

23-FORMACIÓN DE IMÁGENES

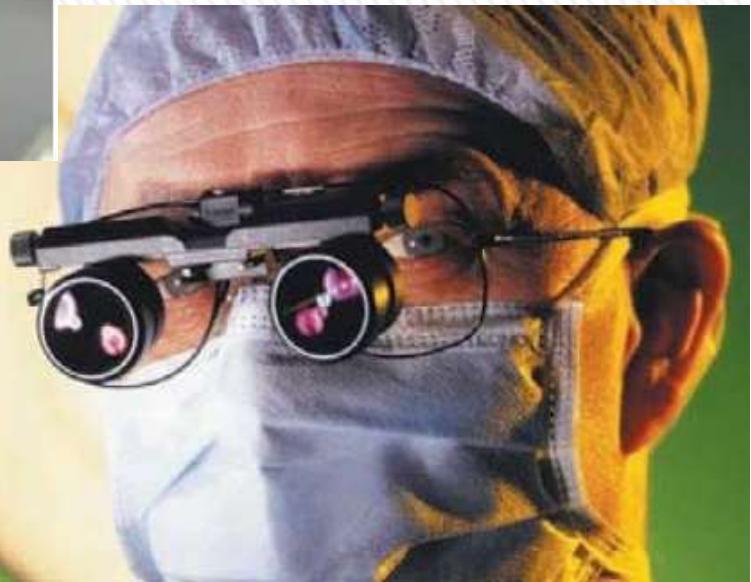
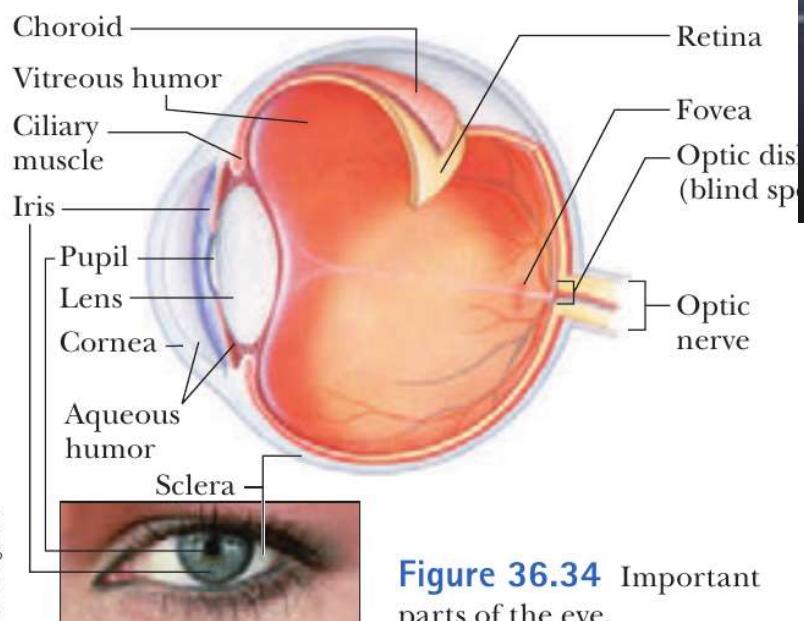
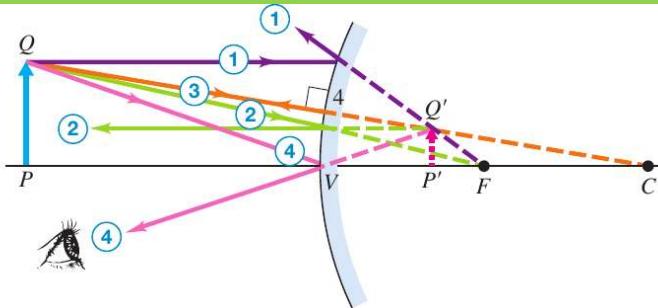
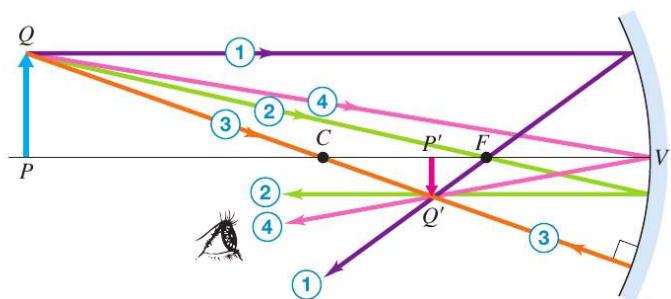


Figure 36.34 Important parts of the eye.

EJEMPLO: EJERCICIO 5.16

Examen diciembre 2022- Una lente está fabricada de vidrio con un índice de refracción de 1,50. Un lado de la lente es plano y el otro es凸 (convexo) con un radio de curvatura, en valor absoluto de 20,0 cm, como se muestra en la figura de la derecha. Si un objeto de 5,00 cm se coloca a 30,0 cm delante de la lente, ¿cuál es el tamaño (en valor absoluto) de la imagen formada?



Para determinar la distancia focal f de la lente, debo usar la ecuación del constructor de lentes:

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

Para usarla debo recordar que: la luz procede la izquierda, R_1 es la superficie de la izquierda y R_2 la derecha; que el radio de curvatura es positivo si su centro de está a la derecha de la lente; y que una superficie plana se considera de radio infinito.

$$n = 1,50 \quad R_1 = +20,0 \text{ cm} \text{ y } R_2 = \infty$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = (1,50 - 1) \left(\frac{1}{20,0} - 0 \right) = 0,0250 \quad f = 40,0 \text{ cm}$$

Ahora calculo la posición de la imagen (s') sabiendo que $s=30,0$ cm y $f=40,0$ cm

