

NATURALEZA DE LA LUZ Y LEYES DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA

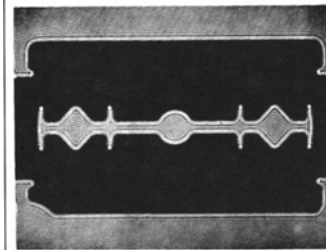
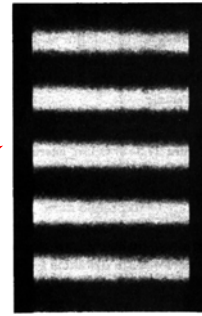
Newton $\rightarrow$ teoría corpuscular $\rightarrow$ leyes de reflexión
y refracción

Huygens (1629-1695) $\rightarrow$ teoría ondulatoria
 $\downarrow$
difracción de la luz (Grimaldi: 1660)

Young (1773-1829) demuestra la naturaleza ondulatoria
de la luz $\rightarrow$ experimentos de interferencia

$\rightarrow$ Este fenómeno no se puede explicar con la teoría
corpuscular

Maxwell (1873) demostró que la luz es una onda
electromagnética y que ésta viaja con velocidad constante
en el vacío.



233

Sin embargo, la teoría ondulatoria no explica el efecto
fotoeléctrico.

Einstein (1905) explica este fenómeno usando un modelo
que supone que la energía de una onda de luz se
presenta en paquetes de energía llamados fotones, es
decir la energía está cuantizada.

Por lo tanto, la naturaleza de la luz es dual, es decir,
a veces se comporta como una onda y otras como una
partícula.

234

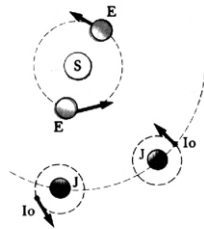
MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ C

Galileo $\rightarrow$ ¡c es grande!



$$t = \frac{d}{c} \sim \frac{10 \text{ km}}{300.000 \text{ km/s}} \sim 3 \times 10^{-5} \text{ s}$$

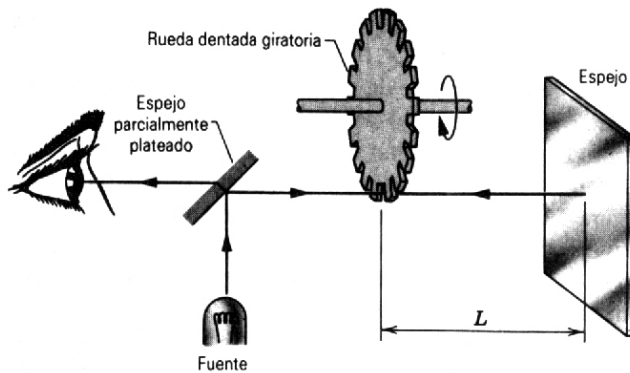
Roemer (1644-1670) $\rightarrow c \sim 2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$



235

Fizeau (1819-1896)

$$t = \frac{\theta}{\omega} \Rightarrow c = \frac{2d}{t} = \frac{2d\omega}{\theta} \Rightarrow c \sim 3.1 \times 10^8 \text{ m/s}$$



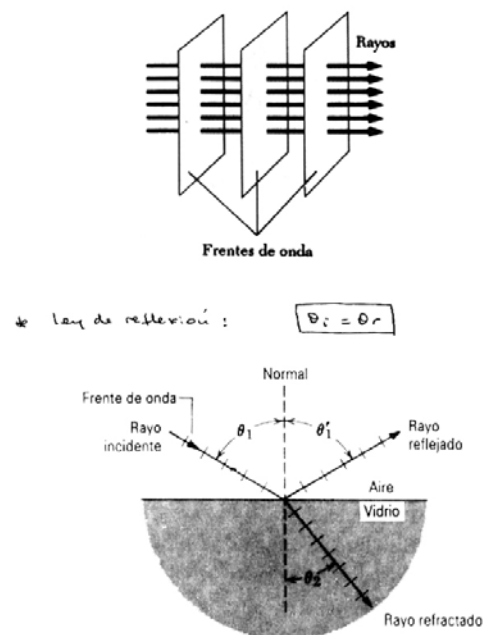
236

TABLA 1 LA VELOCIDAD DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN EL VACÍO
(ALGUNAS MEDICIONES SELECCIONADAS)

Fecha	Experimentador	País	Método	Velocidad (km/s)	Incertidumbre (km/s)
1600(?)	Galileo	Italia	Linternas y persianas	"Extraordinariamente rápida"	
1676	Roemer	Francia	Las lunas de Júpiter	"Finita"	
1729	Bradley	Inglaterra	La aberración de la luz de las estrellas	304,000	
1849	Fizeau	Francia	La rueda dentada	313,300	
1862	Foucault	Francia	El espejo giratorio	298,000	500
1880	Michelson	E.U.A.	El espejo giratorio	299,910	50
1906	Rosa y Dorsey	E.U.A.	La teoría electromagnética	299,781	10
1923	Mercier	Francia	Ondas estacionarias en alambres	299,782	15
1926	Michelson	E.U.A.	El espejo giratorio	299,796	4
1950	Bergstrand	Suecia	El geodímetro	299,792.7	0.25
1950	Essen	Inglaterra	La cavidad de microondas	299,792.5	3
1950	Bol y Hansen	E.U.A.	La cavidad de microondas	299,789.3	0.4
1951	Aslakson	E.U.A.	El radar Shotan	299,794.2	1.9
1952	Rank y otros	E.U.A.	Los espectros moleculares	299,766	7
1952	Froome	Inglaterra	El interferómetro de microondas	299,792.6	0.7
1958	Froome	Inglaterra	El interferómetro de microondas	299,792.50	0.10
1967	Grosse	Alemania	El geodímetro	299,792.5	0.05
1973	Evenson y otros	E.U.A.	Las técnicas del láser	299,792.4574	0.0012
1978	Woods y otros	Inglaterra	Las técnicas del láser	229,792.4588	0.0002
1987	Jennings y otros	E.U.A.	Las técnicas del láser	299,792.4586	0.0003

237

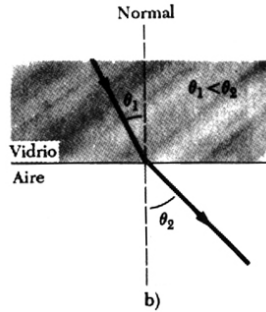
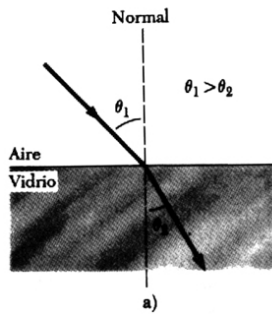
ÓPTICA GEOMÉTRICA



238

* Ley de refracción :
 (Ley de Snell - Descartes)

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



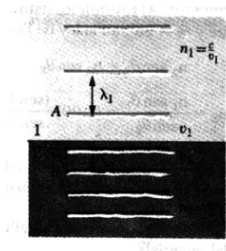
$$n = \frac{c}{v} = \text{índice de refracción}$$

c = velocidad de la luz en el vacío

v = velocidad de la luz en el medio $< c \Rightarrow n > 1$

239

* La frecuencia de una onda no cambia al pasar de un medio a otro.



