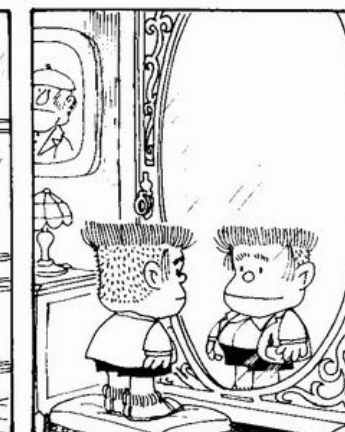


21-ÓPTICA GEOMÉTRICA



REPASO DE CLASE PASADA

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.

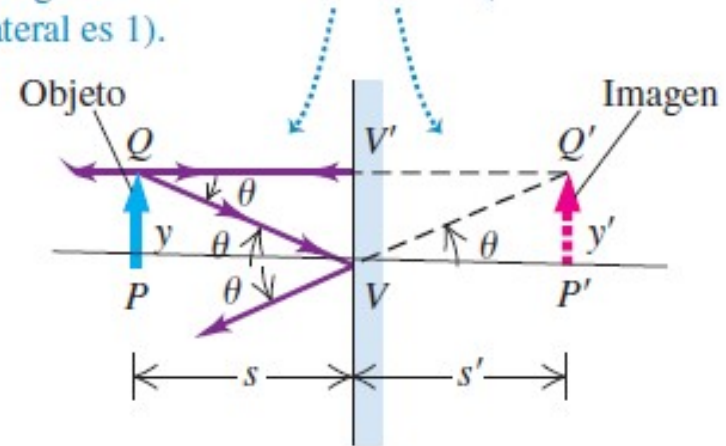
$y = y'$.

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.

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.

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.

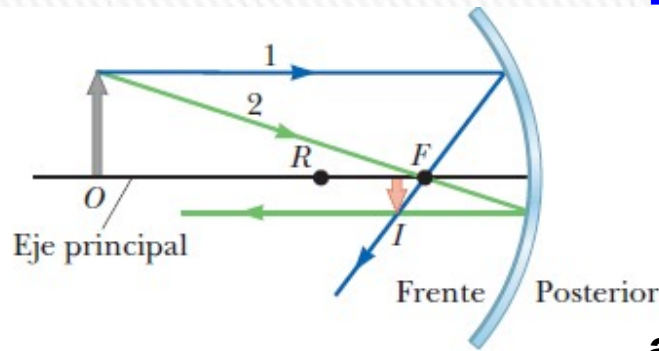
REPASO DE CLASE PASADA

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

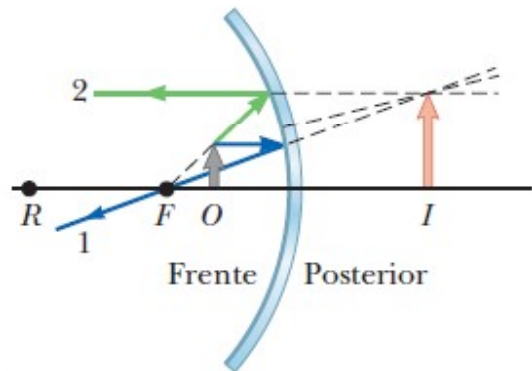
Espejo cóncavo

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

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.



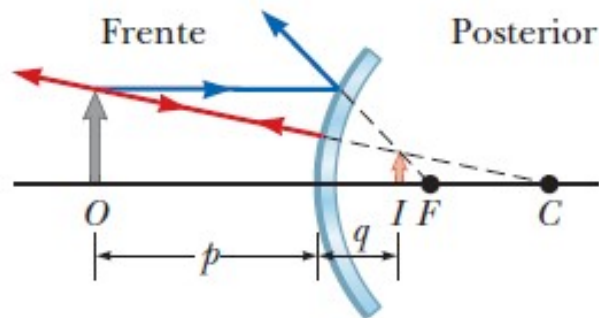
b

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

Espejo convexo

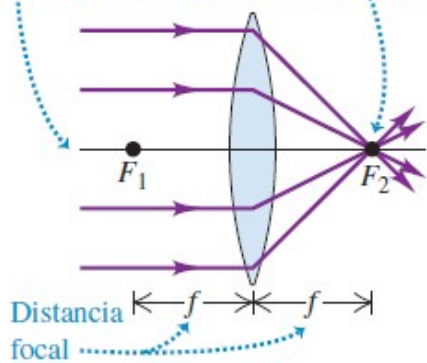
$$f < 0; s > 0;$$

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



REPASO DE CLASE PASADA

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.

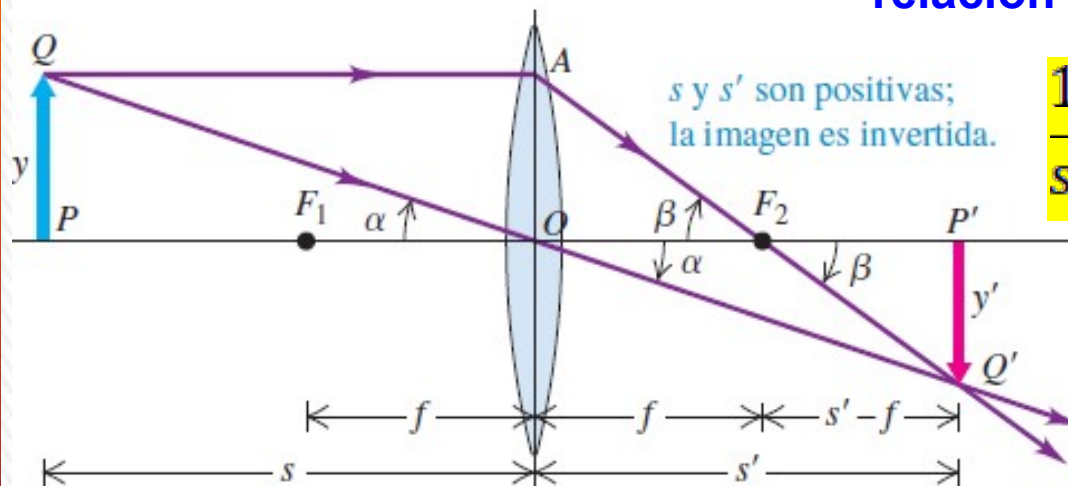
lente convergente: un haz de rayos paralelos al eje, converjan en un punto F_2 y forman una imagen real en ese punto, los rayos que pasan por el punto F_1 emergen de la lente en forma de un haz de rayos paralelos.

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



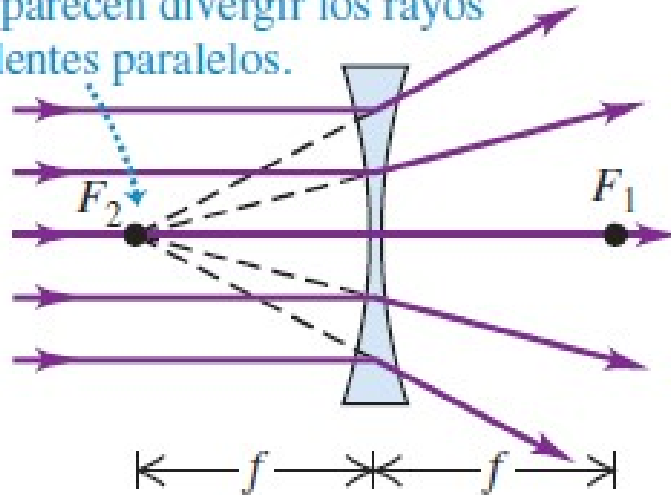
s y s' son positivas;
 la imagen es invertida.

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

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

REPASO DE CLASE PASADA

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



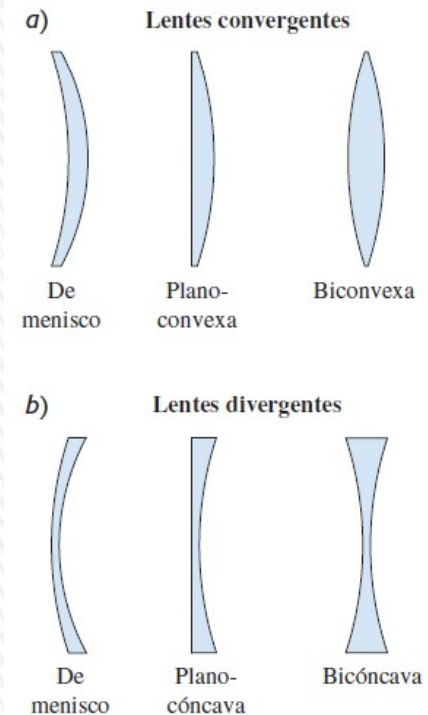
Lente divergente: El haz de rayos paralelos que incide en esta lente diverge después de refractarse.

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_{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:

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

Ejemplo: Determinación de la distancia focal de una lente

a) Suponga que el valor absoluto de los radios de curvatura de las superficies de lente de la figura A es igual en ambos casos a 10 cm, y que el índice de refracción es $n = 1,52$. ¿Cuál es la distancia focal f de la lente?

b) Suponga que la lente de la figura B también tiene $n = 1,52$ y que los valores absolutos de los radios de curvatura de sus superficies de lente también son iguales a 10 cm. ¿Cuál es la distancia focal de esta lente?



