

BLOQUE IV-ÓPTICA

1.- Modelo corpuscular; caracterización y experiencias en apoyo del modelo.

En el año 300 a.C. Euclides describe la reflexión entendiendo que el ojo recibía diminutas partículas de los objetos, pero esto no explicaba por qué no se ven los objetos en la oscuridad.

A finales del siglo XVII Newton enuncia su teoría sobre la luz:

- Los cuerpos luminosos emiten partículas luminosas que producen la visión al llegar a nuestros ojos procedentes de la fuente luminosa.
- La trayectoria seguida por los corpúsculos es rectilínea.
- Los corpúsculos son de distintos tamaño según el color.
- Cuando se interpone un obstáculo, los corpúsculos no pueden atravesarlo y así se produce la sombra.
- La reflexión se debe al rebote de los corpúsculos sobre la superficie reflectora.

Con esta teoría se puede explicar la propagación rectilínea, la ley de la reflexión y la ley de la refracción. En la refracción supone que las partículas al pasar de un medio menos denso a uno más denso son atraídas por éste, con lo cual llega a la conclusión errónea de que la velocidad de la luz debería ser mayor en el medio más denso. Esto no se comprobó en su época.

No explicaba la pérdida de masa que deberían sufrir los cuerpos, tampoco por qué unas partículas se reflejaban y otras se refractaban. Tampoco explicaba por qué no chocaban las partículas al encontrarse dos rayos luminosos.

Todavía no se habían visto patrones de interferencia ni de difracción de la luz.

2.- Modelo ondulatorio; caracterización y experiencias en apoyo del modelo.

El modelo ondulatorio es introducido por Huygens en la misma época, a finales del siglo XVII. Piensa que la luz es un fenómeno ondulatorio como el sonido, que se propaga en un medio muy particular, el éter. Considera:

- Huygens supuso que todo objeto luminoso produce perturbaciones en el éter que se propagan a través en todas las direcciones del espacio en forma de ondas esféricas.
- Cuando un punto del éter es afectado por una onda se convierte, al vibrar, en nueva fuente de ondas.
- La masa de los cuerpos que emiten luz no cambia.
- Las ondas de luz son longitudinales.

Considera Huygens que como toda onda, la luz se caracteriza por una amplitud, una longitud de onda, una frecuencia y una velocidad de propagación. Un foco luminoso crea un frente de ondas que progresa debido a que todo punto origina ondas elementales secundarias, de forma que al cabo de cierto tiempo, se convierte en la envolvente de dichas ondas secundarias. Esto constituye la definición del frente de ondas.

Con esta teoría se podía explicar la propagación rectilínea tridimensional a partir de un foco puntual, la ley de la reflexión y la ley de la refracción.

No explicaba la propagación de la luz en el vacío.

Sin embargo a principios del siglo XIX, se descubren la difracción, la polarización y la interferencia, fenómenos que no puede explicar el modelo corpuscular. Posteriormente se descubre que la velocidad de propagación en el agua es menor que en el aire, lo cual no concordaba con la teoría corpuscular. A mediados de siglo era la teoría predominante.

3.- La luz como onda electromagnética. Estudio del espectro electromagnético.

En 1800 Thomas Young demuestra que es una onda, pues presenta figuras de interferencias. Veíamos en el capítulo anterior que la ecuación de onda en una dimensión es:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$
, cuya solución es $\psi = A \text{sen}(kx - \omega t)$. A grandes distancia la onda se suele tomar como plana, esto es, $\psi = A e^{i(kx - \omega t)} = A(\cos(kx - \omega t) + i \text{sen}(kx - \omega t))$

El análisis de Fourier determina que cualquier función periódica, $f(x)=f(x-\lambda)$, con $k=2\pi/\lambda$, se puede poner como combinación lineal de funciones armónicas.

En 1865 Maxwell postula sus cuatro famosas ecuaciones, unificando la electricidad, la óptica y el magnetismo, y llegando a la conclusión de que la luz es una onda electromagnética:

$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon}$, las fuentes del campo eléctrico son las cargas.

$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$, no existen monopolos magnéticos.

$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt}$, las variaciones del flujo magnético producen campos eléctricos.

$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu I + \mu\epsilon \frac{d\phi_E}{dt}$, las corrientes y las variaciones del campo eléctrico producen campos magnéticos.

En el vacío, se llega a ecuaciones de onda para los campos eléctricos y magnéticos:

$\nabla^2 \vec{B} = \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial z^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$ y $\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$. Es decir, que los campos son ondas armónicas, $E=E_0 \text{sen}(\omega t - kx)$ y $B=B_0 \text{sen}(\omega t - kx)$ y además $|\vec{E}| = c|\vec{B}|$.

Si comparamos estas ecuaciones con la de onda,

vemos que $\frac{1}{v^2} = \mu_0 \epsilon_0$,

teniendo en cuenta que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ y que $\epsilon_0 = 8.9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$, resulta que $v=c$.

Posteriormente se vió que cualquier carga acelerada producía una perturbación electromagnética, en la cual, como vemos en la figura superior, lo que varía son los campos eléctricos y magnéticos.