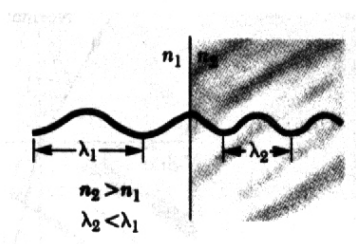
$$v_1 = f \lambda_1$$

$$v_2 = f \lambda_2$$

$$\Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

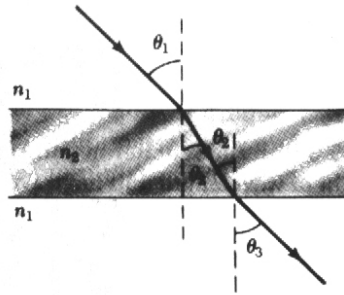
$$\therefore \lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$$

$$\text{Si } n_2 > n_1 \Rightarrow \lambda_2 < \lambda_1$$



240

Ejemplo 1



$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_2 &= \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \\ \sin \theta_3 &= \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

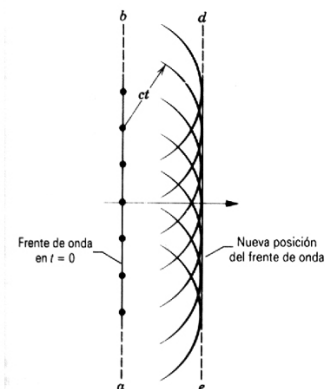
$$\theta_3 = \theta_1$$

∴ la placa no altera la dirección del haz de luz, sólo provoca un desplazamiento lateral.

241

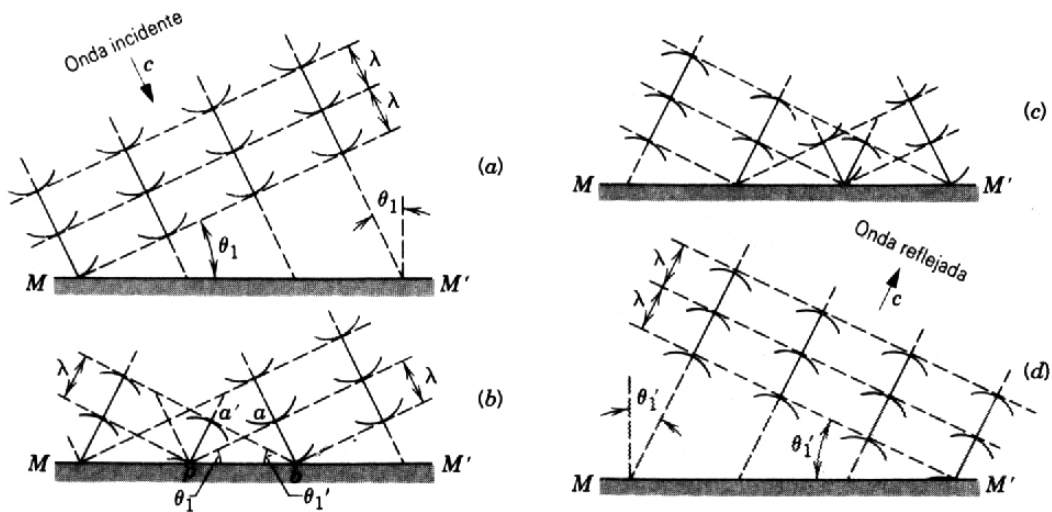
PRINCIPIO DE HUYGENS

"Todos los puntos localizados sobre un frente de onda se consideran como fuentes puntuales que producen ondas esféricas secundarias, que se propagan alejándose con la rapidez característica de las ondas en ese medio. Después de un intervalo de tiempo la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a las ondas secundarias".



242

Ley de Reflexión



243

Ley de Reflexión

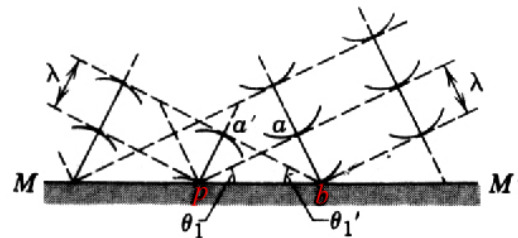
$$ab = \lambda = a'p$$

$$\Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{ab}{pb}$$

$$\sin \theta_1' = \frac{a'p}{pb} = \frac{ab}{pb} = \sin \theta_1$$

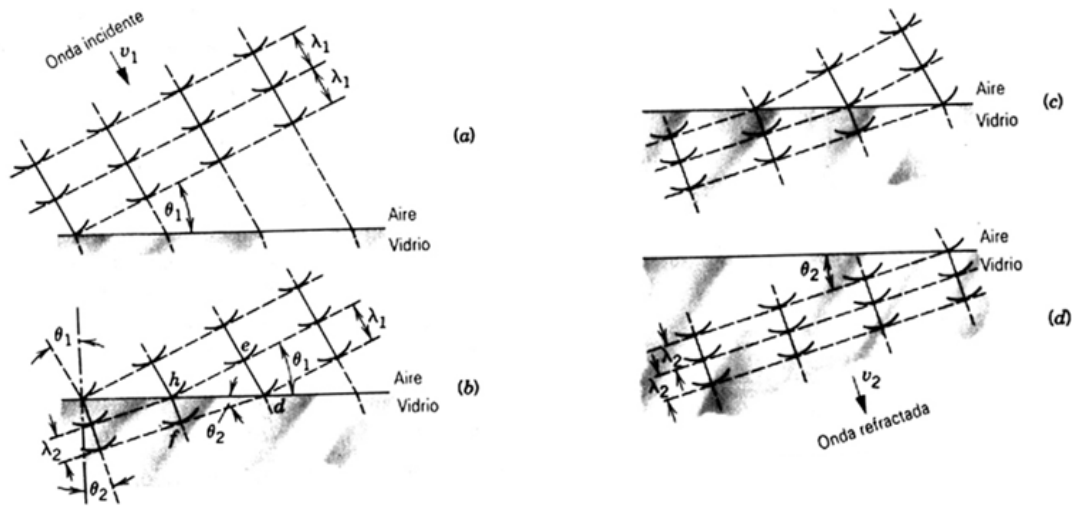
$$\Rightarrow \sin \theta_1 = \sin \theta_1'$$