A



B

a) La lente de la figura A es biconvexa. El centro de curvatura de la primera superficie (C1) está en el lado saliente de la lente, por lo que R_1 es positivo, y el centro de curvatura de la segunda superficie (C2) está en el lado entrante, por lo que R_2 es negativo. Por lo tanto, $R_1 = +10$ cm, $R_2 = -10$ cm. Entonces:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \frac{1}{f} = (1.52 - 1) \left(\frac{1}{+10 \text{ cm}} - \frac{1}{-10 \text{ cm}} \right) \quad f = 9.6 \text{ cm}$$

b) La lente de la figura B es una lente bicóncava. El centro de curvatura de la primera superficie está del lado entrante de la lente, por lo tanto, R_1 es negativo, y el centro de curvatura de la segunda superficie está del lado saliente, así que R_2 es positivo. Por lo tanto, en este caso $R_1 = -10$ cm, $R_2 = +10$ cm: .

$$\frac{1}{f} = (1.52 - 1) \left(\frac{1}{-10 \text{ cm}} - \frac{1}{+10 \text{ cm}} \right) \quad f = -9.6 \text{ cm}$$

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.

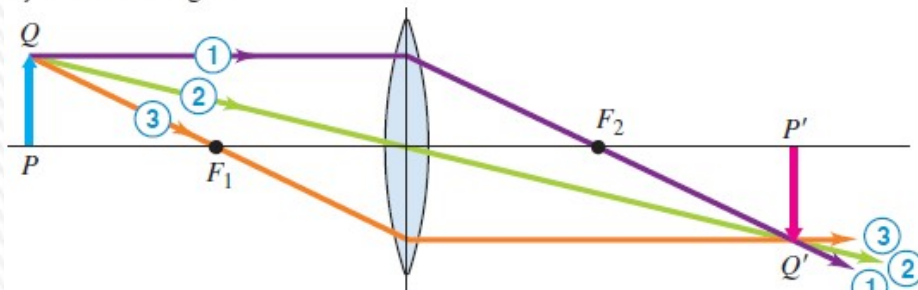
Al utilizar este método gráfico, consideraremos que la desviación de cada rayo ocurre en su totalidad en el plano medio de la lente.

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.

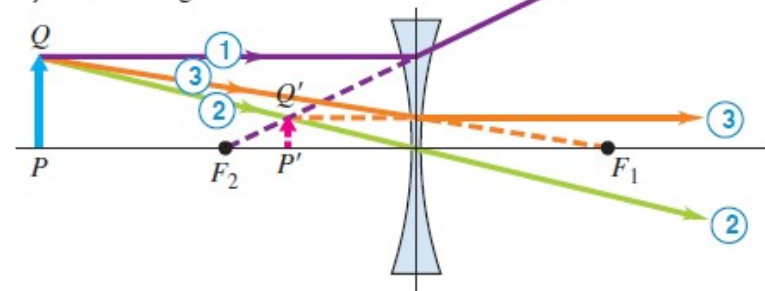
3. Un **rayo que pasa por el primer punto focal F_1 (o avanza hacia este)** emerge paralelo al eje.

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**.

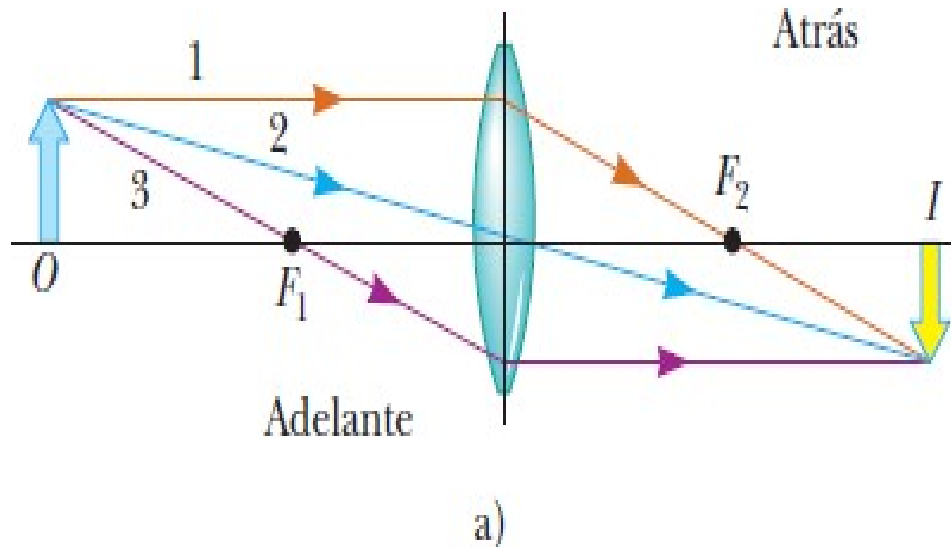
Para aplicar las expresiones algebraicas hay que seguir el siguiente convenio de signos:

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.

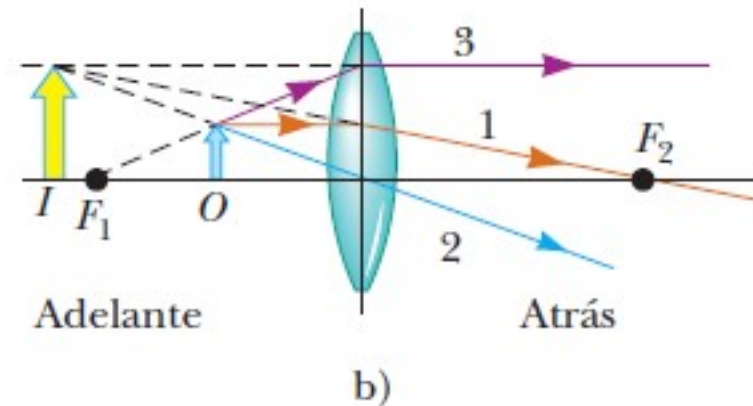
FORMACIÓN DE IMÁGENES

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

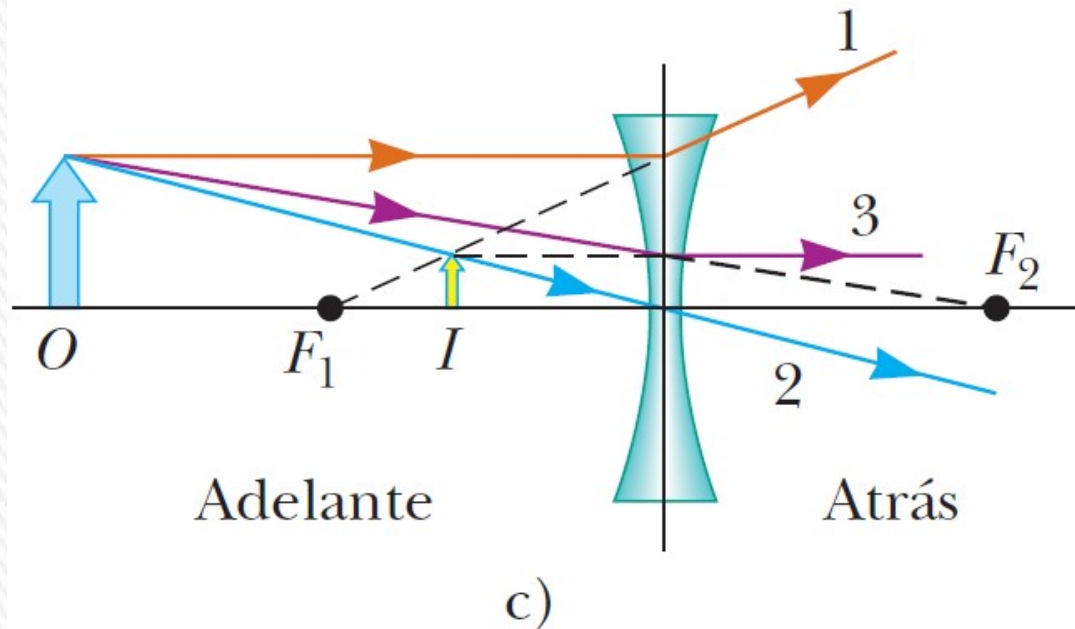
a) Imagen real, invertida y en la cara posterior de la lente.

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?

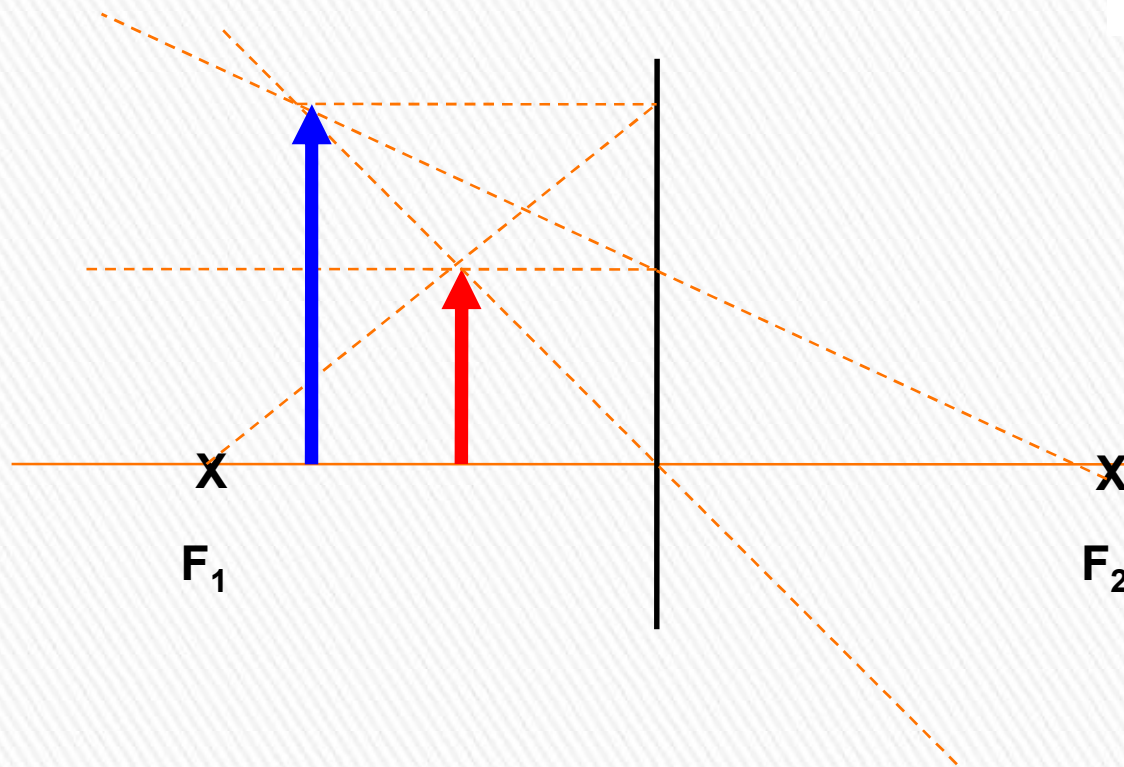
$$f = 20,0 \text{ cm} \quad s = 8,00 \text{ cm}$$