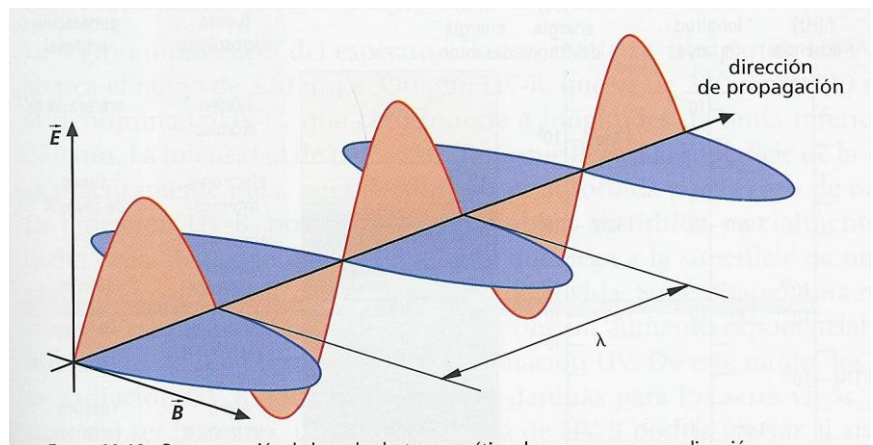
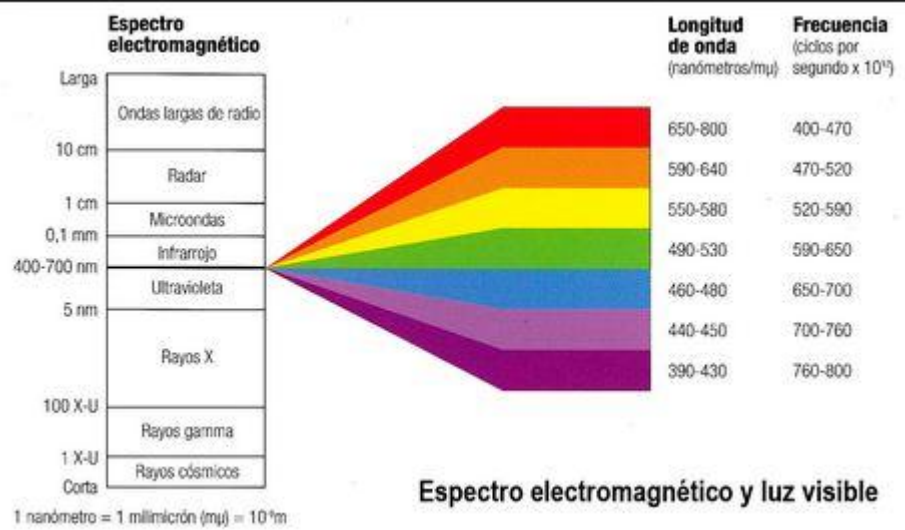


Figura 10-10. Representación de la onda electromagnética al propagarse en una dirección.

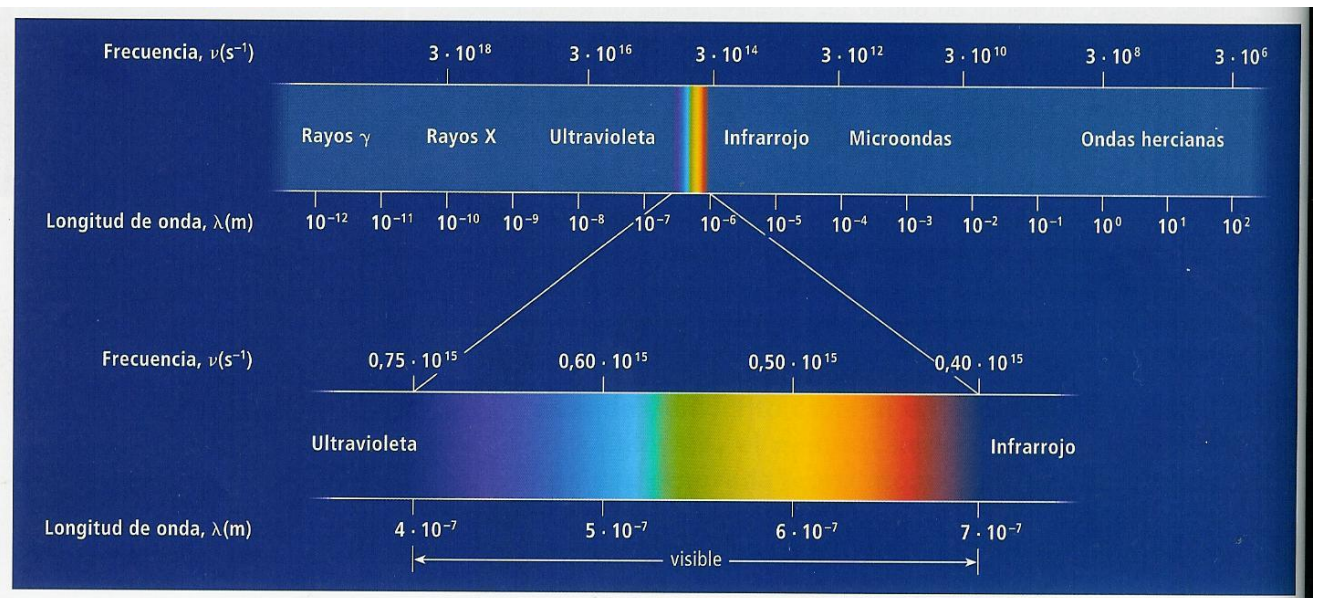
Es decir, después de tanta polémica se unifica la electricidad, el magnetismo y la óptica, pues esto prueba que la luz es una onda transversal, electromagnética, que se propaga en el vacío a $c=3 \cdot 10^8$ m/s.

Hoy se acepta la naturaleza dual de la misma, la luz se propaga como onda e interacciona con la materia como partícula.

El espectro visible es:



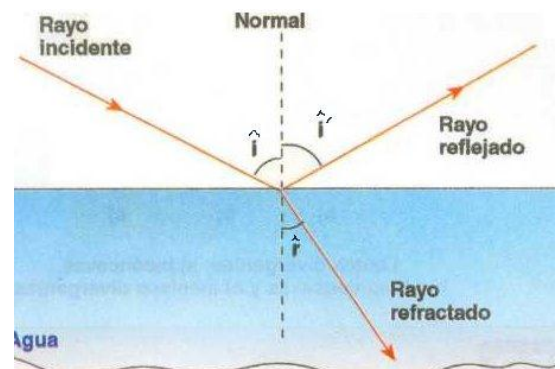
Es decir, el visible, propiamente dicho, sólo es una pequeña región del espectro, desde los 380 hasta los 780 nm, desde el ultravioleta, hasta el infrarrojo, como se muestra en la imagen:



4.- Fenómenos ondulatorios de la luz.