$$\theta_1 = \theta_1'$$



244

LEY DE REFRACCION



245

Ley de Refracción

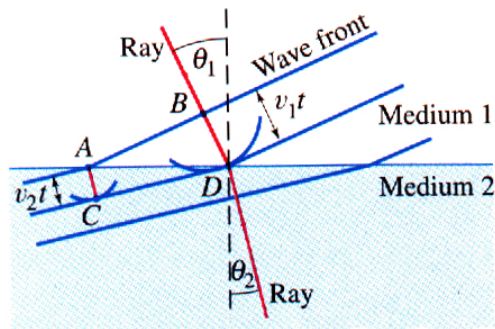
$$\sin \theta_1 = \frac{v_1 t}{AD}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{v_2 t}{AD}$$

$$\Rightarrow \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

pero $n = \frac{c}{v}$ entonces

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



246

EFFECTO DOPPLER EN LA LUZ

* SONIDO

$$v = \frac{v_0}{1 - v_s/v}$$

donde v_s = velocidad de la fuente

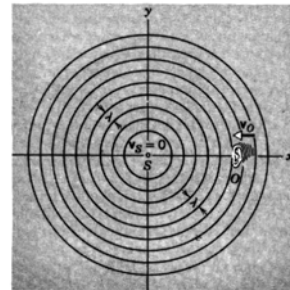
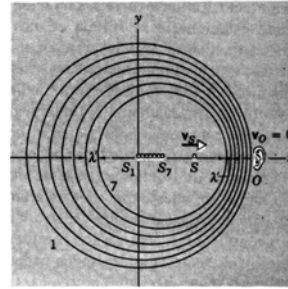
y v = velocidad del sonido

$$v = v_0 \left(1 + \frac{v_{obs}}{v} \right)$$

donde v_{obs} = velocidad del

observador

! Ambas situaciones no son equivalentes !



247

* LUZ : usando Relatividad Especial

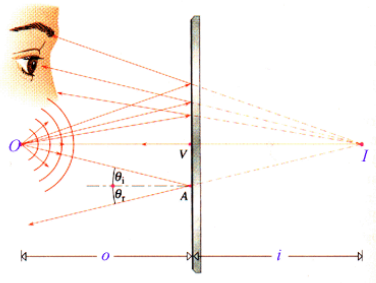
$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 + u/c}{1 - u/c}}$$

donde u es la velocidad relativa entre la fuente y el observador.

Según la Relatividad Especial ambas situaciones son indistinguibles (equivalentes).

248

IMÁGENES EN ESPEJOS PLANOS

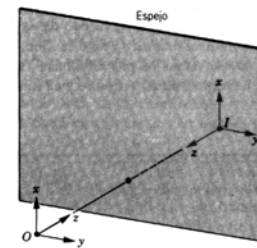
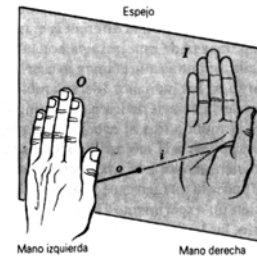


$O = -i$
↑
el signo - indica que
I y O están en lados
opuestos del espejo

Una imagen es real si la luz pasa por el punto imagen

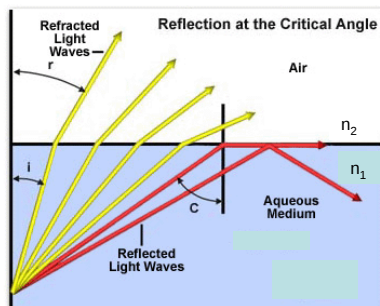
Una imagen es virtual si la luz se comporta como si
divergiera de la imagen pero realmente no pasa por este
punto

En un espejo plano la imágenes son siempre virtuales.



249

REFLEXIÓN INTERNA TOTAL



$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\Rightarrow \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

donde $n_1 > n_2$

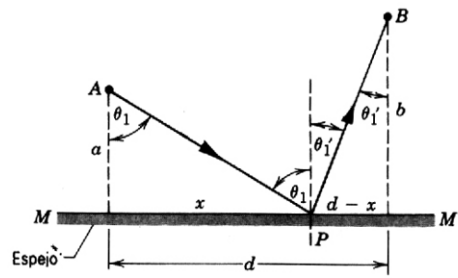
la reflexión interna total existe cuando la luz
pasa de un medio con índice de refracción mayor
a otro con índice menor.

250

PRINCIPIO DE FERMAT

"Cuando un rayo de luz viaja entre dos puntos, su trayectoria real será aquella que requiera el mínimo de tiempo"

Ley de reflexión



$$t = \frac{L}{c} = \frac{1}{c} \left[\sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2} \right]$$

251

$$\frac{dt}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{1}{2c} \frac{2x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{1}{2c} \frac{2(d-x)}{[b^2 + (d-x)^2]^{1/2}} = 0$$

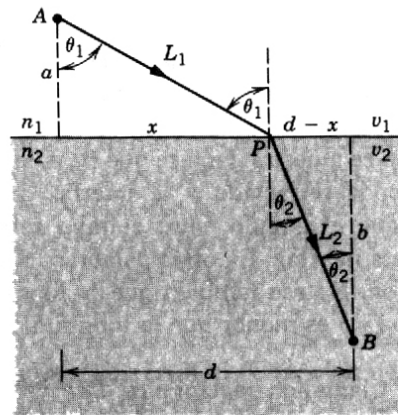
$$\frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

$$\text{pero } \sin \theta_i = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} \quad \text{y} \quad \sin \theta_r = \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

$$\therefore \theta_i = \theta_r$$

252

ley de refracción



$$t = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} = \frac{n_1 L_1 + n_2 L_2}{c} = \frac{L}{c}$$

con $L \equiv n_1 L_1 + n_2 L_2 = \text{longitud del camino óptico}$

253

$$L = n_1 \sqrt{a^2 + x^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

entonces

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c} \frac{dL}{dx} = \frac{n_1}{c} \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{n_2}{c} \frac{(d-x)}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} = 0$$