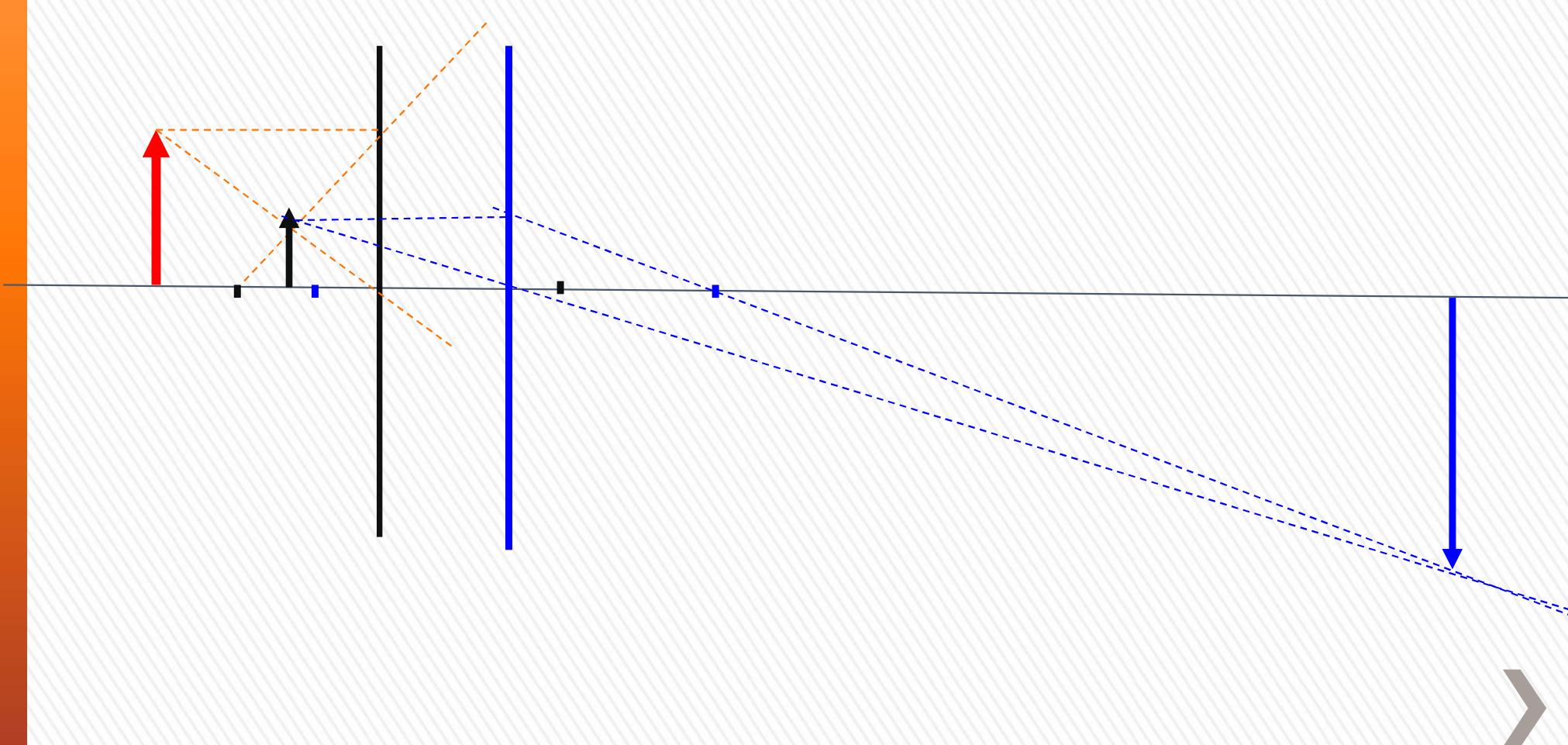
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad s' = \frac{s \cdot f}{s - f} = \frac{30,0 \times 40,0}{30,0 - 40,0} = 120 \text{ cm}$$

$$h' = mh = -\frac{s'}{s} h = -\frac{120}{30,0} (5,00) = -20,0 \text{ cm}$$

La lente es convergente con $f=+40,0$ cm, la imagen es virtual, invertida y de mayor tamaño que el objeto con $h'=-20,0$ cm y se forma a 120 cm a la derecha de la lente.

EJEMPLO: EJERCICIO 5.17

Segundo parcial 2021- Se colocan dos lentes delgadas con una separación de 8,00 cm. La primera de ellas es divergente y la segunda es convergente; ambas tienen una distancia focal de 11,0 cm. Un objeto de 2,50 mm de altura se coloca a 18,0 cm a la izquierda de la lente divergente. Determinar la distancia (medida desde la lente convergente) y la altura (en valor absoluto) de la imagen final.



EJEMPLO: EJERCICIO 5.17

Segundo parcial 2021- Se colocan dos lentes delgadas con una separación de 8,00 cm. La primera de ellas es divergente y la segunda es convergente; ambas tienen una distancia focal de 11,0 cm. Un objeto de 2,50 mm de altura se coloca a 18,0 cm a la izquierda de la lente divergente. Determinar la distancia (medida desde la lente convergente) y la altura (en valor absoluto) de la imagen final.

$$d = 8,00 \text{ cm} \quad f_1 = -11,0 \text{ cm} \quad f_2 = +11,0 \text{ cm} \quad y = 0,250 \text{ cm} \quad s_1 = 18,0 \text{ cm}$$

La lente divergente crea una imagen que será el objeto de la lente convergente. Primero determino la ubicación s'_1 de la imagen creada por la lente divergente y el tamaño de la misma y_1 .

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1} \quad s'_1 = \frac{s_1 f_1}{s_1 - f_1} = \frac{18,0(-11,0)}{18,0 - (-11,0)} = -6,828 \text{ cm}$$

delante de la lente
divergente (la imagen es
virtual y derecha)

$$y_1 = -\frac{s'_1}{s_1} y = -\frac{-6,82}{18,0} 2,50 = 0,9483 \text{ mm}$$

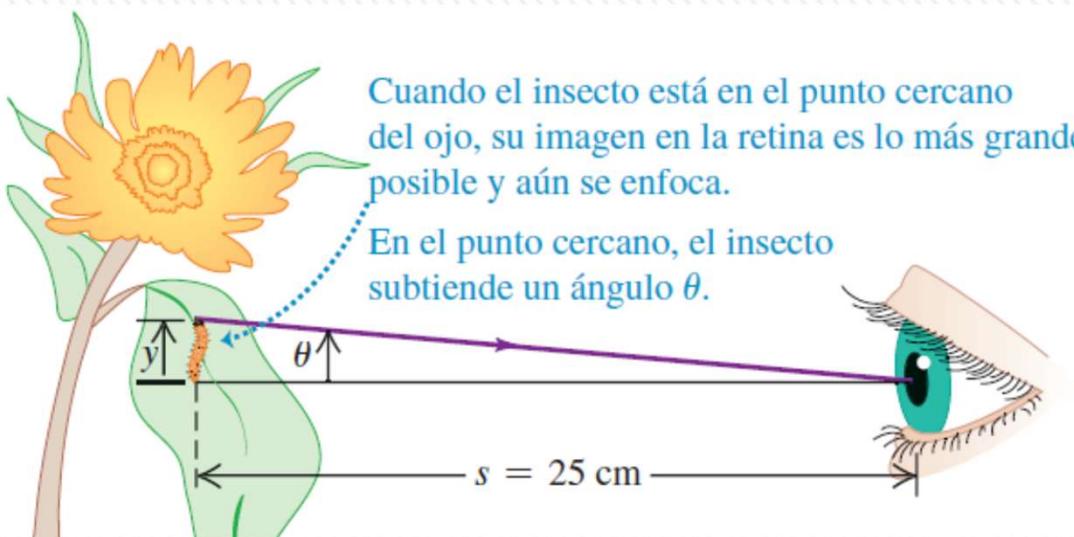
Esta imagen queda a $8,00 + 6,828 = 14,828$, por tanto $s_2 = 14,828 \text{ cm}$

$$s'_2 = \frac{s_2 f_2}{s_2 - f_2} = \frac{14,82759(11,0)}{14,82759 - (11,0)} = 42,61 \text{ cm}$$

$$y_2 = -\frac{s'_2}{s_2} y_1 = -\frac{42,61}{14,828} 0,9483 = -2,725 \text{ mm}$$

La imagen final queda a 42,6 cm a la derecha de la lente convergente y tiene una altura de 2,72 mm. La imagen es real, invertida y aumentada.

