

Tema III : ÓPTICA

1. Naturaleza de la luz : evolución histórica de las distintas ideas
2. Propiedades de la luz : velocidad e índice de refracción, propagación rectilínea, reflexión y refracción
3. Sistemas ópticos : lentes, espejos, prismas
4. Instrumentos ópticos : ojo, lupa, anteojos, cámara fotográfica...

- **Aplicación del principio de Huygens para justificar la ley de la refracción**

Supongamos dos medios separados por una línea en los que la velocidad de las ondas es diferente. Supongamos un frente de ondas.

t = tiempo que tarda A en llegar a O' .

$$\text{sen } \theta = \frac{AO'}{OO'} \quad AO' = v_1 \cdot t \quad \text{sen } \theta = \frac{v_1 \cdot t}{OO'}$$

$$\text{sen } \theta' = \frac{OA'}{OO'} \quad OA' = v_2 \cdot t \quad \text{sen } \theta' = \frac{v_2 \cdot t}{OO'}$$

$$\frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } \theta'} = \frac{v_1}{v_2}$$

1. Naturaleza de la luz: evolución histórica de las distintas ideas

A) Ideas antiguas

En la época de los griegos se creía que la visión se producía porque los cuerpos materiales estaban revestidos de una especie de **fluido** misterioso que, al desprenderse de los mismos y alcanzar el ojo, llevaba información.

Otra teoría decía que el ojo emitía el fluido que rebotaba en los objetos con información.

B) Teoría corpuscular de Newton (1704)

La luz consiste en unos **corpúsculos** que son emitidos por los focos luminosos y proyectados a gran velocidad. Los colores de la luz se corresponderían a distintas masas de los corpúsculos. Explicaba la refracción y la reflexión, pero no explicaba porqué se daban a la vez.

C) Teoría ondulatoria de Huygens

Contemporáneo de Newton, plantea una teoría **ondulatoria**. La luz consiste en un fenómeno ondulatorio, similar al sonido, que se propaga en un medio. Esta onda sería longitudinal y no se podría propagar por el vacío.

D) Teoría ondulatoria de Fresnel - Young (segunda mitad s. XVIII)

Fresnel descubre el fenómeno de la difracción y Young las interferencias. En esa época también se descubre la polarización, que sólo afecta a ondas transversales, por lo que se descartaba la teoría de Huygens y se admitía que la luz sería una **onda transversal**.

Fallaba en la justificación de la velocidad elevada de la luz, y su aumento al pasar por un medio menos denso.

E) Teoría electromagnética de Maxwell (segunda mitad s. XIX)

Maxwell unificó las teorías de electricidad y magnetismo, con lo que llegó a la conclusión de que ciertos circuitos eléctricos tendrían que emitir unas ondas, que llamó **electromagnéticas**, las que podrían propagarse en el vacío a la velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s. Diez años más tarde Hertz consiguió emitir estas ondas mediante un circuito oscilante (antena), y cumplían todas las propiedades de las ondas luminosas y velocidad similar, por lo que la luz tendría que ser un tipo de onda electromagnética de alta frecuencia. Entonces a la luz se le podría aplicar toda la teoría electromagnética. Se pensó que la Física había explicado todo lo que se podía explicar.

F) Doble naturaleza de Einstein y Planck

A finales del siglo pasado se descubrieron tres importantes fenómenos: radiación del cuerpo negro (Planck), el efecto fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por algunos metales cuando se les ilumina (Einstein), y el efecto Compton, que consiste en la dispersión de luz por electrones, la luz dispersada cambia la frecuencia.

Para explicar estos fenómenos hubo que acudir a las hipótesis de Planck, una vuelta a la teoría corpuscular: la luz está formada por cuantos o partículas (fotones) de forma que la energía de cada fotón sería proporcional a la frecuencia: $E = h \cdot \nu$.

Para explicar algunos fenómenos como interferencias, difracción y polarización se necesita utilizar la teoría ondulatoria; para otros fenómenos en los que la luz interacciona con partículas, hay que volver a la teoría corpuscular. Este **doble carácter** de la luz fue la base para dar lugar a la creación de la de física moderna (Física Cuántica).