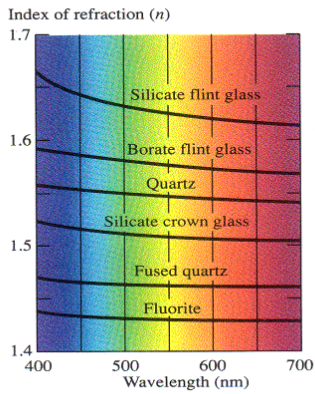
$$\Rightarrow \underbrace{n_1 \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}}}_{\sin \theta_1} = \underbrace{n_2 \frac{(d-x)}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}}_{\sin \theta_2}$$

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

254

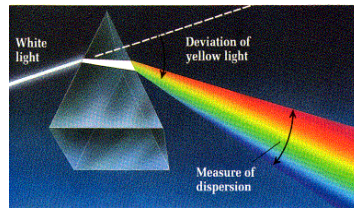
PRISMAS Y DISPERSIÓN DE LA LUZ

El índice de refracción depende de la longitud de onda de la luz incidente.



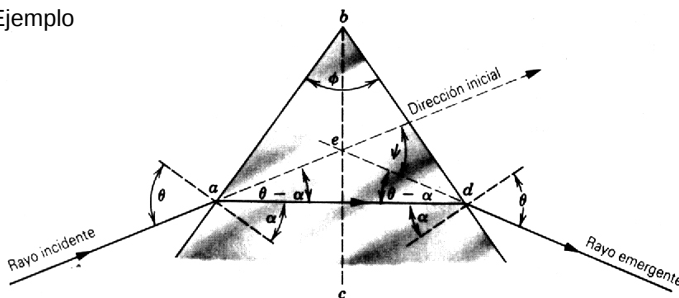
En consecuencia, la ley de Snell predice que el ángulo de la onda refractada también depende de la longitud de onda.

En general, el índice de refracción es mayor para λ menores, es decir, la luz azul se desvía más que la luz roja. Así "funcionan" los prismas.



255

Ejemplo



$$\angle bad + \alpha = \frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{\phi}{2}$$

$$\angle bad + \frac{\phi}{2} = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{En el triángulo aed: } \psi = 2(\theta - \alpha)$$

$$\Rightarrow \theta = \frac{1}{2}(\psi + \phi)$$

256

En el punto a se tiene

$$\sin \theta = n \sin \alpha$$

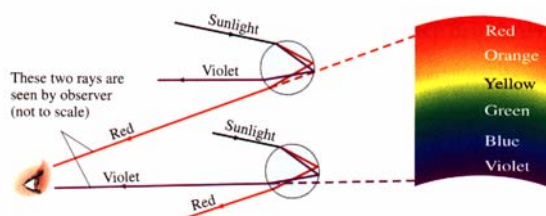
donde n es el índice de refracción del vidrio

Entonces

$$\sin\left(\frac{\psi + \phi}{2}\right) = n \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

$$\therefore n = \frac{\sin\left(\frac{\psi + \phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

257



258

ÓPTICA GEOMÉTRICA

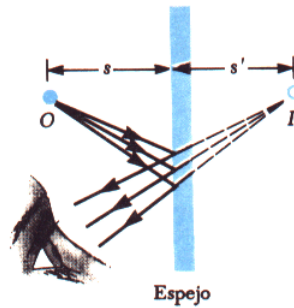
Formación de imágenes por reflexión y refracción en superficies planas y curvas (espejos) y en lentes.

Caso más simple: espejo plano

s = distancia objeto

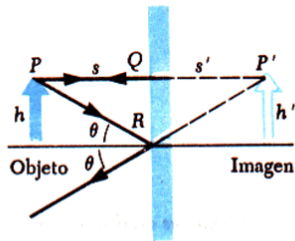
s' = distancia imagen

Las imágenes siempre se forman en el punto donde los rayos de luz se intersectan o en el punto de donde aparentan originarse.



259

Para poder localizar el punto donde se forma la imagen, es necesario seguir la trayectoria de al menos dos rayos de luz cuando se reflejan en el espejo.



La imagen de un objeto que se encuentra frente a un espejo plano se localiza atrás del espejo y a la misma distancia que está el objeto del espejo.

La altura de la imagen h' es igual a la altura del objeto h .

La amplificación lateral se define por

$$M = \frac{\text{altura de la imagen}}{\text{altura del objeto}} = \frac{h'}{h}$$

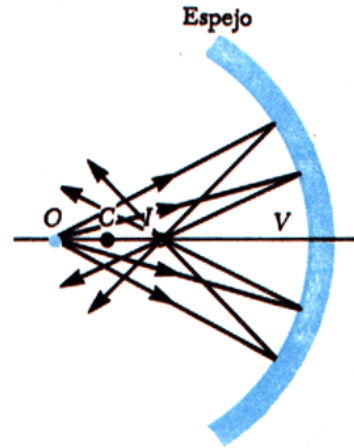
Para un espejo plano $M = 1$.

260

ESPEJOS ESFÉRICOS

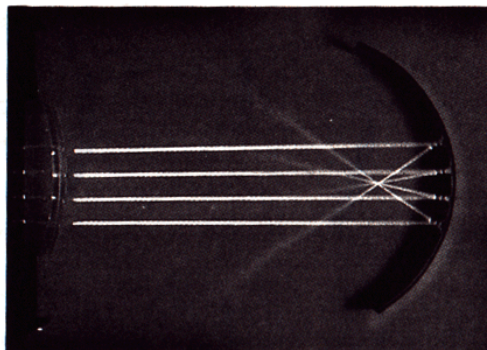
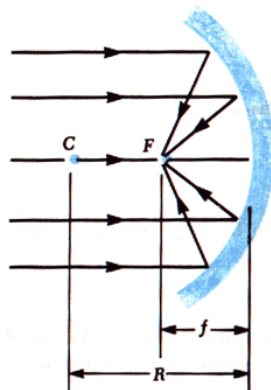
Un espejo donde la luz se refleja en el interior de la superficie cóncava se denomina espejo cóncavo.

El espejo tiene radio de curvatura R y el centro de curvatura se encuentra en C . El punto V es el vértice del segmento esférico y la recta trazada desde C hasta V es el eje principal del espejo.