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 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).

AGUDEZA VISUAL

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.

La acomodación disminuye gradualmente con la edad, porque el cristalino crece a lo largo de la vida (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**.

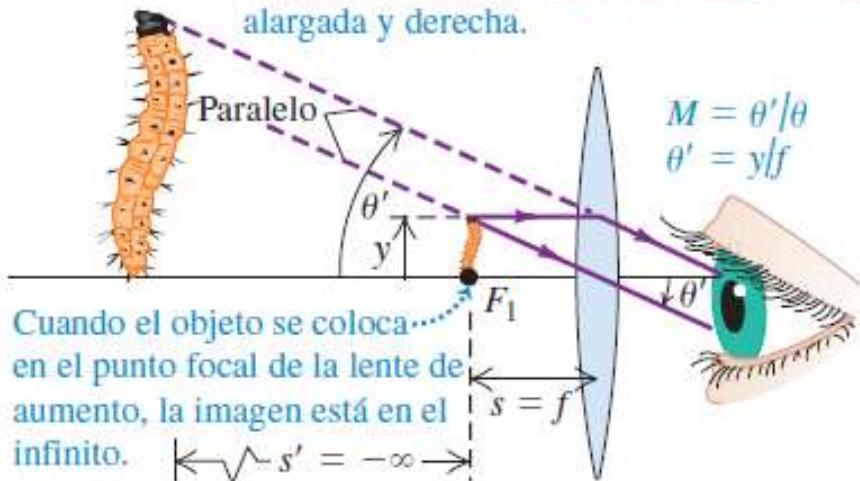
La tabla muestra la posición aproximada del punto cercano en una persona promedio de diversas edades.

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

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.



Cuando el objeto se coloca en el punto focal de la lente de aumento, la imagen está en el infinito. $s' = -\infty$

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

Cuando el objeto está colocado en el punto cercano subtiende un ángulo θ en el ojo dado por: $y = \operatorname{tg}(\theta) \cdot s = \operatorname{tg}(\theta) \cdot (25,0 \text{ cm})$

Pero 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 ($s' = \infty$), de modo que el músculo ciliar del ojo esté relajado, para esto el objeto debe estar en el punto focal F_1 de la lente de aumento ($s = f$).

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' : $y = \operatorname{tg}(\theta') \cdot f$

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**:

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

LA LUPA O LENTE DE AUMENTO

Se usa la aproximación 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:

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

$$y = \operatorname{tg}(\theta') \cdot f \approx \theta' \cdot f \text{ o que: } M_{\min} = \frac{25,0 \text{ cm}}{f}$$

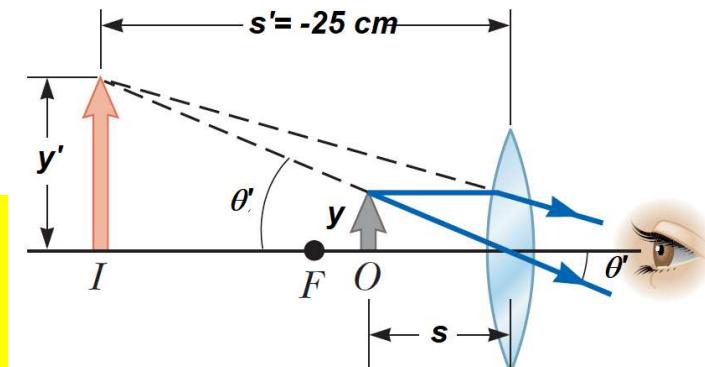
M_{\min} es el aumento mínimo que corresponde al objeto colocado en el foco y la imagen en el infinito, f en cm

Para el caso donde la lente se sostiene cerca del ojo, la amplificación angular es 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, por lo que se impone que $s' = -25,0$ cm y debemos hallar el valor de s para que esto suceda (ya que el objeto no lo colocamos en el foco).

En este caso se obtiene que:

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

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)



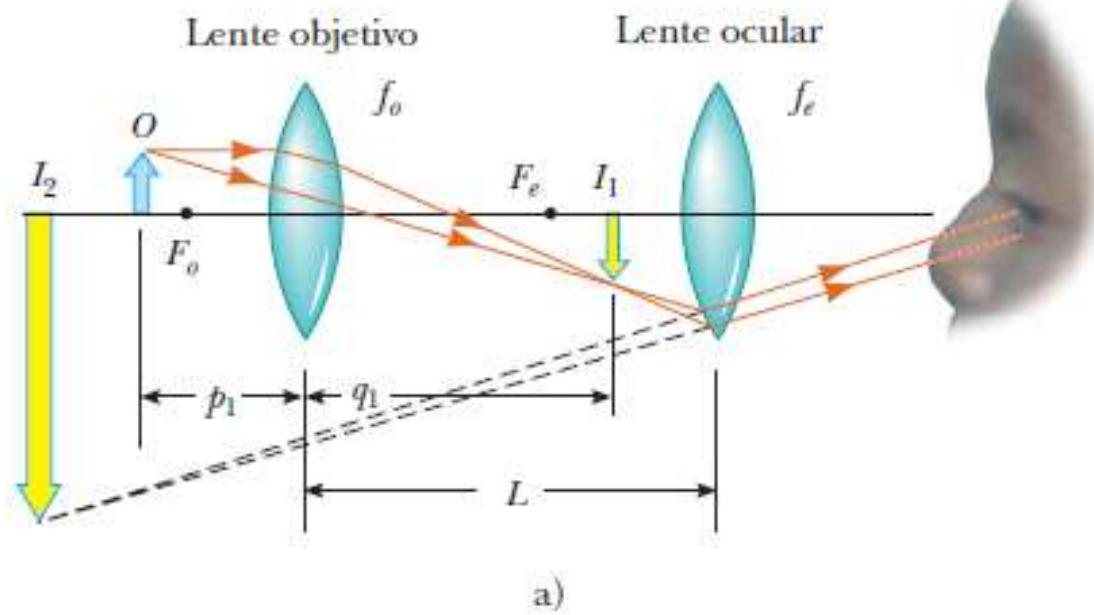
Parecería que es posible agrandar el aumento angular tanto como se desee reduciendo la distancia focal f . De hecho, las aberraciones de una lente simple biconvexa establecen un límite de M entre aproximadamente 3X y 4X.