2. Propiedades de la luz : velocidad e índice de refracción, propagación rectilínea, reflexión y refracción**• Diferenciación entre óptica física y óptica geométrica**

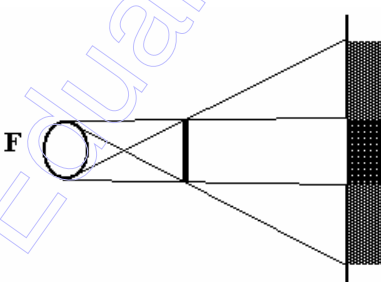
Óptica física: la que necesita hacer uso de la naturaleza ondulatoria de la luz y se centra en los fenómenos exclusivamente ondulatorios (interferencia, difracción y polarización).

Óptica geométrica: parte de la óptica que se limita al estudio de las desviaciones que sufren los rayos de luz al pasar de un medio a otro. Está basada en dos principios: propagación rectilínea en medios homogéneos e isótropos, y en las leyes de la reflexión y refracción. Es un caso límite de la óptica física. Utiliza dos conceptos básicos: rayo e índice de refracción.

a) Velocidad e índice de refracción

La luz tiene una velocidad finita muy elevada ($3 \cdot 10^8$ m/s en el vacío). El índice de refracción nunca es inferior a uno porque no hay ningún medio en el que la velocidad sea mayor que en el

vacío. c (vacío) v (medio) Índice de refracción : $n = \frac{c}{v}$

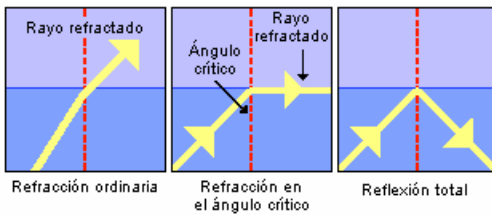
b) Propagación rectilínea

Medio homogéneo e isótropo es en el que la luz tiene la misma velocidad independientemente de la posición y de la dirección. En estos medios la luz se propaga en línea recta. Se demuestra mediante la formación de sombras y penumbras.

c) Reflexión y refracción

Reflexión : la luz rebota en la superficie (retrocede al cambiar de medio).

Refracción : la luz pasa a través de una superficie (pasa de un medio a otro).



Las dos se rigen por las **leyes de Snellius** :

• **Leyes para la reflexión**

1. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están contenidos en el mismo plano.
2. El ángulo incidente es igual al reflejado : $\Phi = \Phi'$

• **Leyes para la refracción**

1. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están contenidos en el mismo plano.
2. $n \cdot \sin \Phi = n' \cdot \sin \Phi'$

Si $n > n' \rightarrow \sin \Phi > \sin \Phi' \rightarrow \Phi' > \Phi$ El ángulo de salida es mayor que el de entrada (el rayo se separa de la normal).

Ángulo límite : ángulo Φ_L para el cual el ángulo refractado es 90° .

$$\Phi_L \rightarrow \Phi' = \frac{\pi}{2}$$

$$n \cdot \sin \Phi_L = n' \cdot \sin \Phi' = n' \cdot \sin 90^\circ = n' \cdot 1 \rightarrow \boxed{\sin \Phi_L = \frac{n'}{n}}$$

Si $n < n' \rightarrow$ el rayo refractado se acerca a la normal, por lo que no hay ángulo límite.

3. Sistemas ópticos

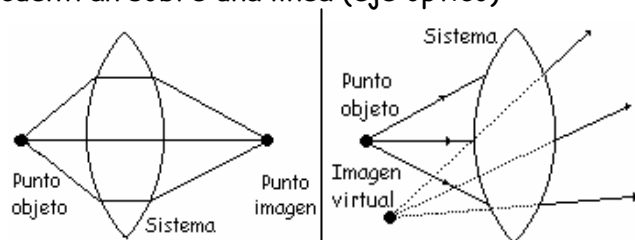
Conceptos fundamentales

- **Sistema óptico** : conjunto de superficies que separan medios distintos (medios con distintos índices de refracción).

