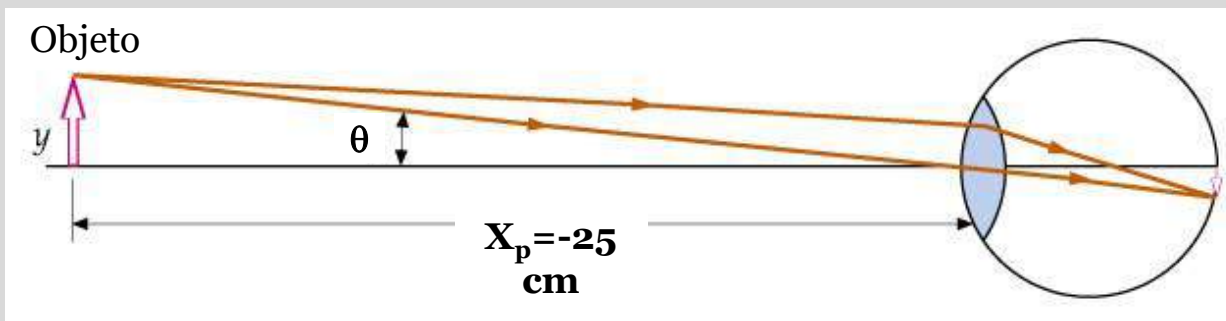
$$y' = 2.5\theta \approx 2.5 \frac{y}{s}$$

La lupa



La función de la lupa es proporcionar una imagen de un objeto cercano que sea mayor que la que ve el objeto por si mismo.

Se define el aumento angular o amplificación angular como $M = \frac{\theta'}{\theta}$



De las figuras

$$\theta = \frac{y}{-x_p} = \frac{y}{25}$$

$$\theta' = \frac{y}{-f} = \frac{y}{f'}$$

Combinándolas

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{-x_p}{f'} = \frac{25}{f'}$$

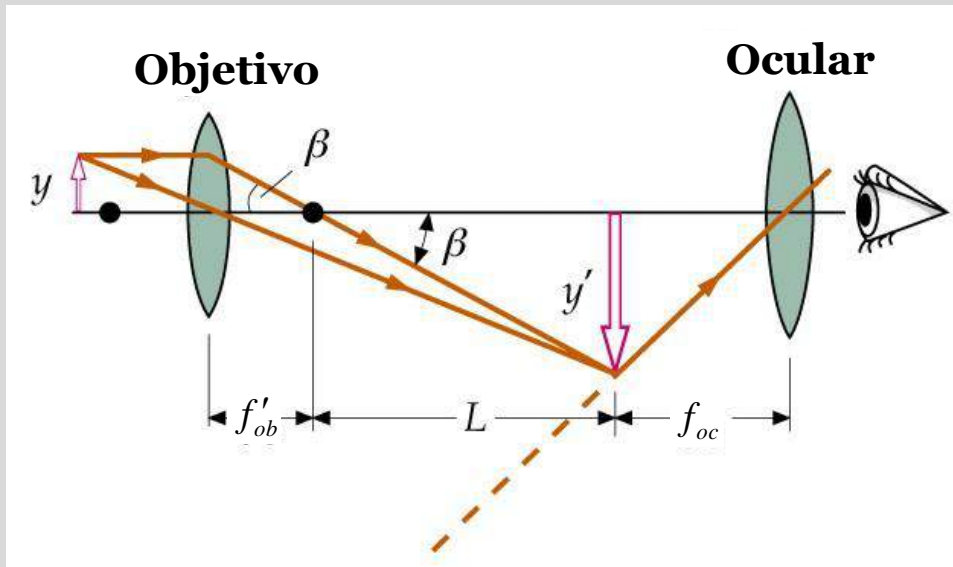
El microscopio

Objetivo: Su función es producir una imagen real y aumentada del objeto.
 $(f < 1\text{cm})$

Ocular: Funciona como una lupa. $(f \sim \text{cm})$

Longitud del tubo (L): Distancia entre foco imagen de objetivo y foco objeto de ocular $(L \gg f_{ob} \text{ y } f_{ocular})$