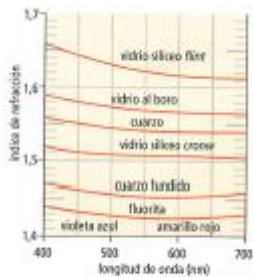
En la óptica geométrica es típico el concepto de rayo, indicando la dirección de propagación de la luz, son siempre perpendiculares a los frentes de onda y se propagan de forma rectilínea si el medio es isótropo. Con respecto a la luz, un medio puede ser transparente, translúcido y opaco.

En la reflexión se cumple que el rayo incidente, la normal y el reflejado están en el mismo plano, además de que el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales, $\hat{i} = \hat{r}$. En la refracción, cuando la luz pasa de un medio a otro distinto, se desvía, el ángulo es menor que el de incidencia, se cumple que: $n_1 \text{sen} \hat{i} = n_2 \text{sen} \hat{r}$, donde n es el índice de refracción, $n=c/v$, c es la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la misma en el medio, por ello siempre es mayor que 1. Observando la geometría

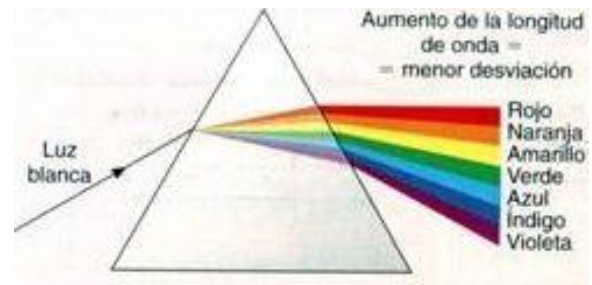


de la figura, llegamos a que: $\frac{\text{sen}\hat{i}}{\text{sen}\hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda}{\lambda'}$.

El índice de refracción aumenta ligeramente con la frecuencia, por ello se produce la dispersión de la luz en un prisma, porque cada radiación simple propaga con distinta velocidad: se



Figuras 10.37. Variación del índice de refracción con la longitud de onda para ciertos materiales.

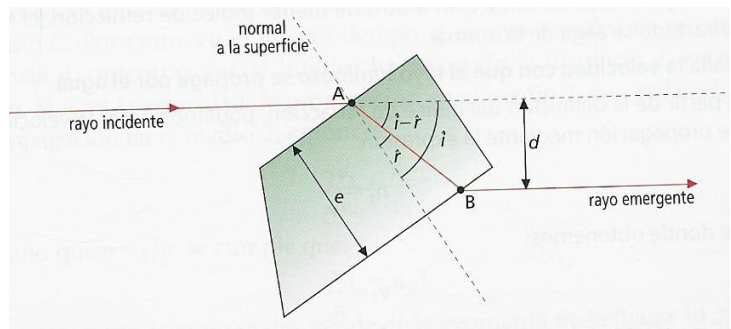


Veamos algunos fenómenos asociados a la refracción:

■ Lámina plano paralela.

Un rayo entra y se desvía una distancia $d = AB \text{ sen}(i-r)$, con lo cual queda:

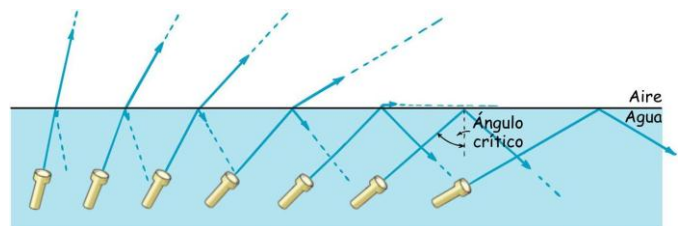
$$d = e \frac{\text{sen}(\hat{i} - \hat{r})}{\text{cos}\hat{r}}$$



■ Reflexión total.

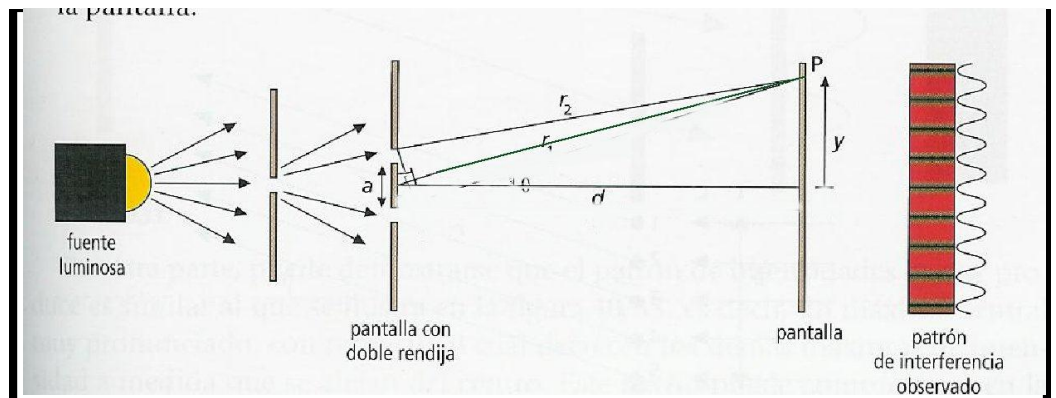
Si incidimos sobre la superficie de separación de un medio con otro con cierto ángulo, llamado ángulo crítico, no existe refracción, sino una reflexión, $\text{sen}\hat{r}_c = \frac{n_1}{n_2}$. Esta ley se usa

para construir guías de ondas.



■ Interferencia.