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 proporciona sólo una ayuda limitada en aumento visual. Se logra una mayor amplificación combinando dos lentes en un dispositivo que se conoce como **microscopio compuesto**.



a)



b)

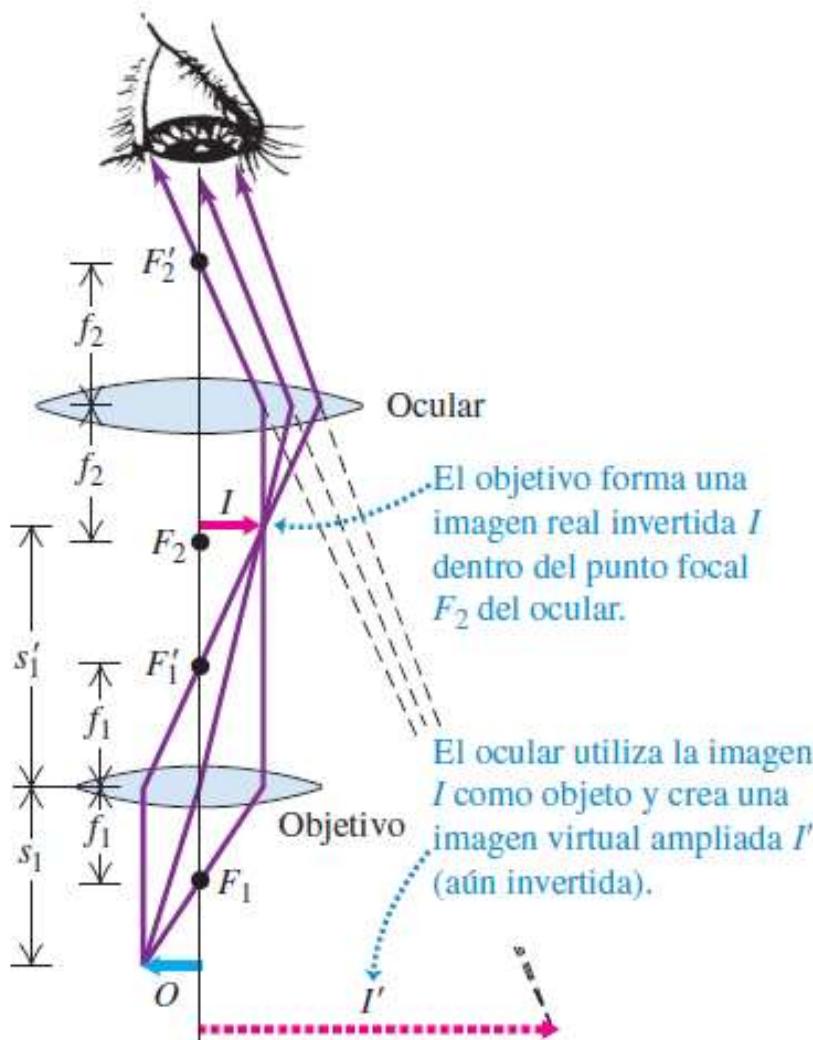
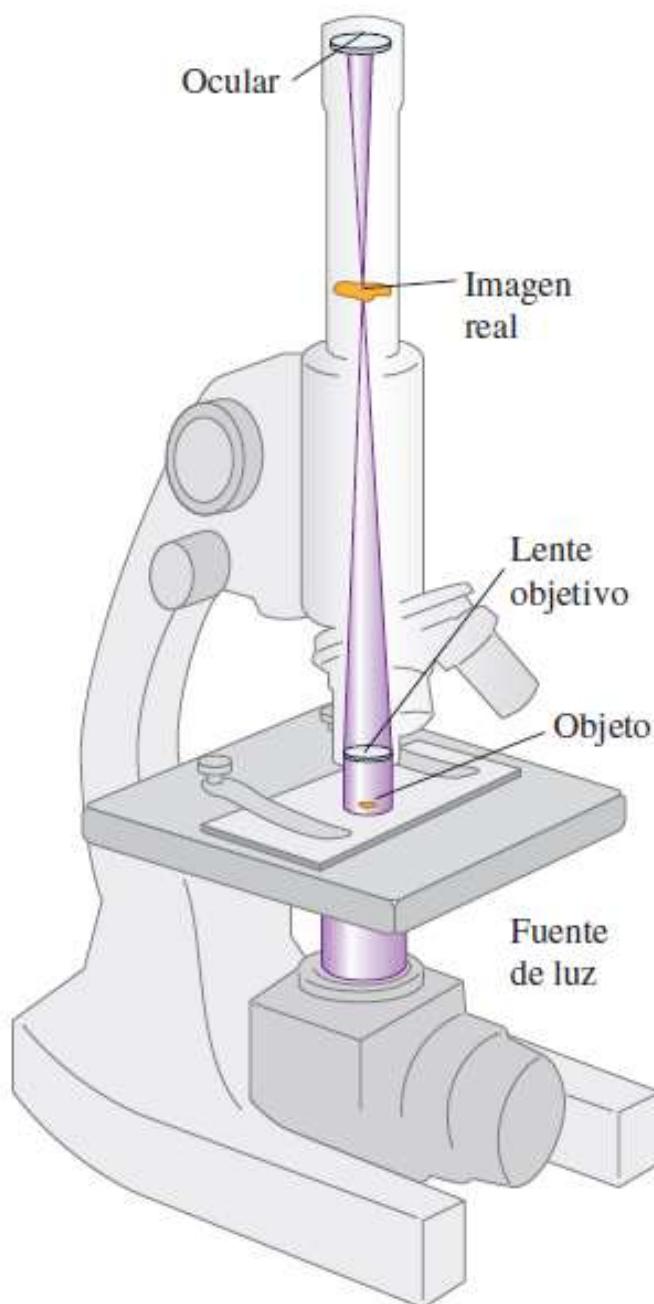
El microscopio compuesto está constituido por una lente, el **objetivo**, que tiene una distancia focal muy corta, menor a 1 cm, y una segunda lente, el **ocular**, que tiene una distancia focal de unos cuantos centímetros.