De la figura



$$\tan \beta = \frac{y}{f'_{ob}} = -\frac{y'}{L}$$

Aumento lateral del objetivo

$$m_{ob} = \frac{y'}{y} = -\frac{L}{f'_{ob}}$$

Aumento angular del ocular

$$M_{oc} = -\frac{x_p}{f'_{oc}}$$

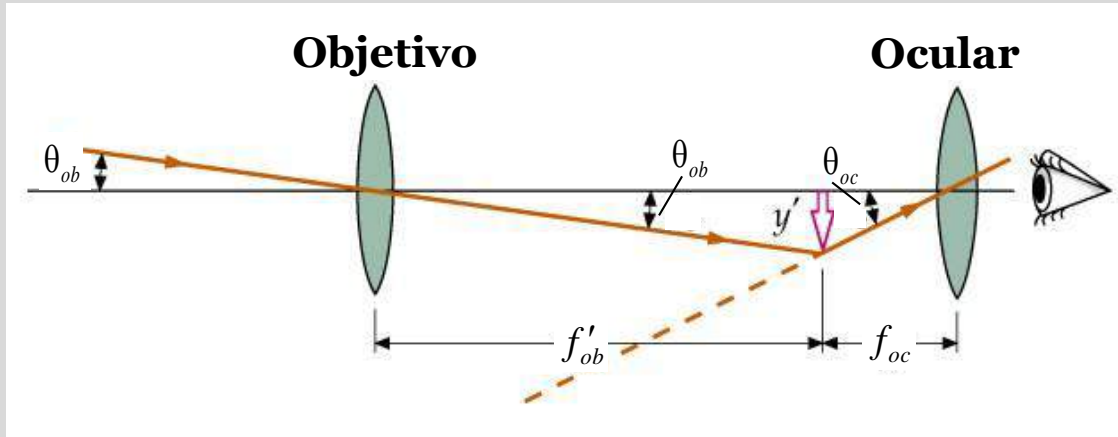
Poder amplificador del microscopio

$$M = m_{ob} M_{oc} = \frac{L}{f'_{ob}} \frac{x_p}{f'_{oc}}$$

El telescopio

Objetivo: Su función es producir una imagen real y menor del objeto.

Ocular: Funciona como una lupa.



Telescopio refractor

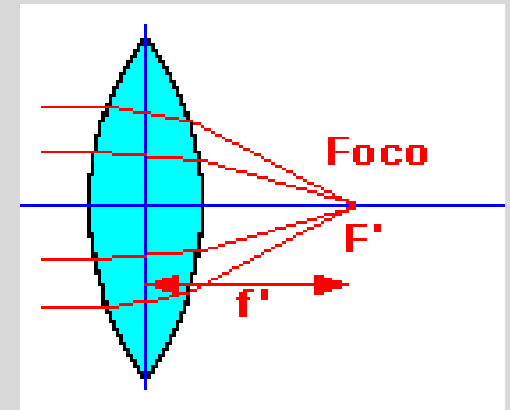
Poder amplificador del telescopio $M = \frac{\theta_{oc}}{\theta_{ob}}$

De la figura

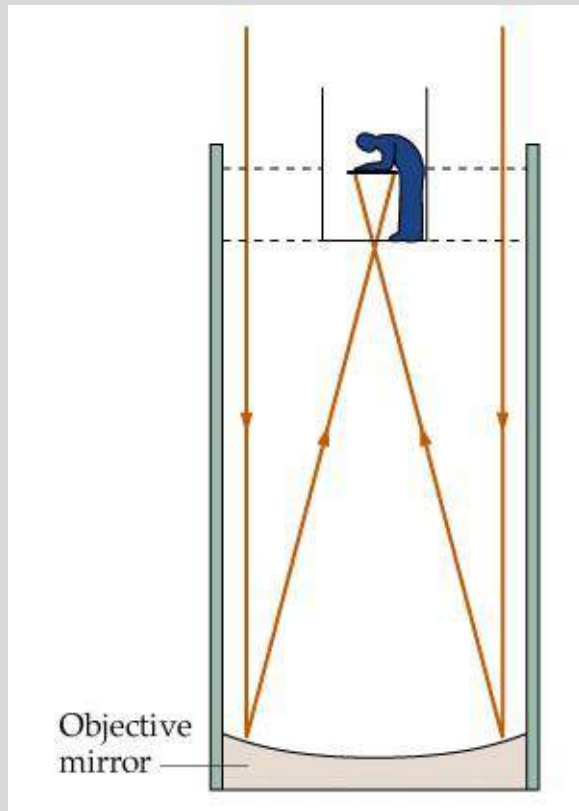
$$\theta_{ob} = -\frac{y'}{f'_{ob}} \quad -\theta_{oc} = \frac{-y'}{-f'_{ob}} \Rightarrow \theta_{oc} = \frac{y'}{f'_{ob}}$$