Para que se observe un patrón de interferencia, es decir, franjas oscuras e iluminadas de forma alterna, la luz de dos focos ha de ser coherente (misma frecuencia y desfase nulo).



Young hizo pasar un foco de luz real por dos rendijas pequeñas, en comparación con la longitud de onda y consiguió dicho patrón. Si en el punto P hay un máximo, $r_1 - r_2 = n\lambda$, como

$r_1^2 = \left(y + \frac{a}{2}\right)^2 + d^2$ y $r_2^2 = \left(y - \frac{a}{2}\right)^2 + d^2$, la diferencia de ambos es $2ya$. Como la distancia es muy

grande, $r_1 + r_2 = 2d$, con lo cual $r_1 - r_2 = n\lambda = 2ya/2d$, $a \frac{y}{d} = n\lambda$, con lo cual la distancia entre máximos

será: $y = \frac{d}{a} n\lambda$ y la distancia entre máximos consecutivos: $d\lambda/a$.

■ Difracción.

Una difracción suele considerarse una interferencia de numerosas fuentes, por ello se observa también un patrón de interferencia. Ocurre cuando el tamaño de la abertura es de la misma magnitud que la longitud de onda. En el centro de la abertura y perpendicular a la misma, a una distancia d existirá luz, en el centro de la pantalla. Si consideramos que a una altura y , existe un mínimo, respecto del centro de la pantalla, se cumple que las posiciones de los mínimos serán:

$$y = \frac{d}{a} n \lambda.$$

■ Polarización.

Como en una onda electromagnética los vectores E y B oscilan perpendicularmente, si conseguimos que oscilen en el mismo plano, la luz estará linealmente polarizada. Usualmente se usan filtros polaroid de alcohol polivinílico con largas moléculas tintadas de yodo. Cuando el campo eléctrico tiene esa dirección la luz es absorbida, dejando pasar la perpendicular. Para dos láminas se cumple que $I = I_0 \cos^2 \theta$, donde θ es el ángulo que forman los ejes de transmisión de ambas láminas.

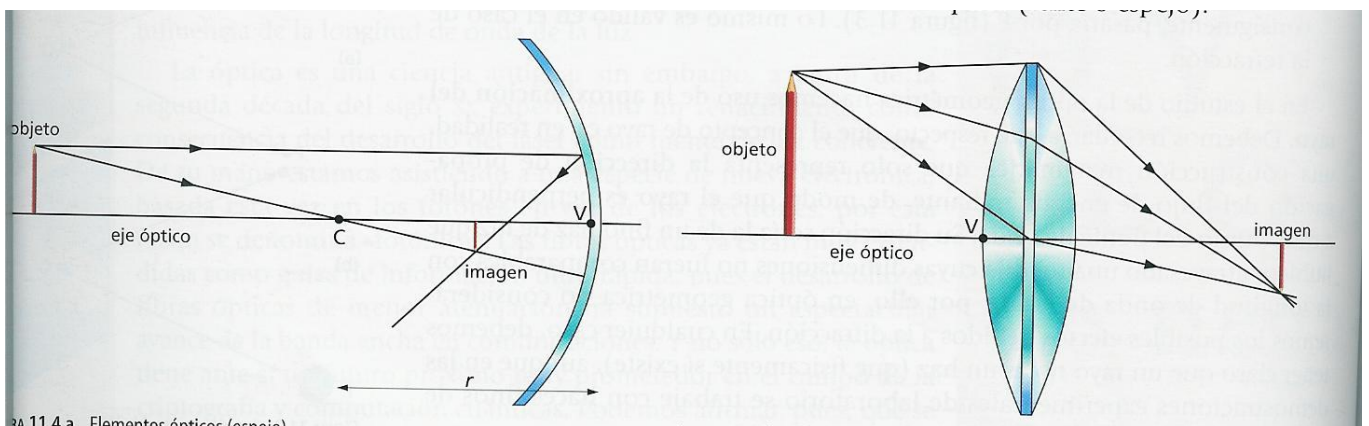
5.- Introducción a la óptica geométrica.

Las leyes de la óptica geométrica son compartidos por el modelo ondulatorio y el corpuscular. Se establecen en base a la ley de propagación rectilínea de la luz, la independencia de unos rayos luminosos respecto de otros, la ley de reflexión, la ley de refracción y la ley de reciprocidad, que establece que los caminos ópticos de pueden recorrer en ambos sentidos.

Se puede trabajar por reflexión (espejos planos y esféricos) o por refracción (lentes delgadas, usando la aproximación paraxial).

Los términos más usuales serán:

- **Objeto.**- punto del que parte la luz.
- **Imagen.**- figura procedente del objeto, que será real si se puede registrar o virtual si no se puede, será la prolongación de los rayos, no el propio rayo.
- **Centro de curvatura.**- centro de la circunferencia del sistema esférico.
- **Vértice.**- punto de corte de la circunferencia con el eje óptico, horizontal.



6.- Óptica de reflexión.

■ Espejos planos.

La imagen formada en un espejo plano es virtual, del mismo tamaño que el objeto y posee inversión lateral (izquierda-derecha, si levantas la mano derecha sale en posición izquierda). Es posible usar sistemas de espejos para corregir la inversión lateral.

■ Espejos esféricos.