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

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

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

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



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

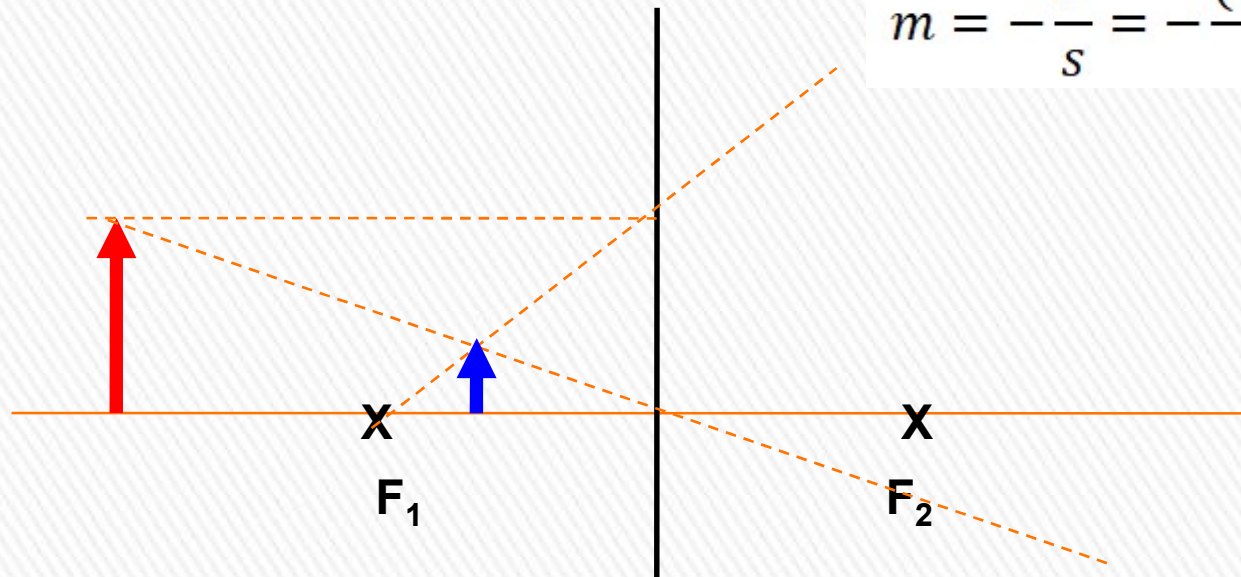
Ejemplo: ejercicio 5.10.b

La distancia focal de una lente divergente es de 0,50 m. Un objeto se coloca a 1,0 m de la lente. ¿Dónde se encuentra la imagen del objeto? ¿Cuál es el aumento?

$$f = -50,0 \text{ cm} \quad s = 100 \text{ cm} \quad \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} = \frac{s - f}{s \cdot f}$$

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f} = \frac{(100) \times (-50,0)}{(100) - (-50,0)} = -\frac{5000}{150} = -33,3 \text{ cm}$$

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{(-33,3)}{100} = 0,333$$



La imagen es virtual, derecha y reducida en un factor de 0,333. Se encuentra en $s' = -33,3 \text{ cm}$ (delante de la lente) El aumento es de 0,333



AGUDEZA VISUAL

Ojo humano normal distingue apenas dos objetos puntiformes bien iluminados con una separación angular de $\theta_0 \approx 5 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 0,03^\circ$, representa la **separación angular mínima**, denominada **agudeza visual**.

Para observar detalles finos, una persona mantiene un objeto tan cerca de sus ojos como le es posible, o hasta el **punto próximo o cercano**: el **punto más próximo en el que el ojo se puede enfocar confortablemente**.

Para un adulto joven normal, la **distancia x_n** al punto próximo es de unos **0,25 m**.

En el punto próximo, dos puntos con una pequeña separación y y entre ambos tienen una separación angular suficientemente pequeña para que

$\theta \approx \tan(\theta) \approx y/x_n$ sea una buena aproximación.

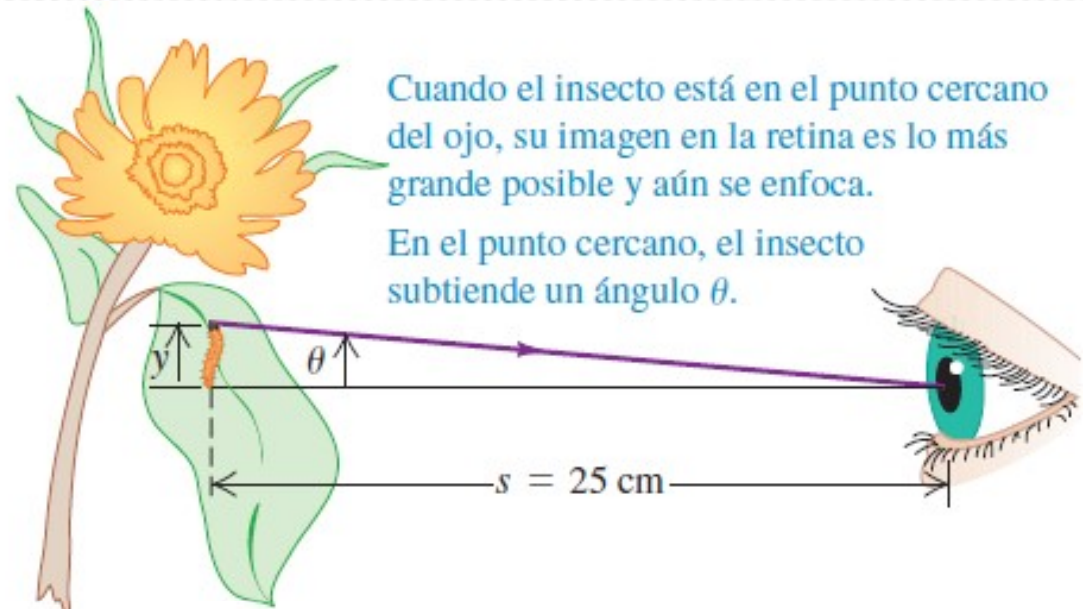
Si $\theta \approx \theta_0 = 5 \times 10^{-4} \text{ rad}$, entonces:

$$y = x_n \theta_0 = (0,25 \text{ m}) 5 \times 10^{-4} \text{ rad} = 1,25 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,125 \text{ mm}$$

(representa el tamaño más pequeño de un objeto que puede observarse a simple vista).

LA LUPA O LENTE DE AUMENTO

El tamaño aparente de un objeto está determinado por el tamaño de su imagen en la retina. Este tamaño depende del ángulo θ que subtende el objeto en el ojo (**tamaño angular**).



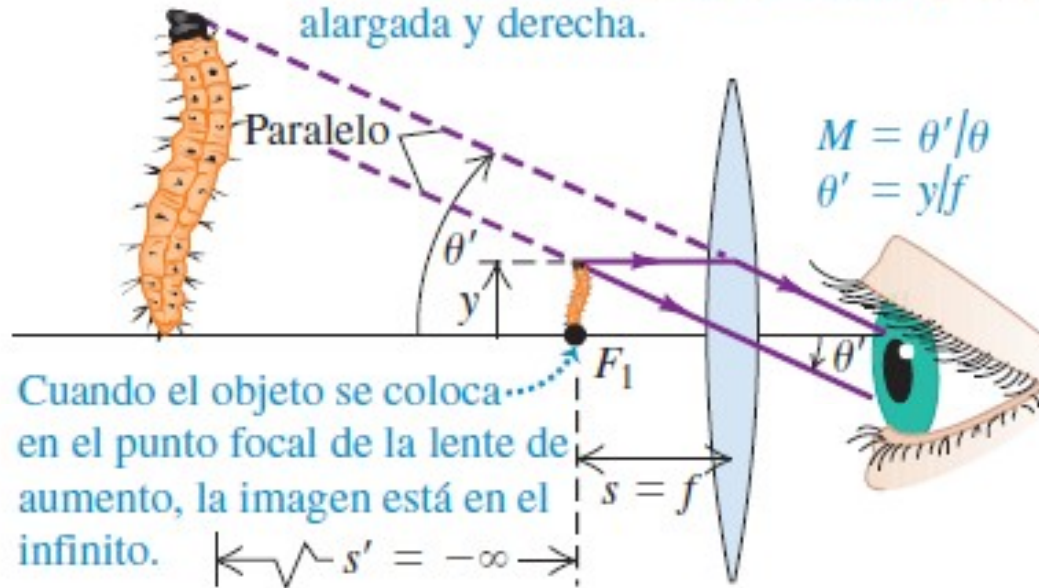
Para observar de cerca un objeto pequeño, lo acercamos al ojo para que el ángulo subtendido y la imagen retiniana sean lo más grandes posible. Sin embargo, el ojo no puede enfocar nítidamente objetos más próximos que el punto cercano; por lo tanto, el tamaño angular de un objeto es máximo (es decir, subtende el ángulo de visión más grande posible) cuando se encuentra en el punto cercano. **Supondremos un observador promedio, para quien el punto cercano está a 25 cm del ojo.**

En la figura, el objeto está colocado en el punto cercano y subtende un ángulo θ en el ojo, en donde: $y = \text{tg}(\theta) \cdot s = \text{tg}(\theta) \cdot (25,0 \text{ cm})$

LA LUPA O LENTE DE AUMENTO

b)

Con la lente de aumento, el insecto puede colocarse más cerca que el punto cercano. La lente de aumento crea una imagen virtual alargada y derecha.