Sistemas ópticos centrados : las superficies que separan los medios son esféricas y los centros de curvatura de esas superficies se encuentran sobre una línea (eje óptico)

- **Punto objeto** : todo punto del cual parten los rayos hacia el sistema.

- **Punto imagen** : punto en el que convergen los rayos que proceden del objeto y han atravesado el sistema.



* **Imagen real** : los rayos convergen realmente en la imagen.

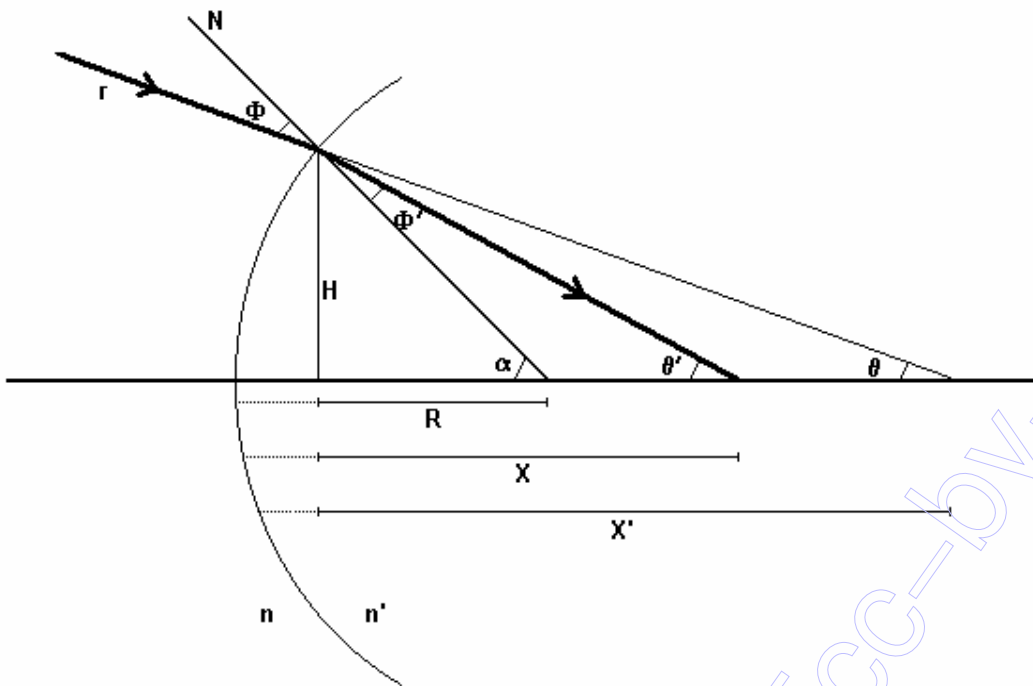
* **Imagen virtual** : los rayos no convergen en la imagen, pero si los prolongamos hacia atrás convergen en un punto (imagen virtual).

Dioptrio

Es el sistema óptico más sencillo : una superficie que separa dos medios de distinto índice.

1. La **ecuación del dioptrio** relaciona la distancia objeto con la distancia imagen y con el radio del dioptrio. El radio es la normal.

Todas las demostraciones se hacen con aproximación paraxial : los ángulos son muy pequeños, luego $\text{tg } \Phi \approx \sin \Phi \approx \Phi$



$$\alpha = \Phi + \theta \rightarrow \Phi = \alpha - \theta$$

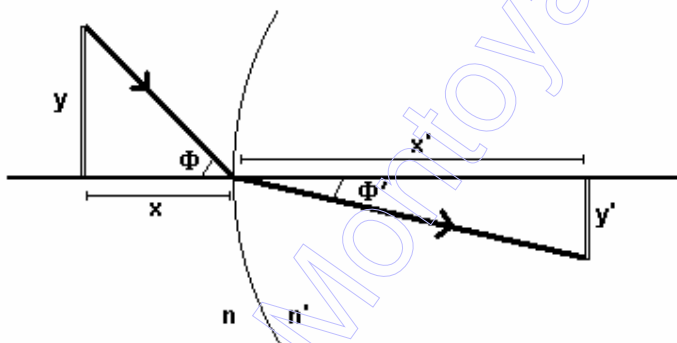
$$\alpha = \Phi' + \theta' \rightarrow \Phi' = \alpha - \theta'$$

$$n \cdot \sin \Phi = n' \cdot \sin \Phi' \rightarrow n \cdot \Phi = n' \cdot \Phi' \rightarrow n \cdot (\alpha - \theta) = n' \cdot (\alpha - \theta')$$

$$\alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{R} \quad \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{H}{X} \quad \theta' \approx \operatorname{tg} \theta' = \frac{H}{X'}$$