Los sistemas esféricos presentan aberración esférica, no todos los rayos reflejados convergen en el mismo punto, por ello se usan sólo los rayos próximos al eje óptico, en ello se basa la aproximación paraxial. Se usa la ecuación de los espejos: $\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f}$. Donde, s_0 es la

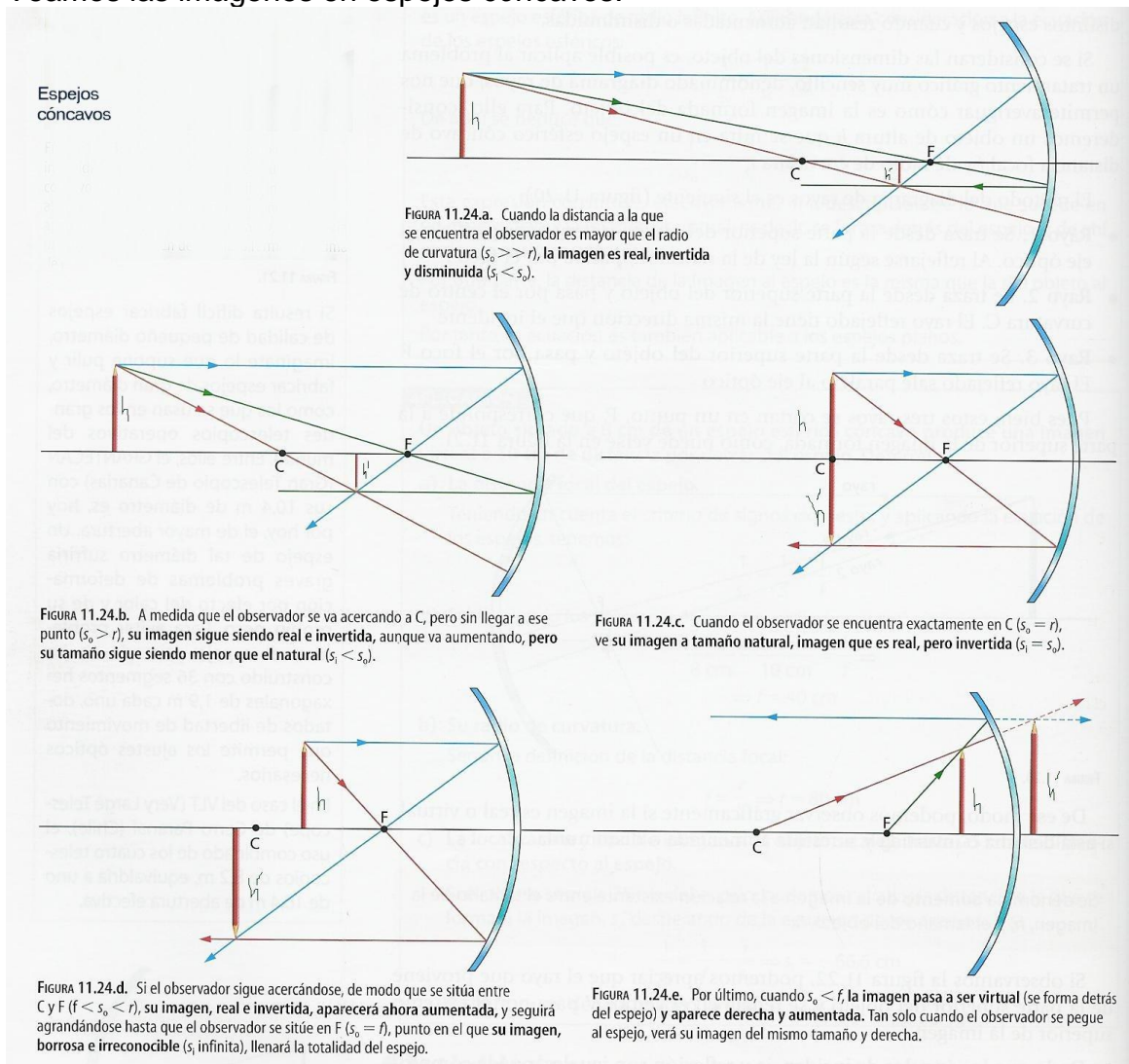
distancia del objeto al vértice, s_i es la distancia de la imagen al vértice, r es el radio de curvatura y f la distancia focal. Si el objeto está muy lejos la imagen se forma en el foco, F , a una distancia $r/2$. El signo positivo se usa para magnitudes que están delante del espejo (reales) y el negativo cuando están detrás (virtuales).

Calcularemos el aumento de estos sistemas como: $\text{aumento} = \frac{h'}{h} = -\frac{s_i}{s_0}$.

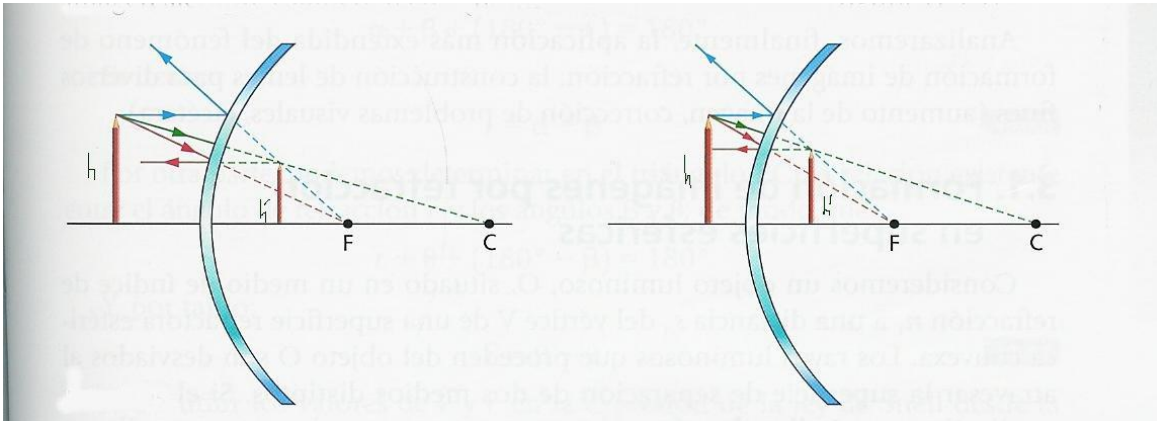
En estos sistemas los rayos que entran paralelos salen por el foco, los rayos que entran por el centro de curvatura vuelven por el mismo camino y los rayos que entran por el foco salen paralelos al eje óptico.