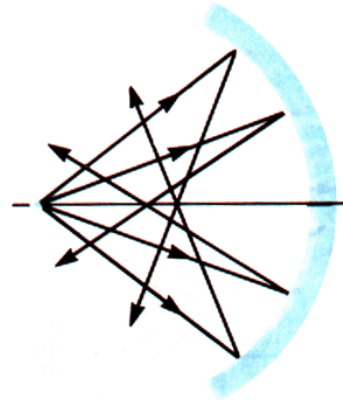
261

En general, estudiaremos sólo el caso de rayos paraxiales, es decir, vamos a suponer que los rayos que divergen del objeto forman un pequeño ángulo con el eje principal. Todos estos rayos al reflejarse pasan por el punto imagen y no se produce aberración esférica.



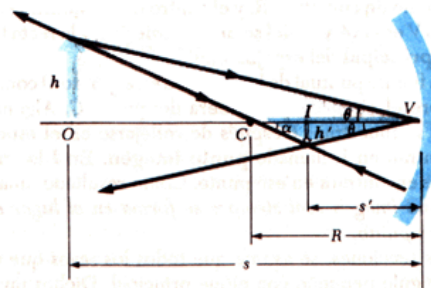
262

La aberración esférica es el resultado de que los puntos focales de los rayos alejados del eje óptico de un espejo (o lente) son diferentes de los puntos focales de los rayos que pasan próximos al eje óptico.



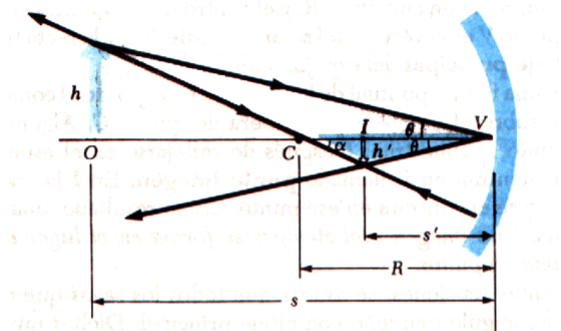
263

Dibujemos dos rayos de luz que salen de la cabeza del objeto. Uno de estos rayos pasa por el centro de curvatura del espejo C , incidiendo de frente sobre el espejo y regresando sobre sí mismo. El segundo rayo incide sobre el centro del espejo (el punto V) y se refleja obedeciendo la ley de reflexión.



264

La imagen de la cabeza de la flecha se formará en el punto donde se interseccion los dos rayos.



De la geometría de la figura se tiene

$$\tan \theta = \frac{h}{s}$$

$$\tan \theta = -\frac{h'}{s'} \quad (\text{el signo - significa que la imagen está invertida})$$

$\Rightarrow h' \text{ es negativa}$

265

La amplificación del espejo es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s}$$

De los otros triángulos de la figura se ve que

$$\tan \alpha = \frac{h}{s-R} \quad \text{y} \quad \tan \alpha = -\frac{h'}{R-s'}$$

$$\Rightarrow \frac{h'}{h} = -\left(\frac{R-s'}{s-R}\right) = -\frac{s'}{s}$$

266

Entonces

$$s(R-s') = s'(s-R)$$

$$sR - ss' = s's - s'R$$

$$(s+s')R = 2ss'$$

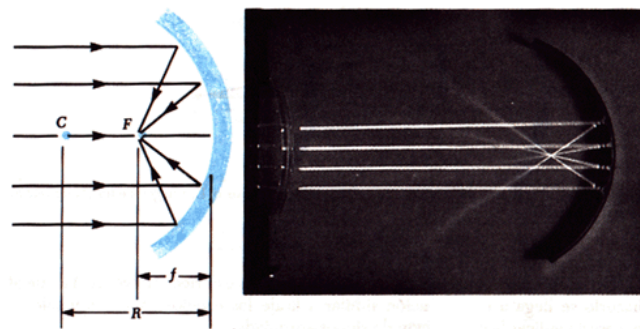
$$s+s' = 2\frac{ss'}{R}$$

$$\boxed{\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R}} \quad \text{Ecuación de los espejos}$$

Esta ecuación es válida sólo para rayos paraxiales.

267

Si el objeto está muy lejos del espejo $s \rightarrow \infty$, se tiene que $s' \approx R/2$. Entonces, el punto imagen se encuentra localizado a medio camino entre el centro de curvatura y el vértice del espejo.



268

En este caso, el punto imagen se llama punto focal F y la distancia imagen se llama distancia focal $f = \frac{R}{2}$

En términos de la distancia focal, la ecuación de los espejos se puede escribir como

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

269

Espejos Convexos

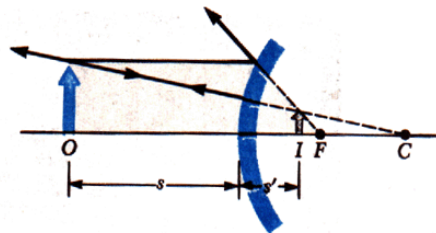
Los espejos convexos, en ocasiones, se les llama espejos divergentes porque los rayos que salen de cualquier punto de un objeto real divergen después de reflejarse como si vinieran de algún punto localizado atrás del espejo.

La imagen que se forma es:

una imagen virtual, la cual es siempre derecha y más pequeña que el objeto.

La ecuación para los espejos convexos es la

misma que para espejos cóncavos. Sin embargo, hay que tener cuidado con los signos!



270

TABLA 36.1 Convención de signos para los espejos

s es + si el objeto se localiza frente al espejo (objeto real).
 s es - si el objeto se localiza atrás del espejo (objeto virtual).
 s' es + si la imagen se localiza frente al espejo (imagen real).
 s' es - si la imagen se localiza atrás del espejo (imagen virtual).

Tanto f como R son + si el centro de curvatura se localizan frente al espejo (espejos cóncavos)

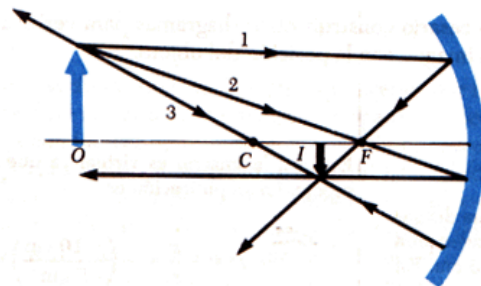
Tanto f como R son - si el centro de curvatura se localiza atrás del espejo (espejos convexos).

Si M es positiva, la imagen es derecha.
 Si M es negativa, la imagen está invertida.