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 amplificada de la imagen formada por el objetivo*.

MICROSCOPIO ÓPTICO



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

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

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: $s'_1 \approx L$*

La imagen real / 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:

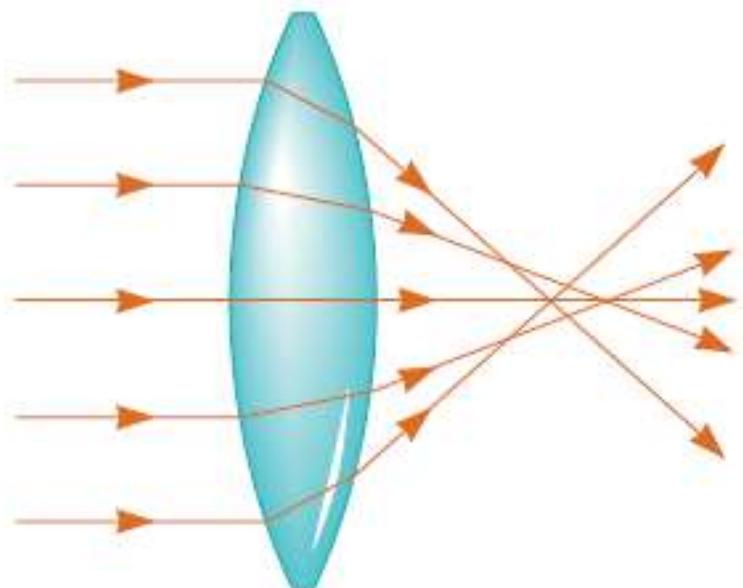
“¿si fuera uno extremadamente paciente y cuidadoso, sería posible construir un microscopio que pudiera hacer visible al ojo humano un átomo?”.

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 átomo deberán ser “vistos” mediante otro tipo de “microscopios”.



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 mas 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.

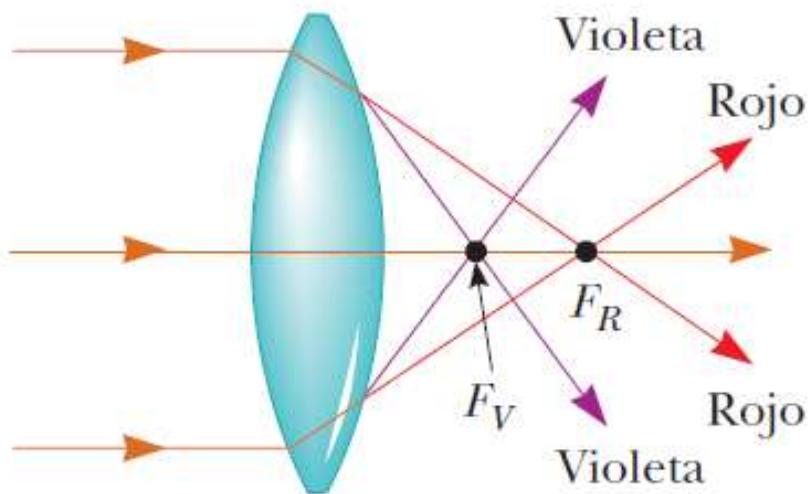
Analisis de lentes supone que los rayos forman ángulos pequeños con el eje principal y que las lentes son delgadas.

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

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.

Aberraciones cromáticas

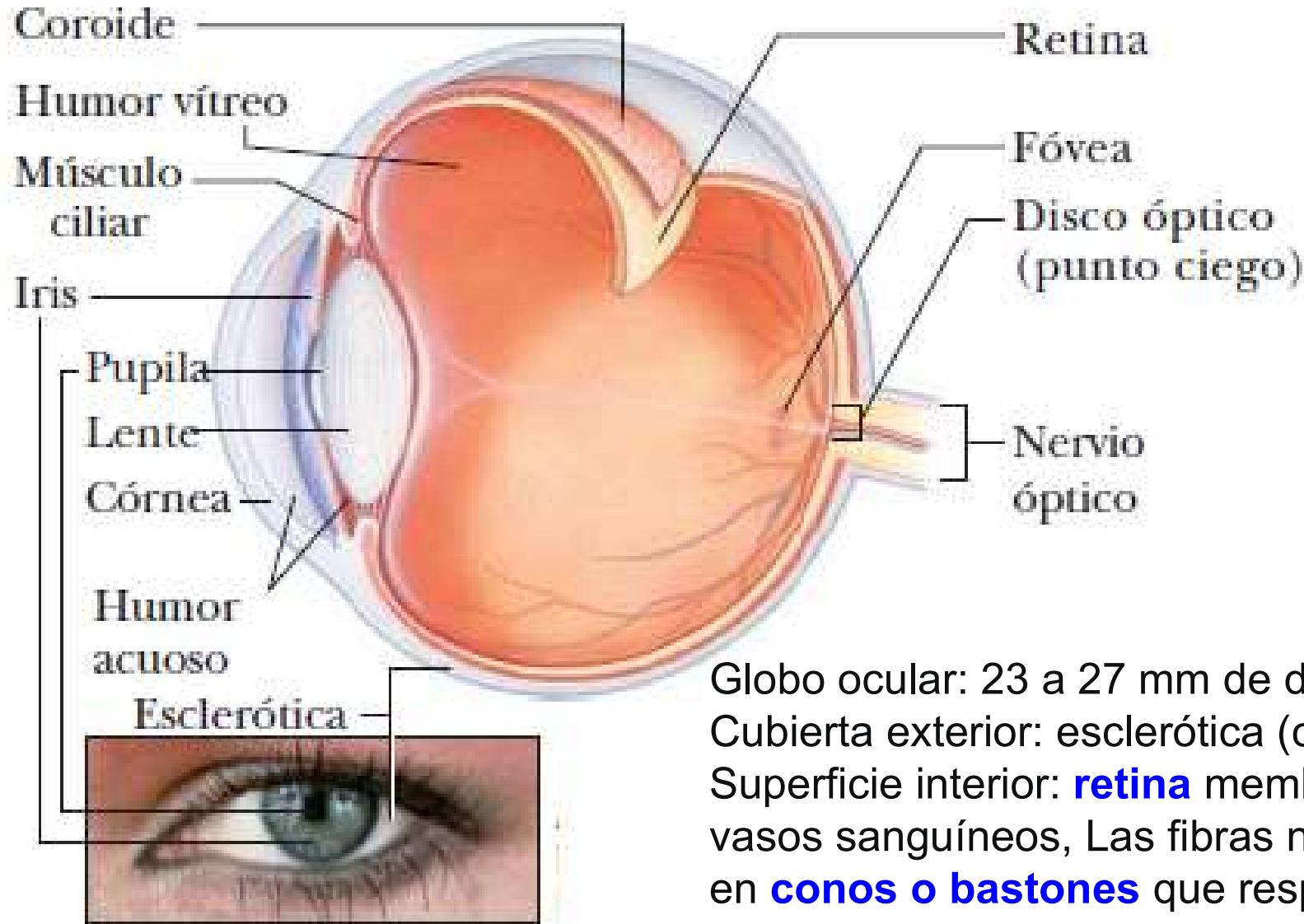
Dispersión: índice de refracción de un material varía en función λ .