La deducción de estas ecuaciones se hace usando tangentes de ángulos y teniendo en cuenta que el ángulo objeto-vértice e imagen-vértice, coincide, puesto que desde el centro de curvatura a un punto del espejo sólo está definido el radio. Además la curvatura será la altura del triángulo.

Veamos las imágenes en espejos cóncavos:



Mientras en los convexos es así:



Vemos que la imagen de un espejo convexo siempre es virtual.

7.- Lentes delgadas. Óptica de refracción.

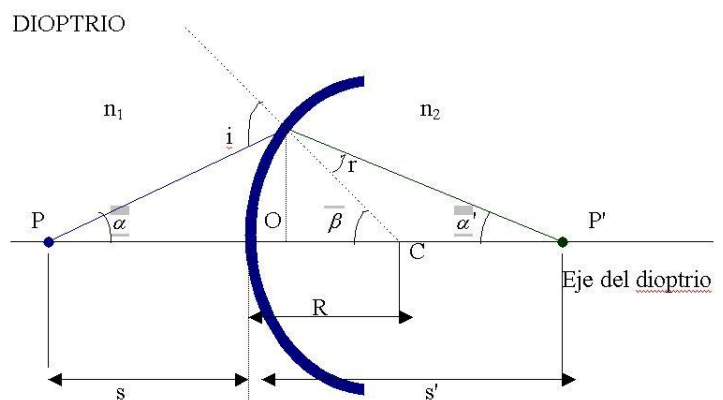
Dado un dioptrio esférico, como el de la figura:

Trabajando con los ángulos y la geometría del mismo se llega a la ecuación del dióptrio:

$$\frac{n_1}{s_0} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{r}, \text{ en la imagen}$$

pueden verse las distancias. Seguimos trabajando en aproximación paraxial.

El criterio de signos que usaremos será: s_0 es positivo a la izquierda de la lente, el lado de incidencia, s_i es positivo en el lado de transmisión y r es positivo en el lado de transmisión, también.



En este caso el aumento es: $\text{aumento} = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 s_i}{n_2 s_0}$, las distancias focales: $\frac{f_0}{f_i} = \frac{n_1}{n_2}$.

La ecuación del dioptrio se puede aplicar también a superficies planas como el agua, haciendo tender r a infinito, con lo cual queda: $\frac{n_1}{s_0} + \frac{n_2}{s_i} = 0$, por ello despejando si tendremos la distancia a la

cual se forma la imagen, $s_i = -\frac{n_2}{n_1} s_0$.

Entenderemos por lentes delgadas a aquellos sistemas ópticos formados por dos o más superficies refractoras, donde al menos una está curvada. Pueden ser biconvexas, bicóncavas, plano-convexa, plano-cóncava, menisco-convexa y menisco-cóncava. La ecuación de las lentes

delgadas es: $\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$, llamada ecuación del fabricante de lentes.

En las lentes la distancia focal objeto y la distancia focal imagen valen lo mismo, $s_0 = f_0, s_i = f_i$. Con ello llegamos a la ecuación de las lentes en función de la distancia focal:

$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$, con lo cual: $\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$, obtenemos la formula gaussiana para lentes

delgadas. Si la lente se encuentra en otro medio que no sea aire, tendremos que:

$$\frac{1}{f} = (n_r - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \text{ donde } n_r = n/n', \text{ es decir dividimos el de la lente entre el del medio.}$$

Veamos cómo se forman las imágenes en lentes delgadas, aplicaremos la fórmula gaussiana, de forma que: los rayos que entran paralelos pasan por la distancia focal del otro lado, los rayos que pasan por el centro de la lente no se desvían y los rayos que pasan por el foco de la izquierda salen paralelos por la derecha, suponiendo incidencia por la izquierda. El aumento es como en el

caso anterior: $a = \text{aumento} = \frac{h'}{h} = -\frac{s_i}{s_o}$.

Veamos varios tipos:

■ Lentes biconvexas.

- Si el objeto está entre el infinito y $2f$, la imagen se formará también entre f y $2f$.

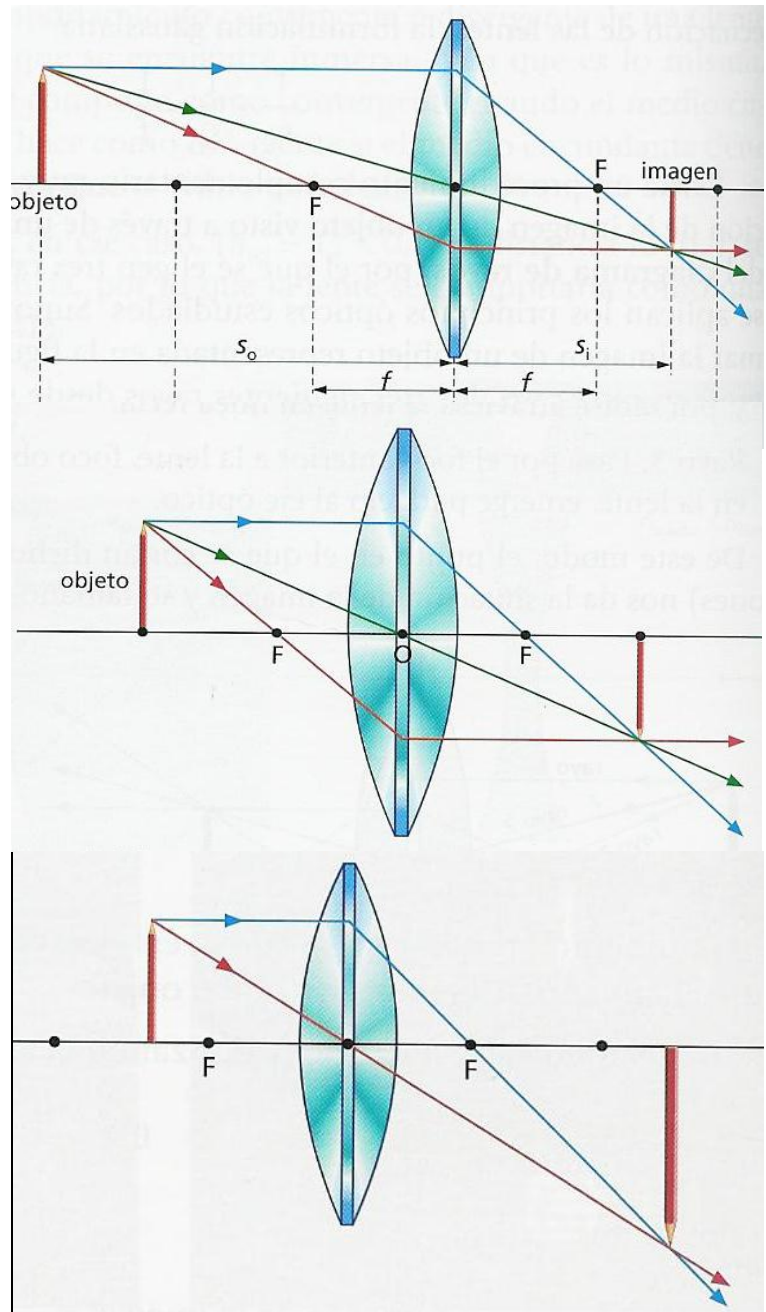
La imagen formada es real, invertida y disminuida.