Una lente convergente permite formar una imagen virtual más grande y más alejada del ojo que el objeto mismo.

Por tanto es posible acercar más el objeto al ojo, y el tamaño angular de la imagen puede ser considerablemente más grande que el tamaño angular del objeto a 25 cm sin la lente.

Una lente que se utiliza de este modo recibe el nombre de **lente de aumento**, también conocida como **vidrio de aumento** o **lupa simple**.

La imagen virtual se ve con máxima comodidad cuando se encuentra en el infinito, de modo que el músculo ciliar del ojo esté relajado, lo cual significa que el objeto se coloca en el punto focal F_1 de la lente de aumento.

En esa ubicación, la lente forma una imagen virtual, ampliada y vertical.

En la figura una lente de aumento delante del ojo forma una imagen en el infinito, y el ángulo subtendido por la lente de aumento es θ' : $y = \text{tg}(\theta') \cdot f$

LA LUPA O LENTE DE AUMENTO

La utilidad de la lente de aumento queda expresada por la proporción del ángulo θ' (con la lente de aumento) con respecto al ángulo θ (sin la lente de aumento).

Esta proporción se conoce como el **aumento angular M**:

$$M = \frac{\theta'}{\theta}$$

Para determinar M, suponemos que los ángulos son lo suficientemente pequeños como para que cada ángulo (en radianes) sea igual a su seno y a su tangente.

De acuerdo a las figuras tenemos que:

$$y = \text{tg}(\theta) \cdot s = \text{tg}(\theta) \cdot (25,0 \text{ cm}) \cong \theta \cdot 25,0 \text{ cm} \quad \text{o que:} \quad \theta \cong \frac{y}{25,0 \text{ cm}}$$

$$y = \text{tg}(\theta') \cdot f \cong \theta' \cdot f \quad \text{o que:} \quad \theta' \cong \frac{y}{f}$$

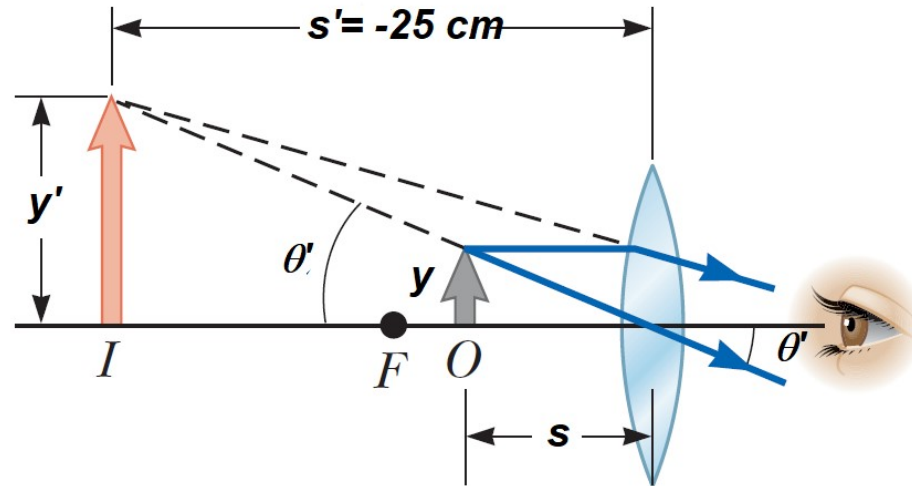
Este M_{\min} es el aumento mínimo que corresponde al objeto colocado en el foco y la imagen en el infinito, f en cm

$$M_{\min} = \frac{25,0 \text{ cm}}{f}$$

Para el caso donde la lente se sostiene cerca del ojo, la amplificación angular es un máxima cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo, que como dijimos estamos suponiendo que es igual a 25,0 cm.

Si tomamos entonces que la imagen se forme en el punto cercano, y no en infinito tendremos que imponer que $s' = -25,0 \text{ cm}$ y debemos hallar el valor de s para que esto suceda (ya que el objeto no lo colocamos en el foco)

LA LUPA O LENTE DE AUMENTO



Por la ecuación de las lentes delgadas:

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

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

$$s = \frac{s' \cdot f}{s' - f} = \frac{(-25,0) \cdot f}{(-25,0) - f} = \frac{25,0 \cdot f}{25,0 + f}$$

Pero ahora tendremos que: $\theta' \cong \frac{y}{s}$

$$M_{max} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{y}{s}}{\frac{y}{25,0}} = \frac{25,0}{s} = \frac{25,0}{\frac{25,0 \cdot f}{25,0 + f}} = \frac{25,0 + f}{f} = 1 + \frac{25,0}{f}$$

$$M_{max} = 1 + \frac{25,0 \text{ cm}}{f}$$

Este M_{max} es el aumento máximo que corresponde a la imagen formada en el punto cercano o próximo de ojo (que se supone a los 25,0 cm)

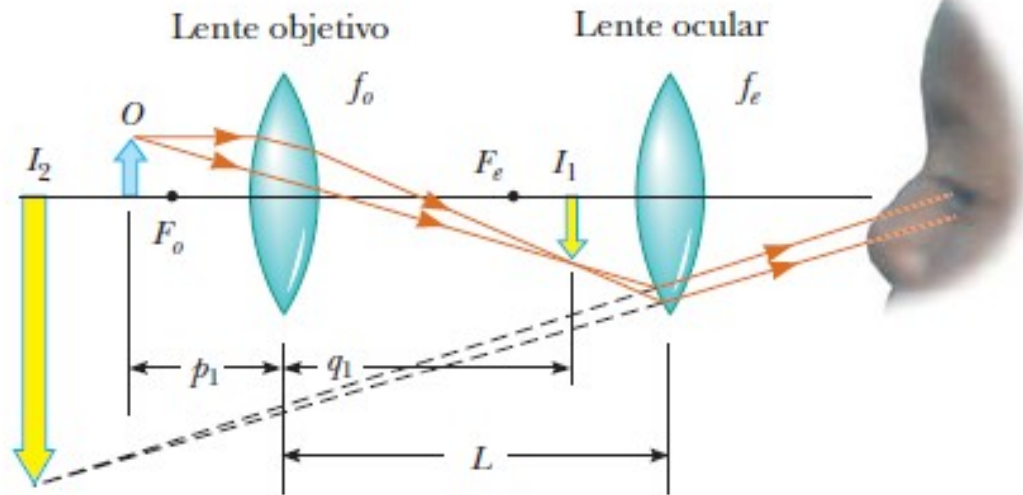
Parecería que es posible agrandar el aumento angular tanto como se desee reduciendo la distancia focal f . De hecho, las aberraciones de una lente simple biconvexa establecen un límite de M entre aproximadamente 3X y 4X.

Si se corrigen estas aberraciones, se puede alcanzar un aumento angular de hasta 20X.

Cuando se necesita un aumento aún mayor, por lo general se utiliza un microscopio compuesto.

MICROSCOPIO ÓPTICO

Una lupa o lente de aumento simple proporciona sólo una ayuda limitada en la inspección detallada de un objeto. Se logra una mayor amplificación combinando dos lentes en un dispositivo que se conoce como **microscopio compuesto**.