271

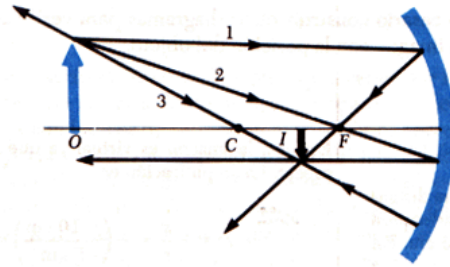
DIAGRAMA DE RAYOS PARA LOS ESPEJOS

1. El primer rayo se traza paralelo al eje óptico, partiendo de la cabeza del objeto y se refleja pasando por el punto focal F .



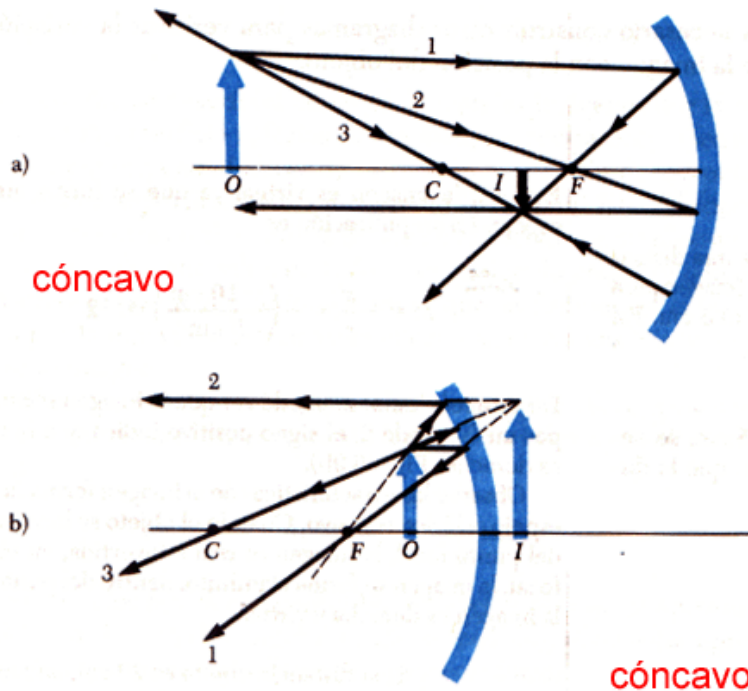
272

2. El segundo rayo se traza desde la cabeza del objeto al vértice del espejo y se refleja con el ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia.

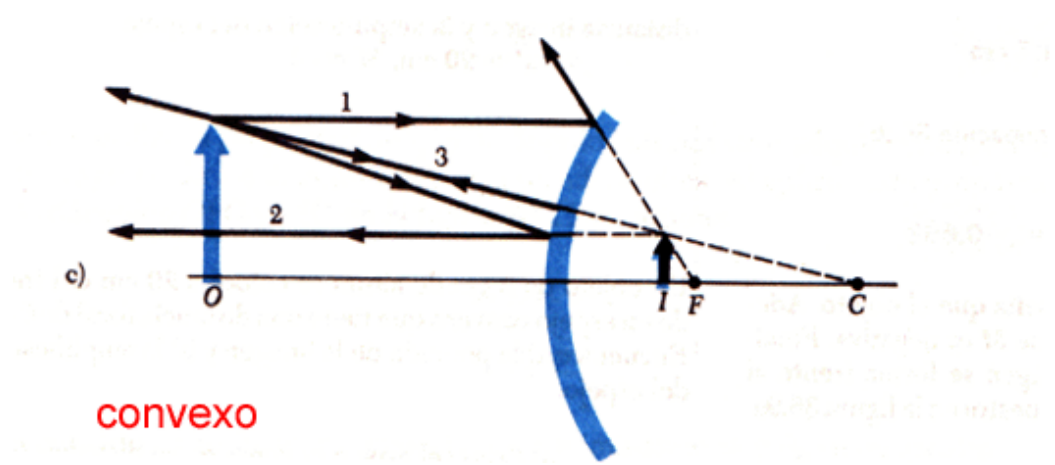


3. El último rayo se traza desde la cabeza del objeto pasando por el centro de curvatura y reflejándose sobre sí mismo.

273



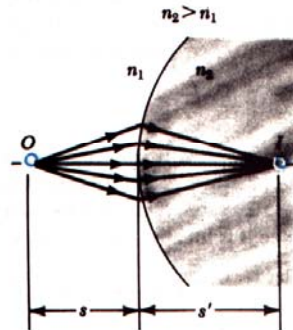
274



IMÁGENES QUE SE FORMAN POR REFRACCIÓN

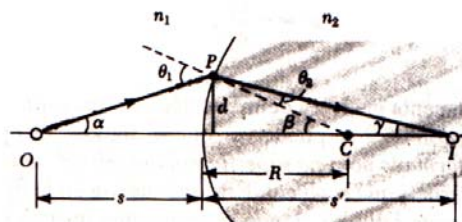
Consideremos dos medios transparentes con índices de refracción n_1 y n_2 , separados por una superficie esférica de radio R .

Supongamos que el objeto O esté en el medio de índice de refracción n_1 y que, además, los rayos paraxiales que salen de O forman un ángulo pequeño con el eje óptico y entre ellos.



Los rayos que salen de O se refractan en la superficie esférica y convergen en un sólo punto I , que es el punto imagen.

276



Para el rayo mostrado en la figura se tiene, usando la ley de Snell

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

Como los ángulos son pequeños $\sin \theta \approx \theta$, entonces

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

Para los triángulos OPC y PIC se tiene

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

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

277

Por lo tanto,

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

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

En la aproximación de ángulos pequeños $\tan \theta \approx \theta$,
 entonces

$$\alpha = \frac{d}{s} \quad \beta = \frac{d}{R} \quad \gamma = \frac{d}{s'}$$

Reemplazando

$$n_1 \frac{d}{s} + n_2 \frac{d}{s'} = (n_2 - n_1) \frac{d}{R}$$

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{(n_2 - n_1)}{R} \quad (*)$$

278

Para una distancia s fija, la distancia a la imagen s' es independiente del ángulo que los rayos forman con el eje. Por lo tanto, todos los rayos paraxiales se intersectan en el mismo punto I .

TABLA 36.2 Convención de signos para superficies refractoras

s es + si el objeto se encuentra frente a la superficie (objeto real).
 s es - si el objeto se encuentra atrás de la superficie (objeto virtual).

s' es + si la imagen se encuentra atrás de la superficie (imagen real).
 s' es - si la imagen se encuentra frente a la superficie (imagen virtual).