- Si el objeto está a $2f$, la imagen se formará también a $2f$.

La imagen formada es real, invertida y de tamaño natural.

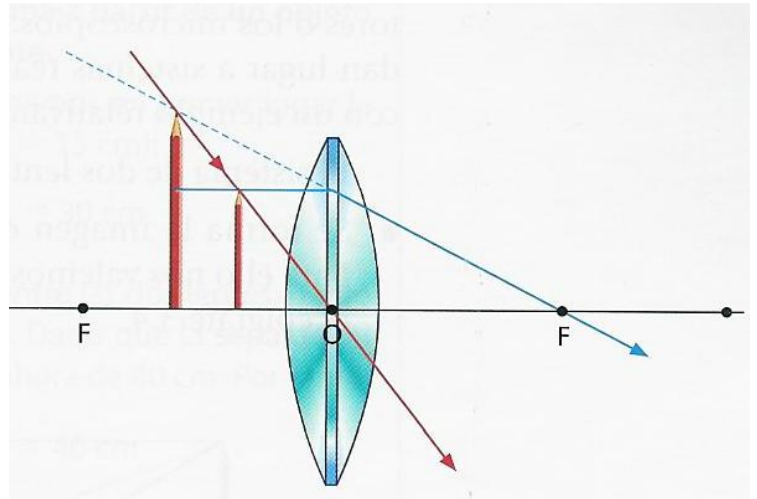
- Si el objeto está entre f y $2f$, la imagen se formará entre el infinito y $2f$.

La imagen formada es real, invertida y aumentada.



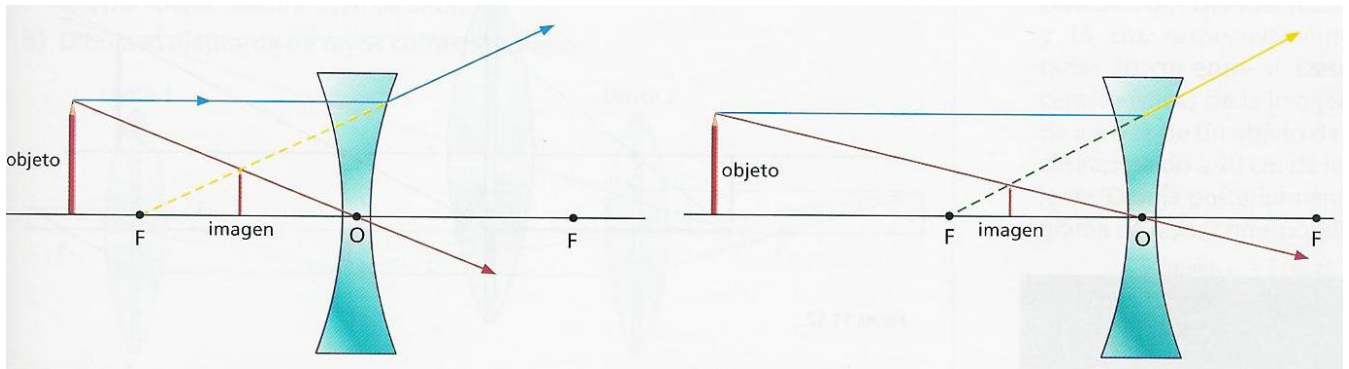
- Si el objeto está a una distancia menor que f , la lente se convierte en lupa.

La imagen formada es virtual, derecha y aumentada.



■ Lentes bicóncavas.

Siempre tendremos que la distancia imagen es negativa, puesto que el primer radio es negativo y el segundo positivo, $\frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s_o} < 0$. Veamos:



La imagen será virtual, derecha y disminuida.

■ Sistema de dos lentes delgadas.