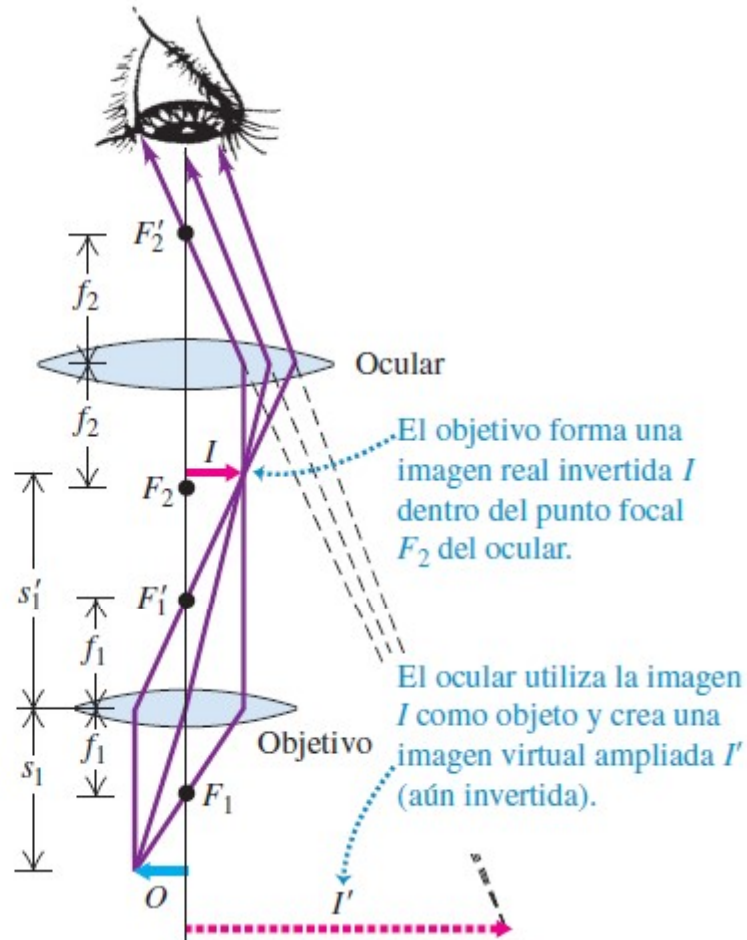
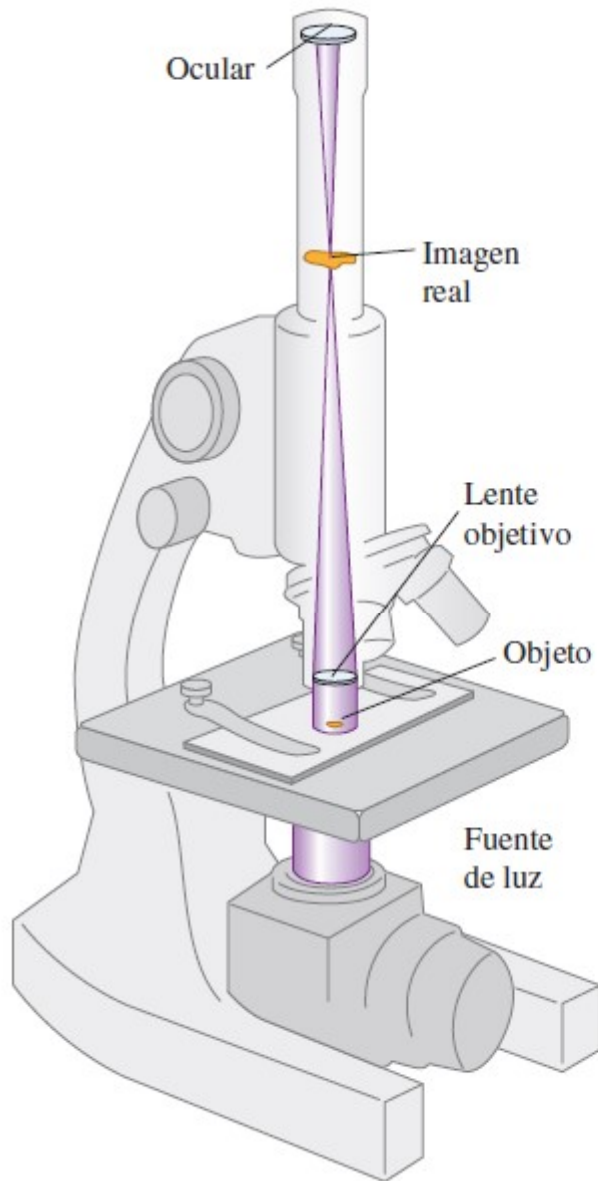
El microscopio compuesto está constituido por una lente, el **objetivo**, que tiene una distancia focal muy corta, menor a 1 cm, y una segunda lente, el **ocular**, que tiene una distancia focal de unos cuantos centímetros.

Las dos lentes están separadas una distancia L que es mucho mayor que las distancias focales de las lentes.

El objeto que se coloca justo por fuera del foco del objetivo forma una imagen real, invertida, que queda localizada en, o cerca, del foco del ocular.

El ocular, que sirve como una lente de aumento simple, produce una **imagen virtual** ampliada de la imagen formado por el objetivo.

MICROSCOPIO ÓPTICO



angular que la imagen real I tendría si se la viera sin el ocular.

$$m_1 = -\frac{s'_1}{s_1}$$

s_1 y s'_1 son las distancias de objeto y de imagen, respectivamente, correspondientes a la lente objetivo.

El aumento angular total del microscopio compuesto es el producto de dos factores: el aumento lateral m_1 del objetivo, que determina el tamaño lineal de la imagen real I ; y el aumento angular M_2 del ocular, que relaciona el tamaño angular de la imagen virtual vista a través del ocular con el tamaño



MICROSCOPIO ÓPTICO

En condiciones ordinarias el objeto está muy cerca del punto focal, y la distancia de imagen resultante s'_1 es muy grande en comparación con la distancia focal f_1 de la lente objetivo.

Por consiguiente, s_1 es aproximadamente igual a f_1 , y podemos escribir $m_1 = -s'_1 / f_1$, *incluso podemos aproximar: $s'_1 \cong L$*

La imagen real I está cerca del punto focal F_2 del ocular; por lo tanto, para obtener el aumento angular del ocular vale: $M_2 = (25 \text{ cm}) / f_2$, donde f_2 es la distancia focal del ocular (considerado como lente simple).

El aumento angular total M del microscopio compuesto (aparte de un signo negativo, que habitualmente se pasa por alto) es el producto de dos aumentos:

$$M = m_1 M_2 = \frac{(25 \text{ cm})s'_1}{f_1 f_2} \cong \frac{(25 \text{ cm})L}{f_1 f_2}$$

s'_1 o L , f_1 y f_2 se miden en centímetros.

La imagen final es invertida con respecto al objeto.

Por lo regular, los fabricantes de microscopios especifican los valores de m_1 y M_2 de los componentes del microscopio, en vez de las distancias focales del objetivo y del ocular.

Casi todos los microscopios ópticos tienen una “torreta” giratoria con tres o más objetivos de diferente distancia focal, con lo cual es posible ver el mismo objeto a diferentes aumentos.

MICROSCOPIO ÓPTICO

El microscopio ha extendido la visión del ser humano hasta el punto en que se pueden observar detalles antes desconocidos de objetos increíblemente pequeños. La capacidad de este instrumento se ha venido incrementando con técnicas mejoradas en el pulido de precisión de las lentes.

Una pregunta frecuente en relación con los microscopios es:

“¿si fuera uno extremadamente paciente y cuidadoso, sería posible construir un microscopio que pudiera hacer visible al ojo humano un átomo?”.

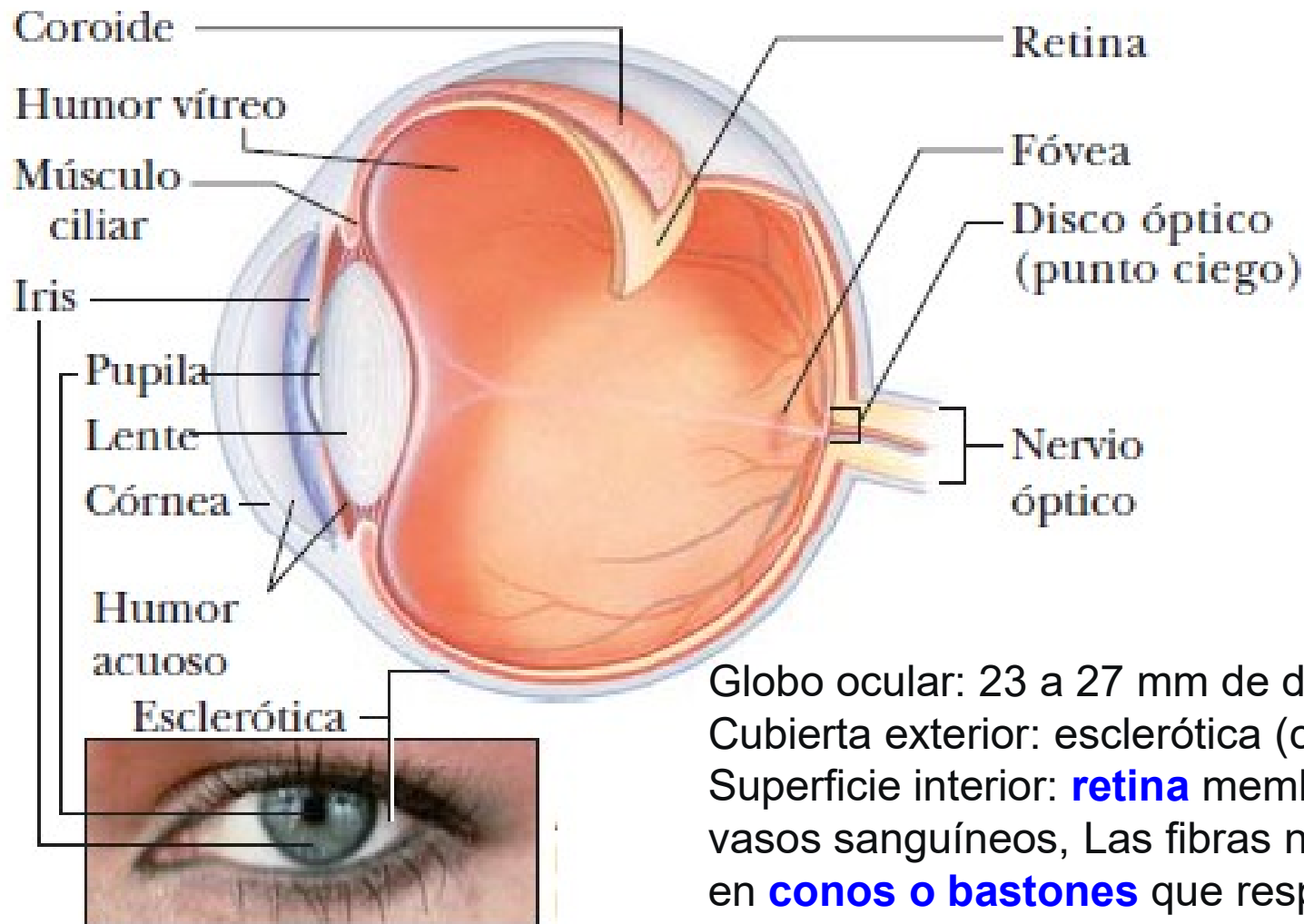
La respuesta es no, siempre que se utilice luz para iluminar el objeto.

La explicación es que, para que se vea un objeto bajo un microscopio óptico (que utiliza luz visible), debe ser por lo menos tan grande como la longitud de onda de la luz.

Como el diámetro de cualquier átomo es muchas veces menor que las longitudes de onda de la luz visible, los átomos deberán ser “vistos” mediante otro tipo de “microscopios”.



EL OJO HUMANO



Globo ocular: 23 a 27 mm de diámetro.
Cubierta exterior: esclerótica (casi opaca).
Superficie interior: **retina** membrana con nervios y vasos sanguíneos, Las fibras nerviosos terminan en **conos o bastones** que responden a la luz generando impulsos nerviosos.