Ecuación de Abbe : $n \left(\frac{H}{R} - \frac{H}{X} \right) = n' \left(\frac{H}{R} - \frac{H}{X'} \right) \rightarrow n \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{X} \right) = n' \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{X'} \right)$

2. Ecuación del aumento



$$n \cdot \Phi = n' \cdot \Phi'$$

$$\Phi \approx \operatorname{tg} \Phi = \frac{y}{x}$$

$$\Phi' \approx \operatorname{tg} \Phi' = \frac{y'}{x'}$$

$$n \cdot \frac{y}{x} = n' \cdot \frac{y'}{x'}$$

$$\text{Aumento (A)} = \frac{y'}{y}$$

$$A = \frac{y'}{y} = \frac{n \cdot x'}{n' \cdot x}$$

a) Espejos

Un espejo es una superficie que separa dos medios, pero en lugar de actuar por refracción lo hace por reflexión.

$$n \cdot \sin \Phi = n' \cdot \sin \Phi' \rightarrow n' = -n \rightarrow \sin \Phi = -\sin \Phi' \rightarrow \Phi = -\Phi'$$

Las ecuaciones de los medios que actúan por reflexión se deducen de las que se hayan obtenido para la refracción usando este truco ($n' = -n$).

Ecuación general : $n\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{x}\right) = n'\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{x'}\right) \rightarrow n\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{x}\right) = -n\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{x'}\right) \rightarrow \frac{1}{R} - \frac{1}{x} = \frac{1}{x'} - \frac{1}{R} \rightarrow$

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

- Se denomina **foco del espejo** a un punto que sería imagen de otro punto infinitamente alejado del espejo.

$$x = \infty \quad x' = \text{foco}$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{x'} = \frac{2}{R} \rightarrow \boxed{x' = \frac{R}{2}}$$

- **Convenio de signos para espejos y lentes**

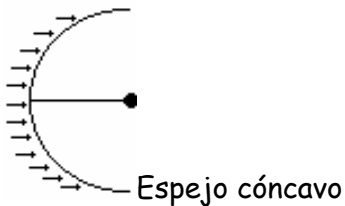
1. Distancias horizontales : las del objeto o la imagen se consideran positivas cuando están a la derecha.
2. Distancias verticales : todo lo que esté por encima del eje será positivo.

Ecuación del aumento para la reflexión

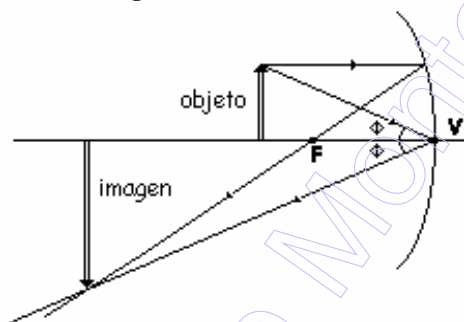
$$A = \frac{y'}{y} = \frac{n \cdot x'}{n' \cdot x} \quad n' = -n$$

$$A = -\frac{n \cdot x'}{n \cdot x} \rightarrow \boxed{A = -\frac{x'}{x}}$$

Espejos cóncavos y convexos



Trazado geométrico



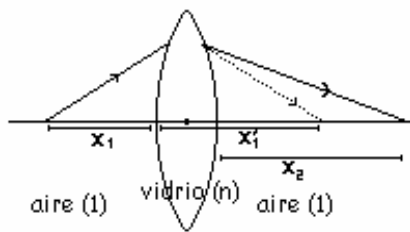
A partir del punto objeto se trazan dos rayos, uno paralelo al eje, que cuando choca con la superficie del espejo se desvía hacia el foco ; y otro que va al vértice y sale rebotado con el mismo ángulo. El punto de corte de estos dos rayos será la imagen del punto objeto.