R es + si el centro de curvatura se encuentra atrás de la superficie.
 R es - si el centro de curvatura se encuentra frente a la superficie.

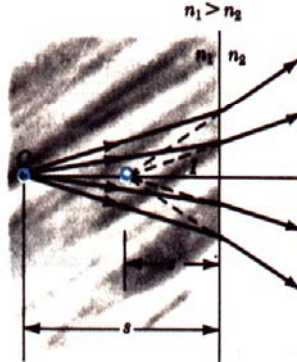
279

la convención de signos es similar a la de los espejos pero hay que notar que la imágenes reales se forman en el lado de la superficie opuesto al lado de donde proviene la luz

Si la superficie refractora es plana $R \rightarrow \infty$, entonces se tiene que

$$\frac{n_1}{s} = -\frac{n_2}{s'}$$

$$\Rightarrow s' = -\frac{n_2}{n_1} s$$

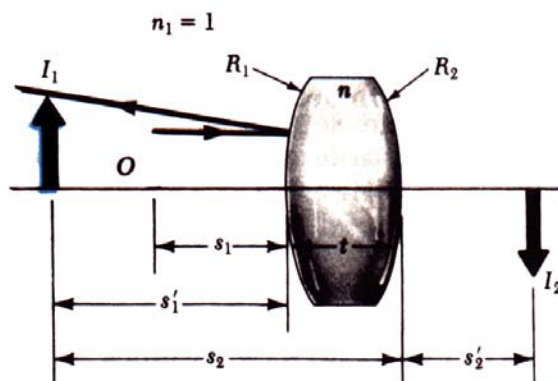


El signo - indica que la imagen se forma en el mismo lado de la superficie que el objeto.

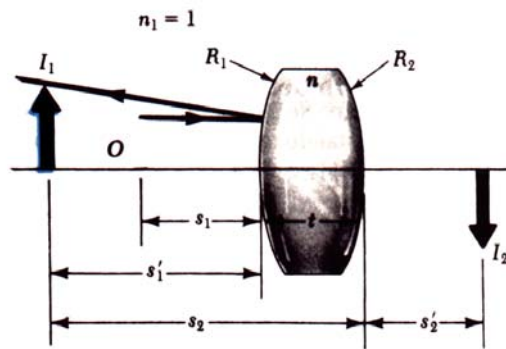
280

LENTES DELGADAS

El principio básico para localizar la imagen final de una lente es usar la imagen formada por una de las superficies refractoras como el objeto de la segunda superficie.



281



En este ejemplo, la distancia al objeto s_1 se ha elegido de manera tal que produzca una imagen virtual I_1 , localizada a la izquierda de la lente. Esta imagen es el objeto de la segunda superficie, dando una imagen real I_2 .

Usando la ecuación (1) se tiene

$$\frac{1}{s_1} + \frac{n}{s_1'} = \frac{n-1}{R_1} \quad (1)$$

282

Para la segunda superficie

$$\frac{n}{s_2} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1-n}{R_2} \quad (2)$$

Pero $s_2 = -s_1' + t$, donde t es el espesor del lente.

(Recuerde que s_1' es un número negativo y s_2 debe ser positivo)

En la aproximación de lente delgada $t \approx 0$, entonces

$$s_2 = -s_1'$$

$$(2) \Rightarrow -\frac{n}{s_1'} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1-n}{R_2}$$

283

pero de (1)

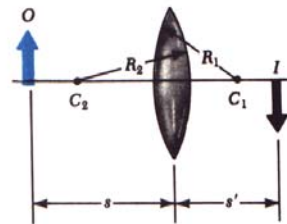
$$\frac{n}{s'_1} = \frac{n-1}{R_1} - \frac{1}{s_1}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{s_1} - \frac{(n-1)}{R_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1-n}{R_2}$$

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_2} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

Definiendo los subíndices se obtiene la ec. para lentes delgadas

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$



284

Esta ecuación sólo es válida para rayos paraxiales y cuando el espesor de la lente es pequeño comparado con los radios de curvatura R_1 y R_2 .

Definiendo la distancia focal de la lente f como la distancia imagen que corresponde a un objeto colocado en infinito se tiene

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

Por lo tanto, la ec. para lentes delgadas o ecuación del fabricante de lentes queda

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \text{con} \quad \frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$

285

TABLA 36.3 Convención de signos para lentes delgadas

s es + si el objeto se encuentra frente a la lente.
 s es - si el objeto se encuentra atrás de la lente.

s' es + si la imagen se encuentra atrás de la lente.
 s' es - si la imagen se encuentra frente a la lente.

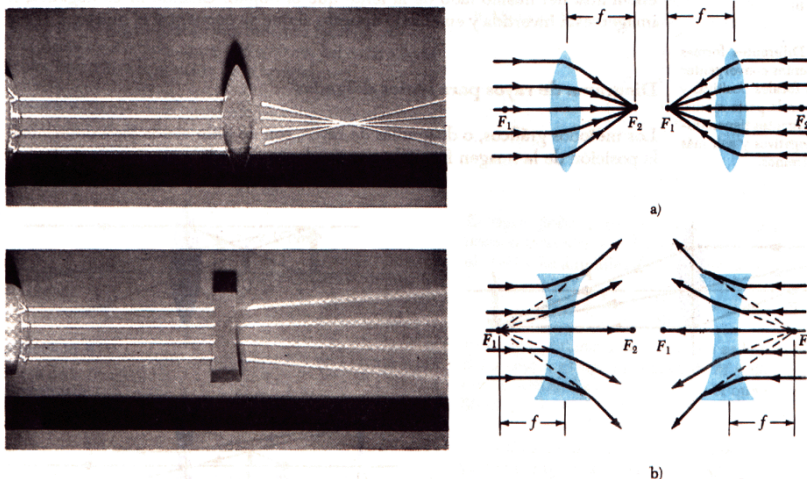
R_1 y R_2 son + si el centro de curvatura se encuentra atrás de la lente.
 R_1 y R_2 son - si el centro de curvatura se encuentra frente a la lente.

Para las lentes convergentes, cuando $s > f$ las cantidades s, s' y R_1 son positivas y R_2 es negativo. Entonces un objeto real forma una imagen real.

Para una lente divergente, s y R_2 son positivos y s' y R_1 son negativos. Por lo tanto f es negativo para las lentes divergentes.

286

Una lente delgada tiene dos puntos focales que corresponden a rayos de luz paralelos que viajan de izquierda a derecha.