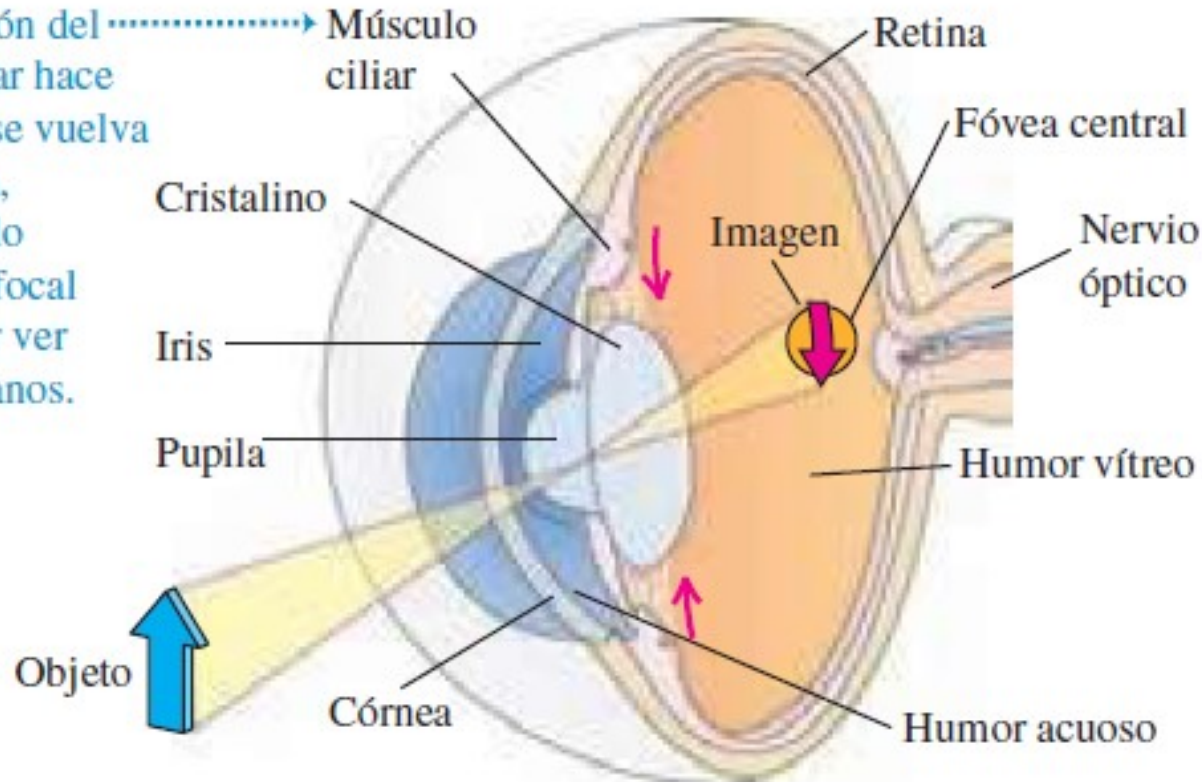
Máxima sensibilidad en la **mácula o mancha amarilla** (en la retina), su parte central: **fóvea** (que sólo tiene conos).

El ojo gira de modo que la imagen se forme sobre la fóvea.

EL OJO HUMANO

a) Diagrama del ojo

La contracción del músculo ciliar hace que la lente se vuelva más convexa, disminuyendo su distancia focal para permitir ver objetos cercanos.



El ojo es de forma casi esférica y mide aprox. 2,5 cm de diámetro. La parte frontal tiene una curvatura un poco más marcada y está cubierta por una membrana dura y transparente llamada **córnea**.

La región que está detrás de la córnea contiene un líquido llamado **humor acuoso**. En seguida viene el **cristalino**, una cápsula que contiene una gelatina fibrosa, dura en el centro y cada vez más suave hacia la periferia.

La lente del cristalino se mantiene en su lugar gracias a ligamentos que lo sujetan al **músculo ciliar**, el cual lo circunda. Detrás del cristalino, el ojo está lleno de una gelatina acuosa algo viscosa conocida como **humor vítreo**

EL OJO HUMANO

Los índices de refracción del humor acuoso como del humor vítreo son de alrededor de 1,336, casi iguales al del agua.

Aunque el cristalino no es homogéneo, tiene un índice promedio de 1,437, no muy diferente de los índices de los humores acuoso y vítreo.

En consecuencia, la mayor parte de la refracción de la luz que penetra en el ojo ocurre en la superficie externa de la córnea.

La refracción en la córnea y en las superficies del cristalino produce una imagen real del objeto que se mira. Esta imagen se forma en la **retina** (sensible a la luz) que recubre la superficie interna posterior del ojo.

La retina desempeña el mismo papel que la película en una cámara.

Los bastones y conos de la retina actúan como una serie de fotoceldas en miniatura; perciben la imagen y la transmiten a través del nervio óptico hasta el cerebro.

La mayor agudeza visual se da en una región central pequeña llamada **fóvea central**, de alrededor de 0,25 mm de diámetro.

En frente del cristalino está el **iris**, que contiene una abertura de diámetro variable llamada **pupila**, la cual se abre y se cierra para adaptarse a la intensidad cambiante de la luz.

También los receptores de la retina tienen mecanismos de adaptación a la intensidad.

Para que un objeto se vea con nitidez, la imagen se debe formar exactamente donde se encuentra la retina. El ojo se ajusta a las diferentes distancias del objeto **s** modificando la distancia focal **f** de su lente; la distancia entre el cristalino y la retina, que corresponde a **s'**, no cambia.

EL OJO HUMANO

En el ojo normal, un objeto situado en el infinito está enfocado nítidamente cuando el músculo ciliar se encuentra relajado.

Para permitir la formación de imágenes nítidas de objetos más cercanos en la retina, aumenta la tensión del músculo ciliar que rodea el cristalino, se contrae el músculo ciliar, se arquea el cristalino, y se disminuyen los radios de curvatura de sus superficies; esto reduce la distancia focal. Dicho proceso se llama **acomodación**.

Los extremos del rango donde es posible la visión definida se conocen como el **punto lejano** y el **punto cercano (o próximo)** del ojo. El punto lejano del ojo normal se encuentra en el infinito. La posición del punto cercano depende del grado en que el músculo ciliar puede aumentar la curvatura del cristalino.

El ámbito de acomodación disminuye gradualmente con la edad, porque el cristalino crece a lo largo de la vida de los seres humanos (es alrededor de un 50% más grande a la edad de 60 años que a los 20) y los músculos ciliares son menos capaces de deformar un cristalino más grande.

Por tal razón, el punto cercano se aleja poco a poco a medida que uno envejece.

El alejamiento del punto cercano recibe el nombre de **presbicia**.

La tabla muestra la posición aproximada del punto cercano en una persona promedio de diversas edades.

Edad (años)	Punto cercano (cm)
10	7
20	10
30	14
40	22
50	40
60	200

EL OJO – Defectos de la visión

Varios defectos comunes de la visión son resultado de relaciones de distancias incorrectas en el ojo. Un ojo **normal** forma en la retina una imagen de un objeto situado en el infinito cuando el ojo se encuentra relajado (figura a).

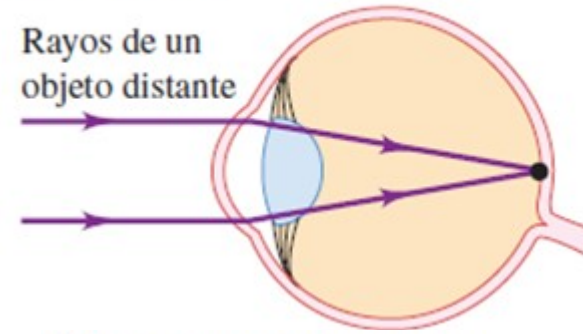
En el ojo **miope** (corto de vista), el globo ocular es excesivamente largo de adelante hacia atrás, en comparación con el radio de curvatura de la córnea (o la córnea presenta una curvatura demasiado pronunciada), y los rayos provenientes de un objeto situado en el infinito se enfocan delante de la retina (figura b). El objeto más distante del cual se puede formar una imagen en la retina está entonces más próximo que el infinito.

En el ojo **hipermétrope** (problemas de visión a distancias cortas), el globo ocular es demasiado corto o la córnea no tiene la curvatura suficiente, por lo que la imagen de un objeto infinitamente distante se forma detrás de la retina (figura c).

El ojo miope produce demasiada convergencia en un haz de rayos paralelos como para formar una imagen en la retina; en el ojo hipermétrope, la convergencia es insuficiente.

a) Ojo normal

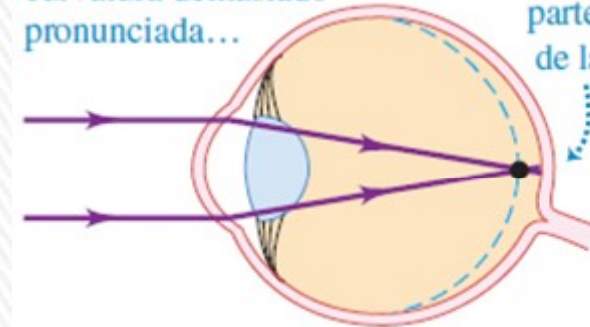
Rayos de un objeto distante



b) Ojo miope (corto de vista)

Ojo muy largo o córnea con curvatura demasiado pronunciada...