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.

EL OJO HUMANO



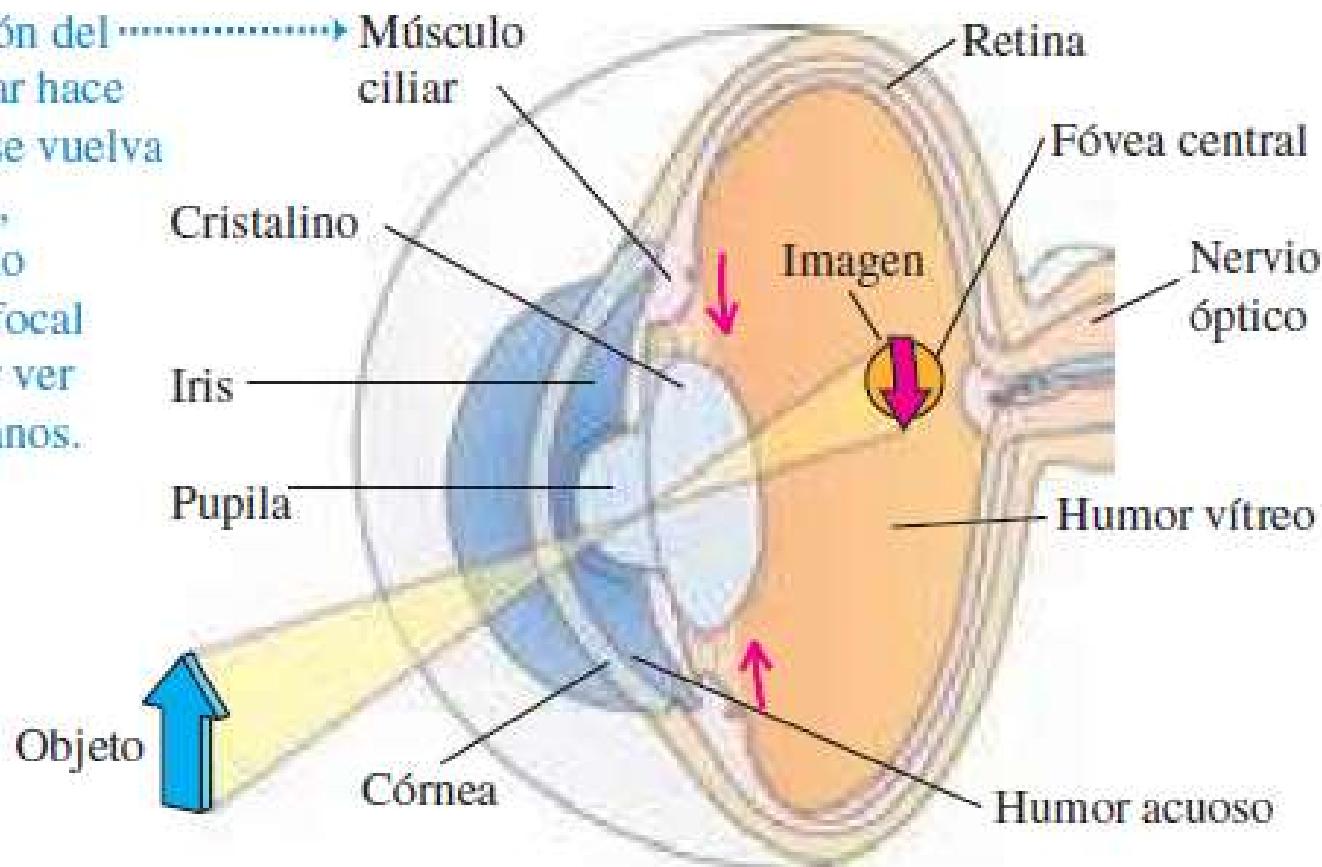
Globo ocular: 23 a 27 mm de diámetro.
Cubierta exterior: esclerótica (casi opaca).
Superficie interior: **retina** membrana con nervios y vasos sanguíneos, Las fibras nerviosas terminan en **conos o bastones** que responden a la luz generando impulsos nerviosos.

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.



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 – Defectos de la visión

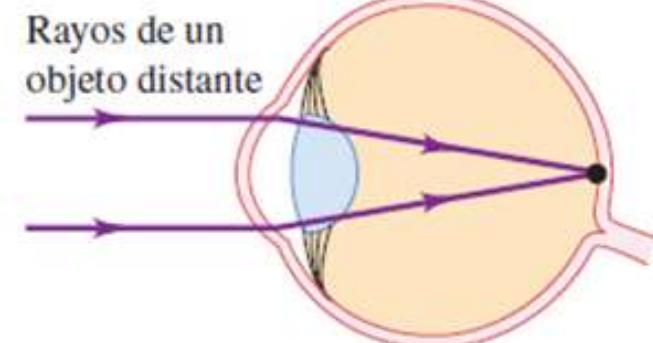
Varios defectos comunes de la visión son resultado de relaciones de distancias incorrectas en el ojo. Un ojo **normal** forma en la retina una imagen de un objeto situado en el infinito cuando el ojo se encuentra relajado (figura a).

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.

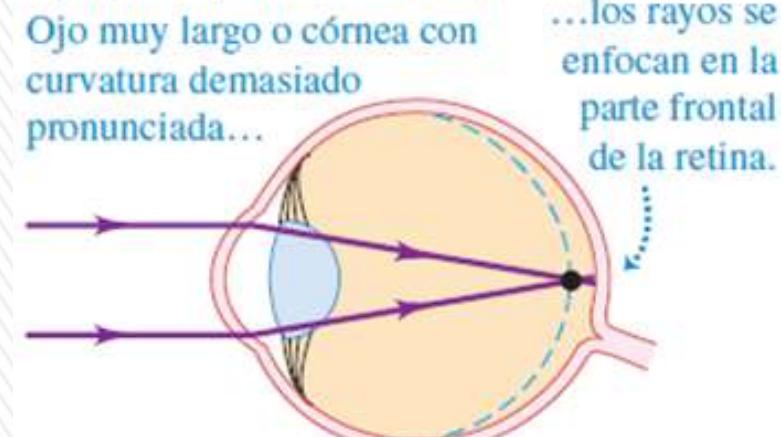
En el ojo **hipermétrope** (problemas de visión a distancias cortas), el globo ocular es demasiado corto o la córnea no tiene la curvatura suficiente, por lo que la imagen de un objeto infinitamente distante se forma detrás de la retina (figura c).