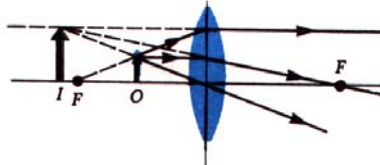
287

Diagrama de rayos para lentes delgadas

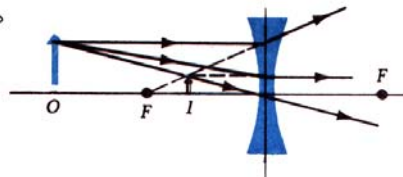
1. El primer rayo se traza paralelo al eje óptico. Después de refractarse, el rayo pasa a través (o aparenta venir) de uno de los puntos focales



2. El segundo rayo se traza pasando por el centro de la lente. Este rayo continúa en línea recta.



3. El tercer rayo se traza pasando por el punto focal F y sale de la lente paralelo al eje óptico.



COMBINACIÓN DE LENTES DELGADAS

Si dos lentes delgadas son utilizadas para formar una imagen, el sistema se puede tratar de la siguiente forma:

1. La imagen de la primera lente se calcula como si no existiera la segunda lente.
2. Para la segunda lente, la luz incide como si viniera de la imagen formada por la primera lente. La imagen de la segunda lente es la imagen final del sistema.

Por ejemplo, para dos lentes delgadas en contacto, con distancias focales f_1 y f_2 se tiene:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1}$$

289

donde s es la distancia del objeto al sistema de lentes y s'_1 es la distancia de la imagen formada por la primera lente. Esta imagen es el objeto para la segunda lente, entonces

$$-\frac{1}{s'_1} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f_2}$$

donde s' es la distancia de la imagen final al sistema de lentes.

Por lo tanto

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

donde f es la distancia focal del sistema formado por dos lentes delgadas en contacto.

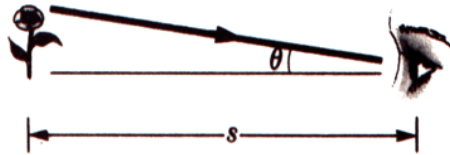
290

INSTRUMENTOS ÓPTICOS

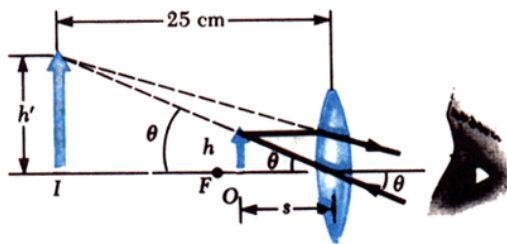
LUPA

La lupa es uno de los instrumentos ópticos más simples ya que está constituida por una lente convergente.

Un ojo normal promedio es incapaz de enfocar un objeto que se encuentre más cerca que los 25 cm del punto cercano.



291



Para incrementar el tamaño angular aparente de un objeto, se puede colocar una lente convergente frente al ojo con el objeto colocado entre la distancia focal y la lente.

292

La lente formará una imagen más grande, virtual y derecha.

Se define la amplificación angular m por:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0}$$

donde θ es el ángulo subtendido por el objeto con ayuda de la lente y θ_0 es el ángulo subtendido por el objeto cuando se encuentra en el punto cercano en ausencia de la lente.

Si $s' = -25$ cm se tiene

$$\frac{1}{s} - \frac{1}{25} = \frac{1}{f}$$

$$s = \frac{25f}{25 + f}$$

con f en cm

293

utilizando la aproximación de ángulos pequeños

$$\theta_0 = \frac{h}{25} \quad \theta = \frac{h}{s}$$

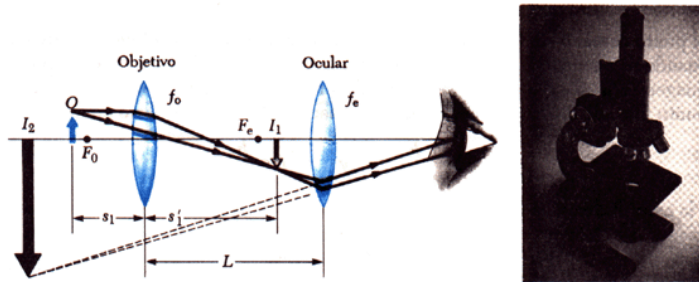
entonces

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{25}{s} \Rightarrow m = 1 + \frac{25}{f}$$

Con una sola lente, es posible obtener una amplificación angular ~ 4 sin aberraciones serias.

294

MICROSCOPIO COMPUESTO



Un microscopio consta, esencialmente, de un lente objetivo con $f_o < 1 \text{ cm}$ y un lente ocular con $f_e \sim \text{centímetros}$. Las lentes están separadas una distancia L mayor que f_o y f_e .

295

El objeto se coloca fuera de la distancia focal del objetivo y forma una imagen real e invertida en o cerca del punto focal del ocular. Este ocular produce una imagen virtual e invertida.

La amplificación lateral del objetivo es

$$M_1 = -\frac{s_1'}{s_1} \approx -\frac{L}{f_o}$$

La amplificación angular del ocular para un objeto localizado en el punto focal es

$$m_e = \frac{25}{f_e} \quad \text{con } f_e \text{ en cm.}$$

296

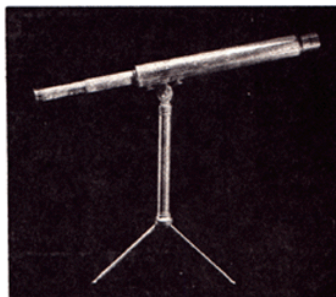
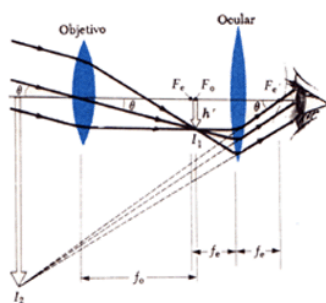
La amplificación total del microscopio se define como

$$M = M_o m_e = - \frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right)$$

El signo - indica que la imagen está invertida.

297

TELESCOPIO



Un telescopio refractor está formado por dos lentes tales que el objetivo forma una imagen real e invertida de un objeto distante cerca del punto focal del ocular.

298

La amplificación angular de un telescopio refractor está dada por

$$m = \frac{\theta}{\theta_0}$$

$$\text{con } \theta \approx -\frac{h'}{f_e} \quad \text{y} \quad \theta_0 \approx \frac{h'}{f_o}.$$

Por lo tanto

$$m = -\frac{f_o}{f_e}$$

↑
indica que la imagen está
invertida