Naturaleza de la imagen

- { **Derecha** : la imagen está orientada hacia el mismo lado que el objeto.
- { **Invertida** : la imagen está orientada hacia el lado opuesto del objeto.
- { **Real** : los rayos se cortan (sale a la izquierda).
- { **Virtual** : se cortan las prolongaciones de los rayos (sale a la derecha).

b) Lentes

Una lente son dos dioptrios consecutivos.



- Lente delgada : lente cuyo grosor es mucho más pequeño que los radios de curvatura de sus dioptrios. Al ser lente delgada se considera que $x_1' = x_2$ (los dos vértices coinciden). Hay que aplicar dos veces la ecuación de Abbe.

$$1\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{x_1}\right) = n\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{x_1'}\right) \rightarrow \text{Primera cara : } x_1' = x_2 \rightarrow 1\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{x_1}\right) = n\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{x_2}\right)$$

$$1\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{x_2}\right) = n\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{x_2'}\right) \rightarrow \text{Segunda cara}$$

$$\text{Primera cara} \rightarrow \frac{1}{R_1} - \frac{1}{x_1} - \frac{n}{R_1} = -\frac{n}{x_2} \quad \text{Segunda cara} \rightarrow \frac{1}{R_2} - \frac{1}{x_2'} - \frac{n}{R_2} = -\frac{n}{x_2}$$

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{x_1} - \frac{n}{R_1} = \frac{1}{R_2} - \frac{1}{x_2'} - \frac{n}{R_2} \rightarrow -\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2'} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \rightarrow$$

$$\boxed{-\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}$$

x_1 = distancia primer objeto - lente
 x_2 = distancia segunda imagen - lente

Focos

- Foco objeto (f) : punto cuya imagen está en el infinito $\rightarrow x = ? \quad x' = \infty$
- Foco imagen (f') : punto que es la imagen del infinito $\rightarrow x = \infty \quad x' = ?$

Potencia

$$P = \frac{1}{|f'|} \text{ (dioptrías)}$$

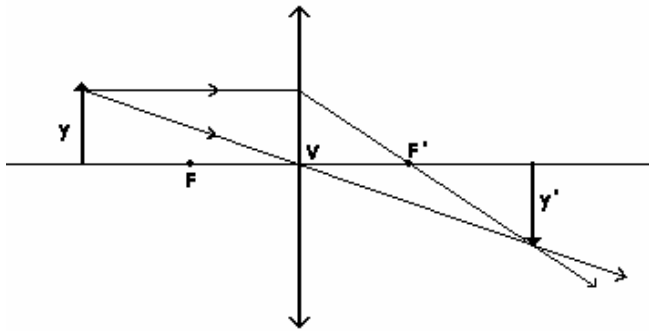
Tipos de lentes

- Según la distancia focal
 - * Convergentes : $f' > 0$ El foco imagen está a la derecha (más gruesas por el centro).
 - * Divergentes : $f' < 0$ El foco imagen está a la izquierda (más gruesas por los bordes).
- Según las formas de curvatura
 - Biconvexa (|), bicóncava (|), convexo-plana (|, cóncavo-plana (|), plano-cóncava (|, plano-convexa (|), convexo-cóncava ((...

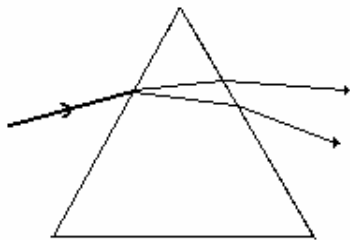
Aumento

$$A = \frac{n \cdot x'}{n \cdot x} \quad \text{Lentes : } n = n' = 1 \rightarrow \boxed{A = \frac{x'}{x}}$$