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

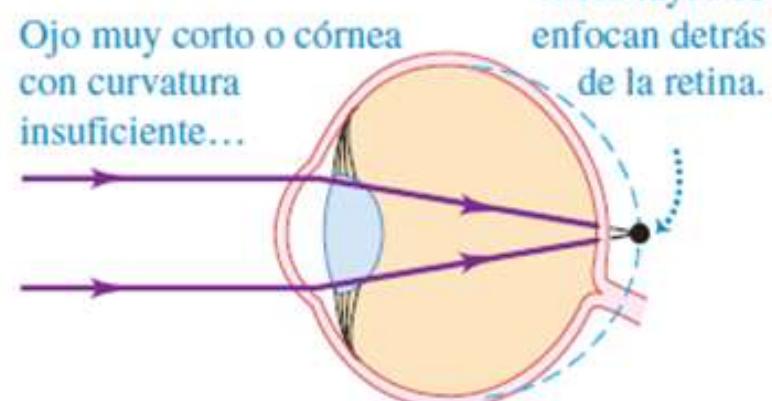
a) Ojo normal



b) Ojo miope (corto de vista)



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



EL OJO – Defectos de la visión

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

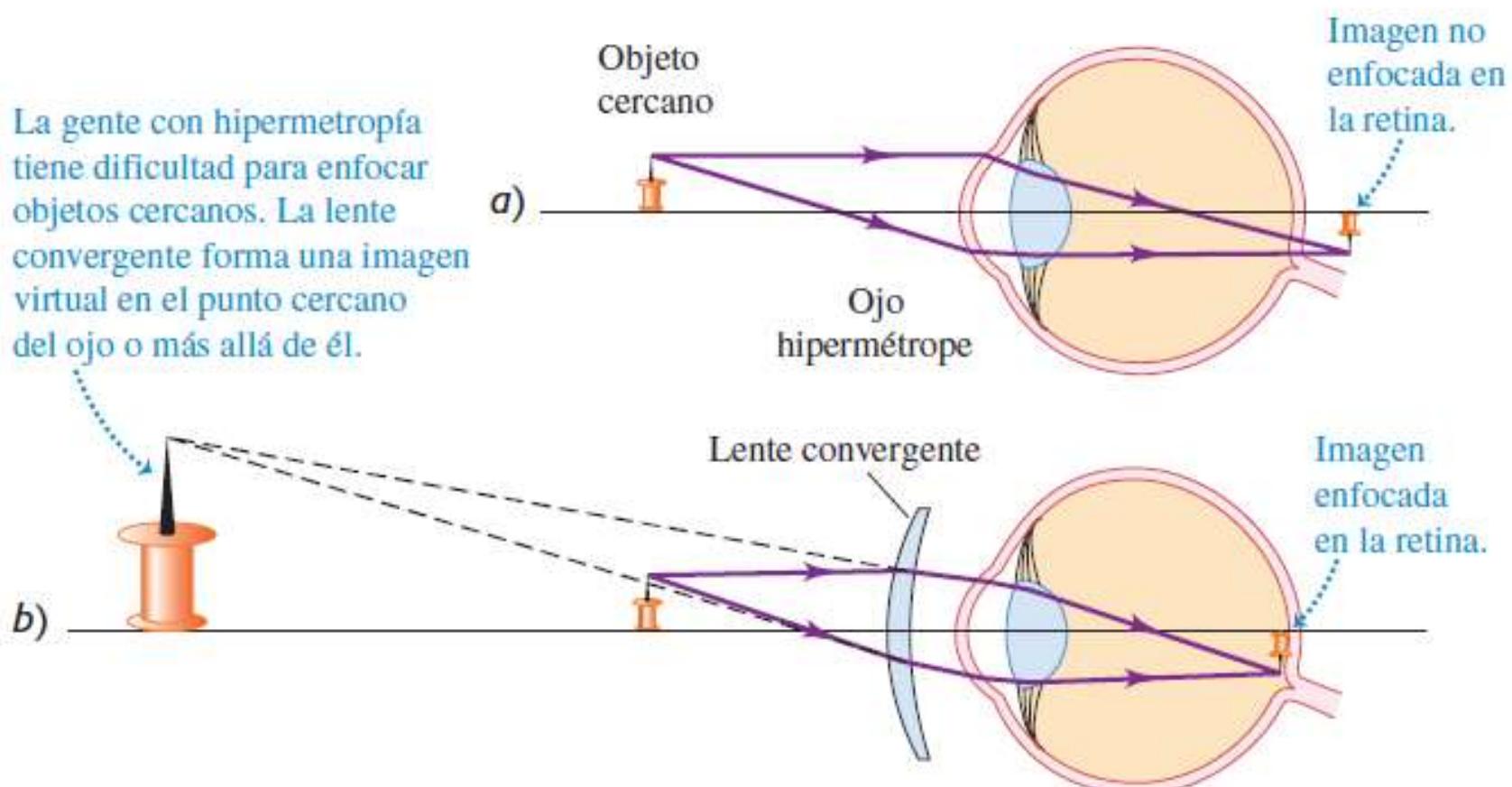
El punto cercano de un ojo tanto **présbita como hipermétrope** está más alejado del ojo que lo normal.