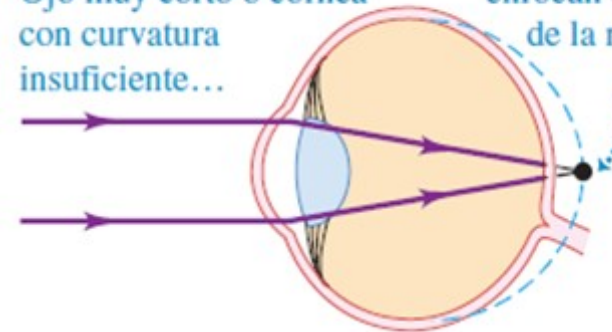
...los rayos se enfocan en la parte frontal de la retina.



c) Ojo hipermétrope (problemas de visión a distancias cortas)

Ojo muy corto o córnea con curvatura insuficiente...

...los rayos se enfocan detrás de la retina.



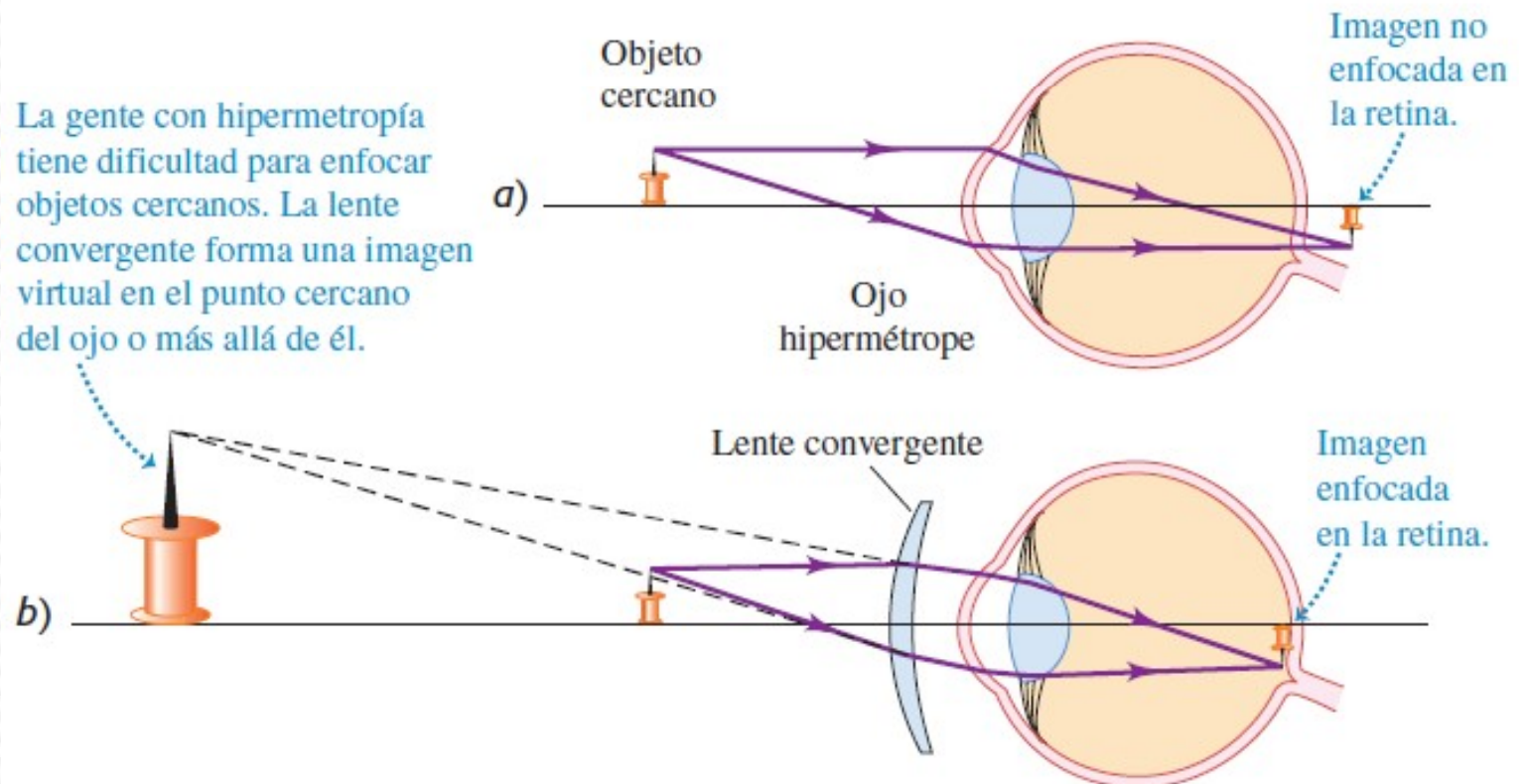
EL OJO – Defectos de la visión

Todos estos defectos se remedian con el uso de lentes correctivas (anteojos o lentes de contacto).

El punto cercano de un ojo tanto **préscita como hipermétrope** está más alejado del ojo que lo normal.

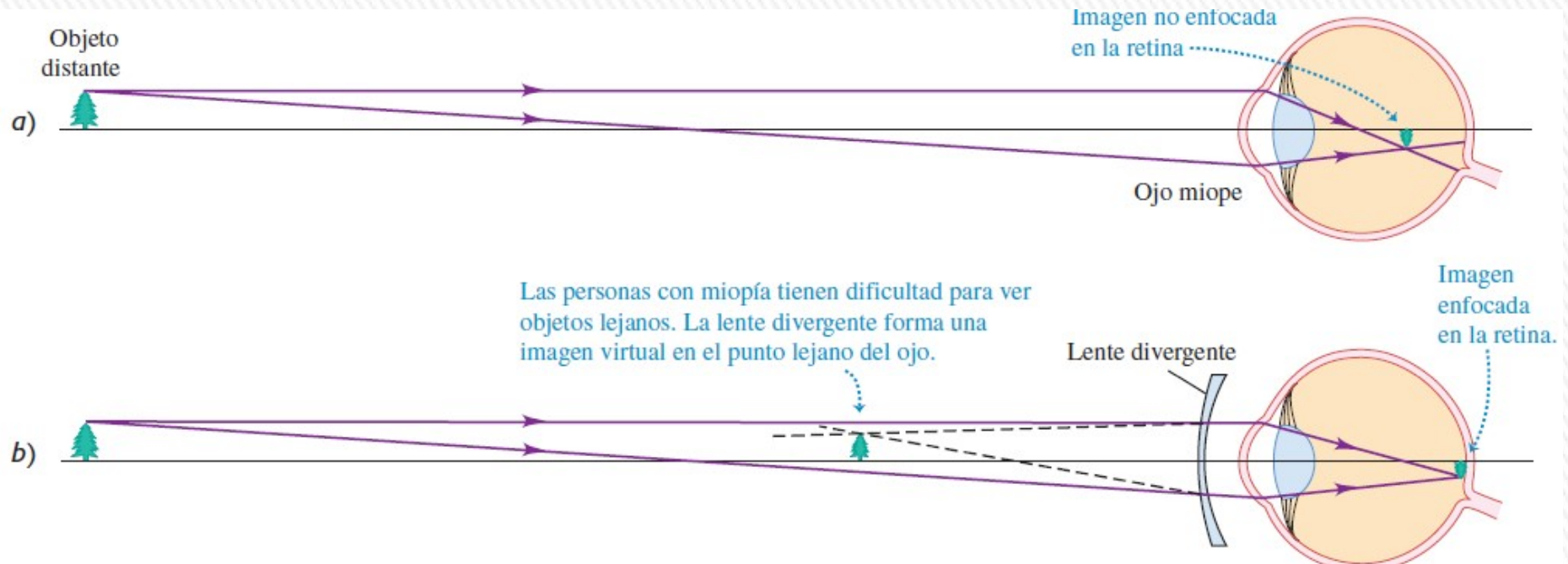
Para ver claramente un objeto a la distancia normal de lectura (que ordinariamente se supone de 25 cm), se necesita una lente que forme una imagen virtual del objeto en el punto cercano o más allá de él.

Esto se consigue por medio de una **lente convergente** (positiva), como se muestra en la figura



EL OJO – Defectos de la visión

Para corregir el **ojo miope** se utiliza una **lente divergente** (negativa) para llevar la imagen más cerca del ojo que el objeto real, como se muestra en la figura.

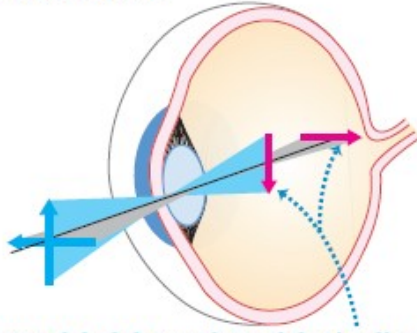


El **astigmatismo** es un tipo de defecto diferente, en el cual la superficie de la córnea no es esférica, sino que tiene una curvatura más pronunciada en un plano que en otro.

El astigmatismo puede hacer imposible, por ejemplo, enfocar con claridad las barras horizontales y verticales de una ventana al mismo tiempo.

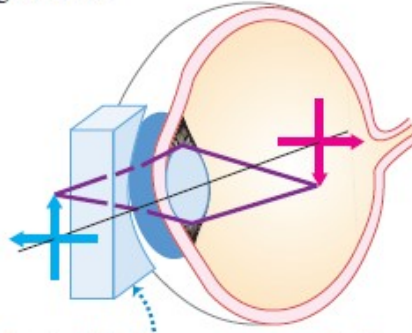
EL OJO – Defectos de la visión

a) La imagen de las líneas verticales se forma delante de la retina.



La forma del globo ocular o del cristalino hace que los elementos verticales y horizontales se enfoquen a diferentes distancias.

b) Una lente cilíndrica corrige el astigmatismo.



Esta lente cilíndrica se curva en la dirección vertical pero no en la horizontal, cambiando la distancia focal de los elementos verticales.

El astigmatismo se corrige mediante una lente de superficie cilíndrica. Por ejemplo, suponga que la curvatura de la córnea en un plano horizontal es la correcta para enfocar los rayos provenientes del infinito en la retina, pero la

curvatura en el plano vertical es demasiado grande para formar una imagen nítida en la retina.