Formación de imagen



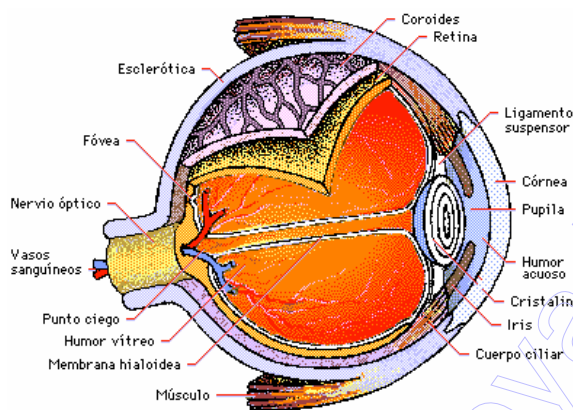
Un rayo paralelo al eje va hacia el foco imagen tras chocar con la lente. Un rayo que pase por el vértice continúa sin desviarse.



c) Prismas

Normalmente hay dos refracciones, una en cada cara. Tienen un carácter dispersor. El índice de refracción del vidrio depende de la longitud de onda, y como cada color tiene una distinta, si entra un rayo mezcla de colores éstos salen dispersados.

4. Instrumentos ópticos



a) Ojo

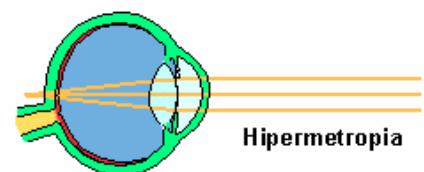
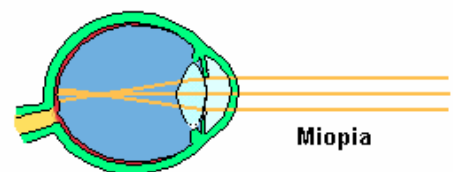
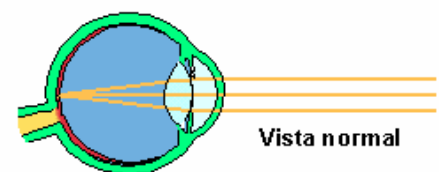
Es un sistema convergente con simetría esférica. El cristalino se puede curvar más o menos para que la imagen formada se proyecte siempre en la fóvea a pesar de que el objeto esté a más o menos distancia.

- **Punto remoto** : punto más alejado que es capaz de enfocar el ojo (el infinito en un ojo sano).

- **Punto próximo** : punto más cercano que es capaz de enfocar el ojo (unos 25 cm en un ojo sano).

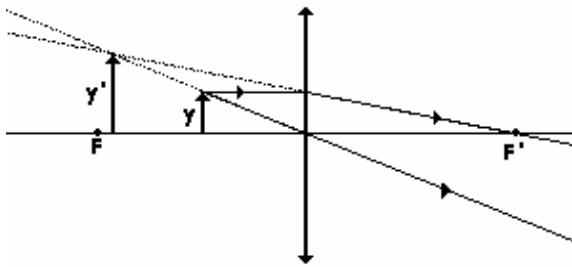
Enfermedades de la vista :

- * **Miopía** : Un haz de rayos paralelos que vienen del infinito, con el cristalino relajado de un ojo sano, se enfoca en la fóvea. En un ojo miope, el haz converge antes de la fóvea (exceso de convergencia). Se corrige poniendo delante una lente divergente).
- * **Hipermetropía** : el punto remoto converge detrás de la fóvea (ojo poco convergente). Se corrige poniendo una lente convergente (). Acarrea problemas para ver de cerca.
- * **Presbicia** : Dificultad para ver objetos cercanos (el punto próximo se va distanciando con la edad). Se corrige con lentes convergentes ().
- * **Astigmatismo** : Pérdida de la simetría esférica del ojo, con o que no hay la misma convergencia en todos los puntos y se deforman los objetos. Se corrige con lentes de distinta curvatura según la dirección.