La imagen formada por la primera lente será el objeto para la segunda. La imagen total es la imagen del sistema. El aumento total será el producto de los aumentos. Si las dos lentes están en

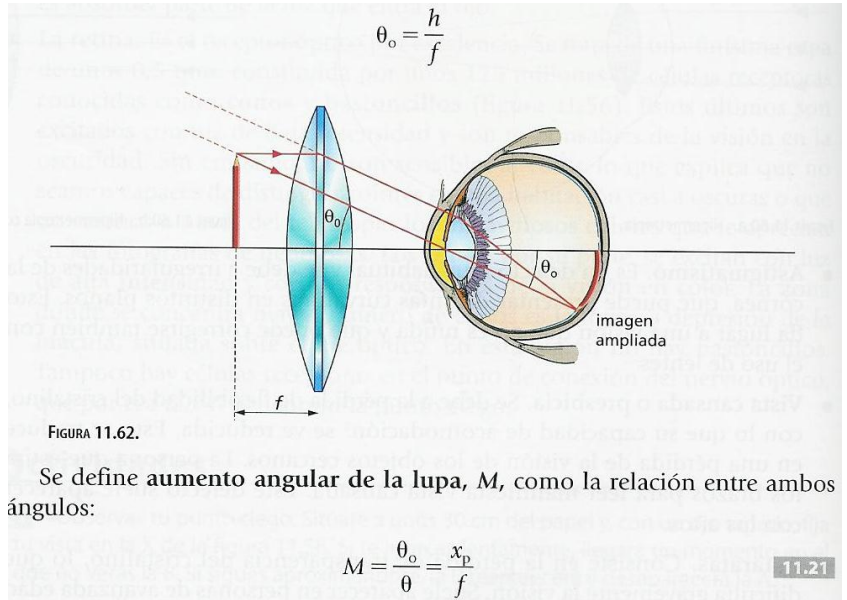
contacto, la distancia focal será: $\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$. Si la imagen de la primera lente queda entre las

dos será un objeto real para la segunda, si quedara a la izquierda de la segunda lente, será considerado un objeto virtual.

8.- Diversos instrumentos ópticos.

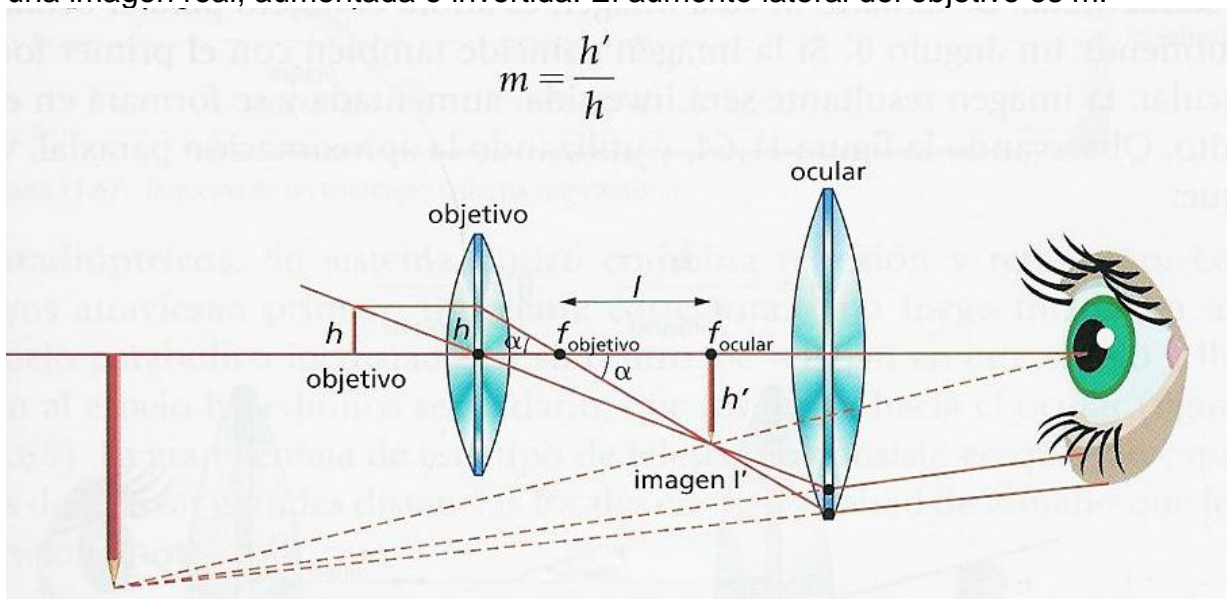
■ Lupa.

La imagen formada por la primera lente será el objeto para la segunda. La imagen total es la imagen del Si se sitúa una lente biconvexa pegada al ojo y el objeto a la distancia focal, la imagen se formará en el infinito y será derecha, virtual y aumentada. En la retina el tamaño de la imagen será proporcional al ángulo θ_0 , cuyo valor es h/f , como podemos ver en la figura:



■ Microscopio compuesto.

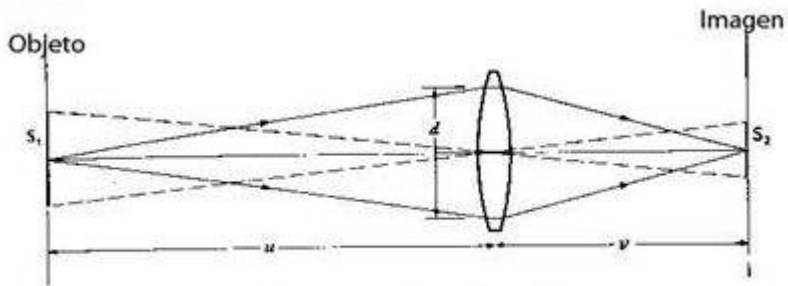
Sirve para ver cosas muy pequeñas, como sabemos. Está compuesto por dos lentes convergentes, la más próxima al objeto se llama objetivo y la más próxima al ojo ocular. Se forma una imagen real, aumentada e invertida. El aumento lateral del objetivo es m .



El aumento total será ahora: $m = -\frac{1}{f_{\text{objetivo}}} \left(\frac{x_p}{f_{\text{ocular}}} \right)$.

■ Cámara fotográfica.

Es una cámara oscura con una lente convergente en su interior y una placa fotográfica sensible en su interior. La luz de un objeto situado en el infinito forma una imagen nítida, real e invertida en la placa, que es la película situada en el plano focal de la lente.



Paso de la Luz a través de un lente