Con lo que el poder amplificador del telescopio

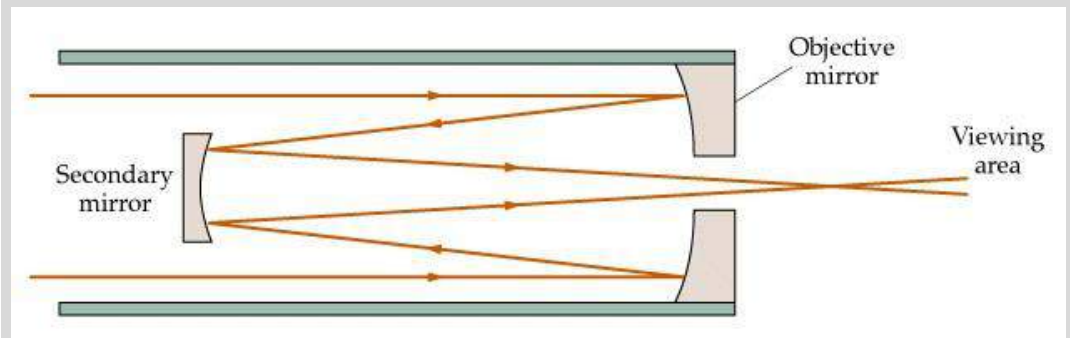
$$M = \frac{\theta_{oc}}{\theta_{ob}} = \frac{-y'/f'_{oc}}{y'/f'_{ob}} = -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}}$$