Instrumentos de visión cercana

b) Lupa



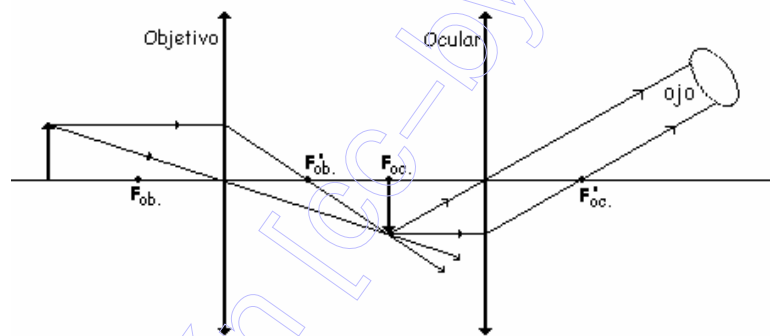
Es una simple lente convergente. Funciona formando una imagen virtual y aumentada, para la que el objeto hay que situarlo más cerca del foco. El aumento es variable, depende de cuanto se acerque el objeto. Hay un aumento estándar o comercial : $0,25/f'$, referido a unas condiciones determinadas.

c) Microscopio

Sistema formado por dos lentes convergentes : objetivo y ocular. El objetivo forma una imagen real y el ocular actúa como una lupa formando una imagen virtual. Los rayos salen paralelos con lo que no hay fatiga ocular. El aumento comercial es :

$$A = \frac{-0,25 \cdot D}{f_1' \cdot f_2'}$$

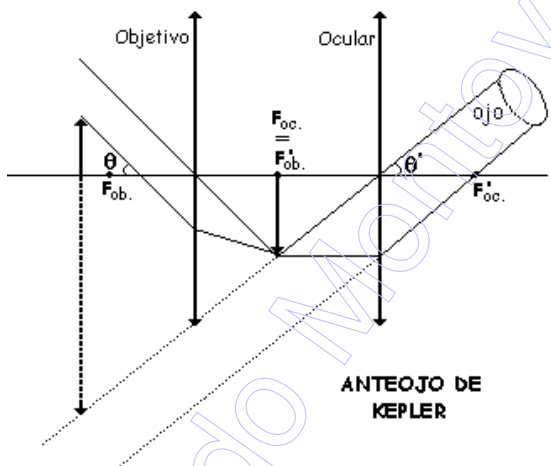
donde D es el intervalo óptico (distancia entre el foco imagen del objetivo y el foco del ocular).



Instrumentos de visión lejana

d) Anteojo

Combinación de dos lentes que pueden ser convergentes las dos (Kepler) o convergente una y divergente la otra (Galileo).



Plano focal imagen : si dos rayos son paralelos entre sí y paralelos al eje entonces se cortan en f' , y el plano focal imagen es el plano que pasa por f' perpendicular al eje. Si los rayos son paralelos entre sí pero no son paralelos al eje también se cortan en el plano focal pero no en el foco.

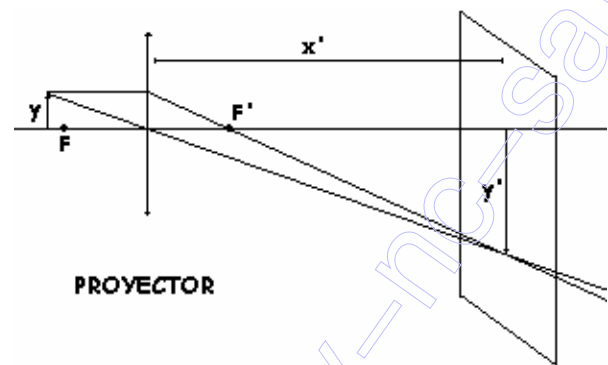
* **Anteojo de Kepler** : Este anteojo invierte la imagen. El foco imagen del objetivo debe ser el foco objeto del ocular. Aumento angular :

$$A_{ang} = \frac{\text{tg } \theta'}{\text{tg } \theta}$$

* **Anteojo de Galileo** : Corrige el defecto de la inversión poniendo el ocular divergente.

Instrumentos ópticos de proyección**e) Proyector**

Instrumento óptico que forma una imagen real, invertida y muy aumentada de tamaño sobre una pantalla mediante una lente convergente situando el objeto muy cerca del foco, pero sin superarlo. La longitud x' puede variar para enfocar la imagen.

**f) Cámara fotográfica**

Instrumento óptico que forma una imagen real, invertida y de menor tamaño sobre una placa sensible mediante una lente convergente. La longitud x' puede variar para enfocar la imagen. El objeto debe de estar alejado del foco.