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

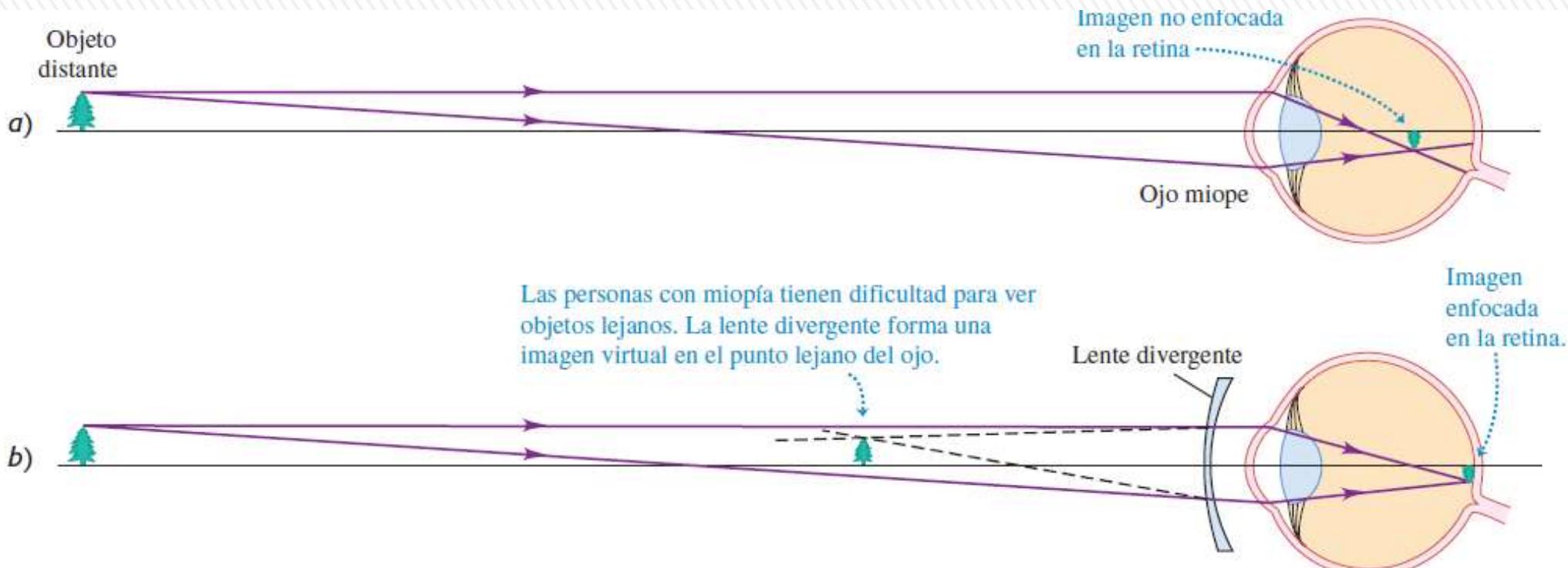
La lente aleja efectivamente el objeto del ojo, hasta un punto donde se puede formar una imagen nítida en la retina.

La gente con hipermetropía tiene dificultad para enfocar objetos cercanos. La lente convergente forma una imagen virtual en el punto cercano del ojo o más allá de él.



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.



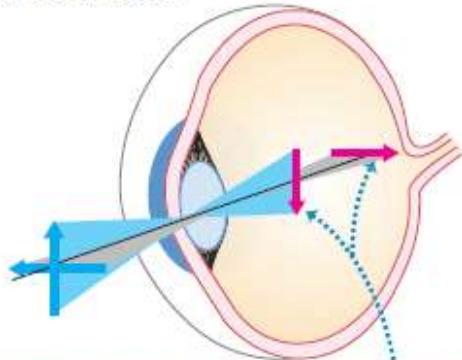
El **astigmatismo** es un tipo de defecto diferente, en el cual la superficie de la córnea no es esférica, sino que tiene una curvatura más pronunciada en un plano que en otro.

En consecuencia, tal vez la imagen de las líneas horizontales se forma en un plano diferente que la imagen de las líneas verticales.

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

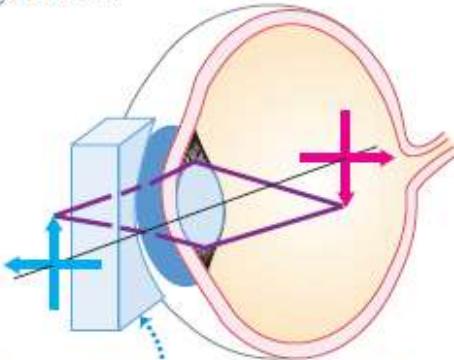
EL OJO – Defectos de la visión

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.

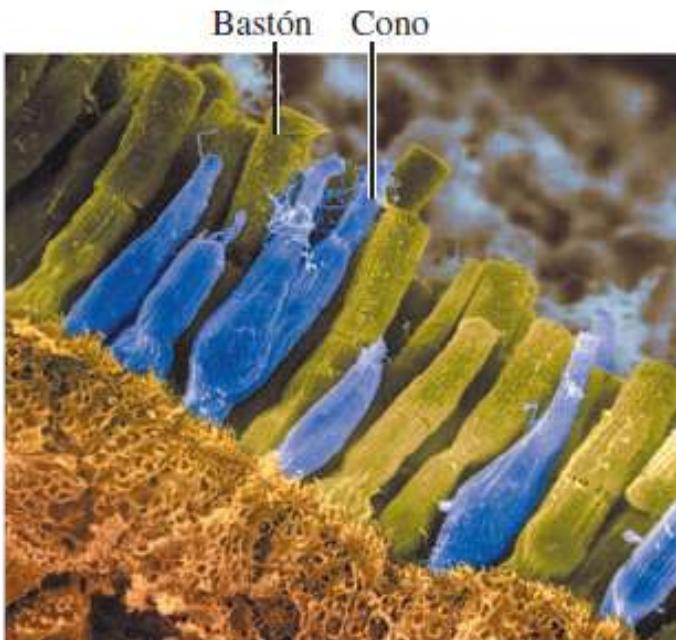
Cuando una lente cilíndrica con su eje horizontal se coloca delante del ojo, la lente no altera los rayos en un plano horizontal, pero la divergencia adicional de los rayos en un plano vertical hace que estos se enfoquen nítidamente sobre la retina (figura b).

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**.

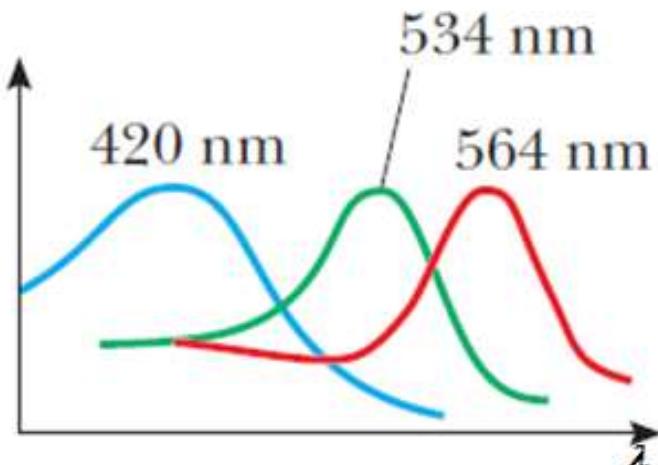
De esta manera, una lente con $f = 0,50$ m tiene una potencia de 2,0 dioptías, $f = -0,25$ corresponde a -4,0 dioptías, y así sucesivamente.

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

EL OJO HUMANO



Micrografía de barido 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 escotóptica 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 fóvea. 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 se puede en una televisión, no es realmente amarillo, ¡es rojo y verde!



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.