El telescopio

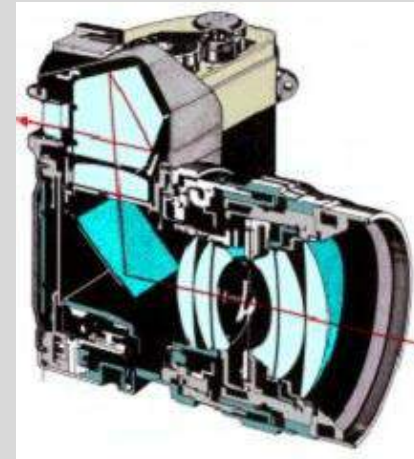
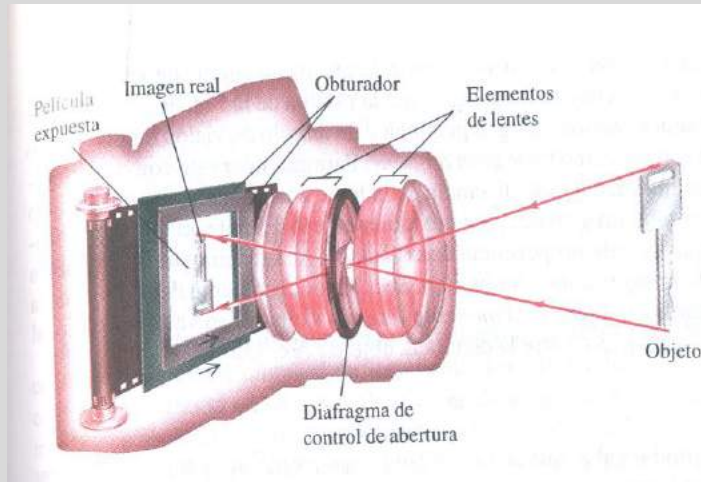
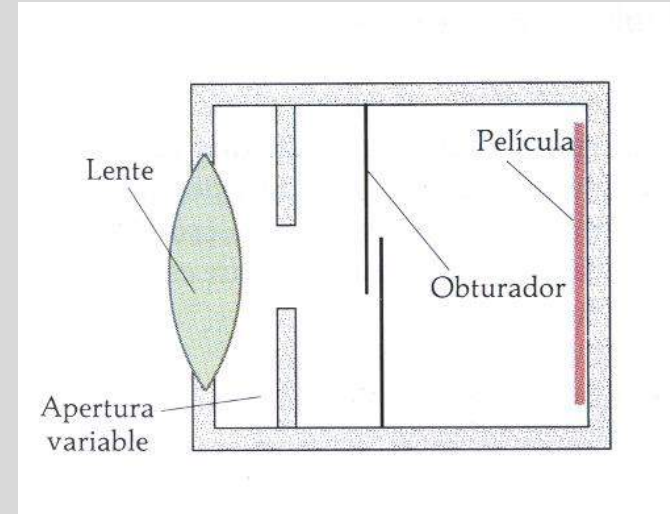
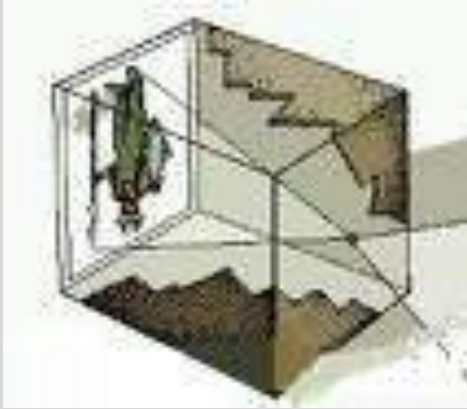


Telescopio reflector

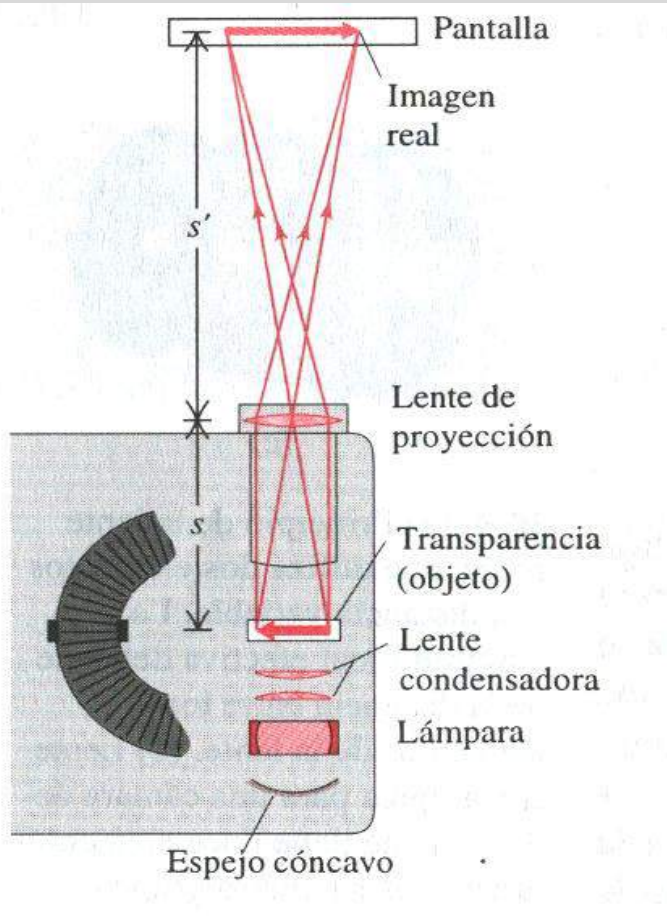


Instrumentos objetivos o de proyección

La cámara fotográfica



Proyector de diapositivas



Retroproyector