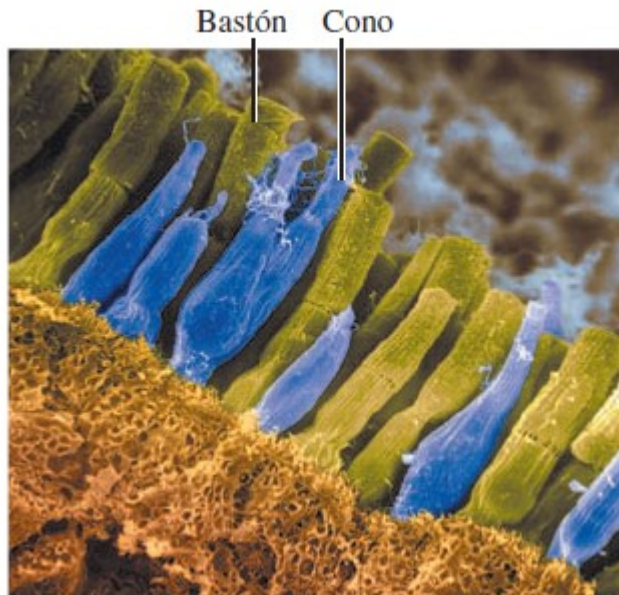
Cuando una lente cilíndrica con su eje horizontal se coloca delante del ojo, la lente no altera los rayos en un plano horizontal, pero la divergencia adicional de los rayos en un plano vertical hace que estos se enfoquen nítidamente sobre la retina (figura b).

Las lentes para corregir la visión se describen habitualmente en términos de su potencia, la cual se define como el recíproco de la distancia focal expresada en metros. La unidad de potencia es la **dioptría**.

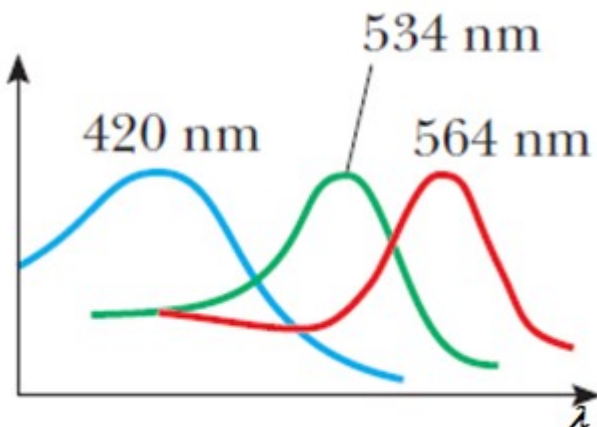
De esta manera, una lente con $f = 0,50$ m tiene una potencia de 2,0 dioptrías, $f = -0,25$ corresponde a -4,0 dioptrías, y así sucesivamente.

Los números indicados en una receta de anteojos por lo regular son potencias son expresadas en dioptrías.

EL OJO HUMANO



Micrografía de barrido electrónico que muestra bastones y conos de la retina con colores distintos



La retina está cubierta con dos tipos de células sensibles a la luz, llamados **conos y bastones**.

Los bastones no son sensibles al color, pero son más sensibles a la luz que los conos.

Son además, **responsables de la *visión escotópica o visión oscura*.**

Los bastones se extienden por toda la retina y permiten una buena visión periférica para todos los niveles de iluminación y detección de movimiento en la oscuridad.

Los conos se concentran en la fovea.

Estas células son sensibles a diferentes longitudes de onda de la luz.

Los tres tipos de células sensibles al color; se conocen como conos rojos, verdes y azules, debido al máximo de la escala cromática a la cual responden.

La figura muestra la sensibilidad al color aproximada de los tres tipos de conos presentes en la retina.

EL OJO HUMANO

Si se estimulan simultáneamente los conos rojos y los verdes (como ocurriría si fueran iluminados por una luz amarilla), el cerebro interpreta lo que se está viendo como color amarillo.

Si todos los tipos de conos se estimulan mediante rayos independientes de color rojo, azul y verde, aparece el color blanco.

Si los tres tipos de conos se estimulan por luz que contiene *todos los colores*, como es por ejemplo la luz solar, de nuevo se ve luz blanca.

Las televisiones y los monitores de computadora aprovechan esta ilusión visual utilizando solo puntos rojos, verdes y azules en la pantalla.

Con combinaciones específicas de la brillantez en estos tres colores primarios, se logra que los ojos vean cualquiera de los colores del arco iris.

Por tanto, el limón amarillo que observa en un anuncio de televisión, no es realmente amarillo, ¡es rojo y verde!

El papel impreso está constituido por fibras minúsculas aplastadas y traslúcidas que dispersan la luz en todas las direcciones; la mezcla resultante de colores parece blanca para el ojo.

La nieve, las nubes y las canas no son realmente blancas.

De hecho, no existe un pigmento blanco.

La apariencia de estas cosas es una consecuencia de la dispersión de luz que contiene todos los colores y que el cerebro interpreta como blanco.

EL OJO



Se ha descubierto que en los seres humanos y otros mamíferos el cristalino y el músculo ciliar son sólo parte de varios mecanismos de enfoque utilizados por los animales.

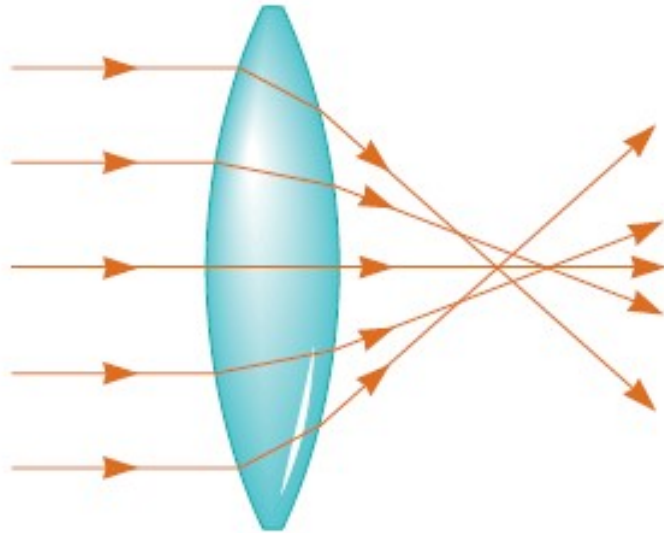
Las aves pueden cambiar la forma no sólo de su cristalino, sino también de la superficie de la córnea.

En los animales acuáticos la superficie de la córnea no es muy útil para enfocar porque su índice de refracción es similar al del agua.

Por lo tanto, el enfoque se produce completamente por la lente, que es casi esférica.

En el enfoque de los peces se emplea un músculo para mover el cristalino hacia adentro o hacia afuera. Las ballenas y los delfines logran el mismo efecto mediante el llenado o vaciado de una cámara de fluido, ubicada detrás del cristalino para moverlo hacia adentro o hacia afuera.

ABERRACIONES



Aberración esférica: los focos de los rayos alejados del eje principal de una lente esférica son diferentes de los focos de rayos con la misma longitud de onda que pasan cerca del eje. Los rayos que pasan a través de puntos cercanos al centro de la lente forman una imagen más lejos de la lente que los rayos que pasan a través de puntos cerca de los bordes.

Fórmula de constructor de lentes usa aproximación de ángulos pequeños: en realidad rayos paralelos al eje producen imágenes cuya posición varía ligeramente con la distancia del eje, en lugar de formarse en un punto, se forman en una región finita.

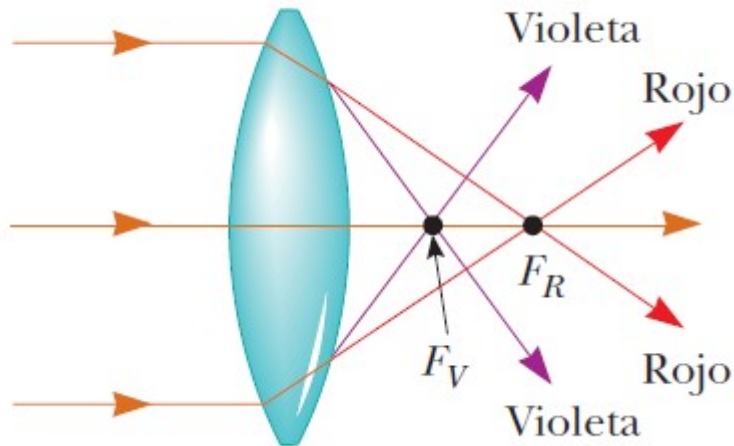
Análisis de lentes supone que los rayos forman ángulos pequeños con el eje principal y que las lentes son delgadas.

En este modelo simple, todos los rayos que salen de una fuente puntual se enfocan en un solo punto, produciendo una imagen nítida.

Desviaciones de imágenes reales del ideal pronosticado en modelo simplificado, se conocen como **aberraciones**.

Aberraciones esféricas: los focos de los rayos alejados del eje principal de una lente esférica son diferentes de los focos de rayos con la misma longitud de onda que pasan cerca del eje.

ABERRACIONES



Aberración cromática causada por una lente convergente. Los rayos de diferentes longitudes de onda se enfocan en puntos diferentes

Aberraciones cromáticas

Dispersión: índice de refracción de un material varía en función λ .

Cuando pasa luz blanca a través de una lente, los rayos violetas se refractan más que los rojos.

Variación de la distancia focal según λ se origina imagen borrosa, llamada **aberración cromática**.

Para una lente divergente también da como resultado una distancia focal más corta para la luz violeta que para la luz roja, pero en la cara frontal de la lente.

La aberración cromática puede reducirse de manera significativa al combinar una lente convergente fabricada con un clase de vidrio y con una lente divergente hecha con otra clase de vidrio.