

FÍSICA 2º BACHILLERATO

TEMA 4: ÓPTICA GEOMÉTRICA

1. Introducción.
2. Naturaleza de la luz.
 - 2.1. Teorías ondulatoria y corpuscular.
 - 2.2. Descripción actual de la naturaleza de la luz.
3. Propagación de la luz en medios materiales rectilínea: índice de refracción.
 - 3.1. Propagación rectilínea.
 - 3.2. Velocidad de la luz en el vacío.
 - 3.3. Índice de refracción
4. Reflexión de la luz.
5. Refracción de la luz. Reflexión total. Fibras ópticas.
 - 5.1. Concepto.
 - 5.2. Ángulo límite y reflexión total.
 - 5.3. Fibras ópticas.
6. Conceptos básicos de la Óptica Geométrica. Normas y convenio de signos.
7. Imágenes obtenidas por reflexión: espejos.
 - 7.1. Espejos planos. Relación entre el objeto y la imagen.
 - 7.2. Espejos esféricos.
 - 7.2.1. Elementos ópticos. Convenio de signos y aproximación paraxial.
 - 7.2.2. Ecuación fundamental de los espejos esféricos.
 - 7.2.3. Construcción de imágenes.
 - 7.2.4. Aumento lateral.
8. Imágenes obtenidas por refracción: lentes delgadas.
 - 8.1. Elementos ópticos. Convenio de signos y aproximación paraxial.
 - 8.2. Ecuación fundamental de las lentes delgadas.
 - 8.3. Construcción de imágenes.
 - 8.4. Aumento lateral.
 - 8.5. Potencia.
9. Defectos de la vista: corrección.
 - 9.1. El ojo humano como sistema óptico. Acomodación.
 - 9.2. Miopía.
 - 9.3. Hipermetropía.
 - 9.4. Presbicia.
 - 9.5. Astigmatismo.
10. Otros instrumentos ópticos.
 - 10.1. Aumento angular.
 - 10.2. La lupa.
 - 10.3. La cámara fotográfica.
 - 10.4. El microscopio compuesto.
 - 10.5. El telescopio.
 - 10.6. Aberraciones.

11. Prisma óptico. Dispersión. Espectro visible. Color de los cuerpos.

11.1. El prisma óptico.

11.2. La dispersión.

11.3. El espectro visible.

11.4. El color de los cuerpos.

1. Introducción

En la descripción del movimiento ondulatorio se usa el *rayo* como una manera conveniente de representar el movimiento de un tren de ondas; el rayo, como se ha visto en el tema 3 (Movimiento ondulatorio), es perpendicular a los frentes de onda e indica la dirección de propagación de la onda en cada punto. Un rayo es una construcción geométrica (esto es, un modelo) que es particularmente útil en el estudio del comportamiento óptico de ciertos sistemas, tales como las lentes. Sin embargo, no constituye una entidad física, y no es posible aislarlo.

Cuando un haz de ondas luminosas se encuentra con obstáculos o aberturas de tamaño igual o mayor, pero comparable, a la longitud de onda, se ponen de manifiesto fenómenos de difracción; que implican cambios en la dirección del haz de luz. Si los obstáculos o barreras son suficientemente grandes, la difracción es despreciable y la luz viaja siguiendo trayectorias en línea recta, que podemos representar como rayos.

Esta es la condición de la **Óptica geométrica**, conocida también como la **Óptica de rayos**. Podemos usar con toda seguridad las ecuaciones de la Óptica geométrica cuando un haz de luz se encuentra con obstáculos como espejos, lentes o prismas cuyo tamaño lateral sea mucho mayor que la longitud de onda de la luz.

La Óptica geométrica estudia los fenómenos luminosos que pueden explicarse aplicando el concepto de rayo. Estos fenómenos están relacionados con los cambios de dirección que experimentan los rayos luminosos:

- a) *al atravesar distintos medios materiales.*
- b) *al encontrar medios materiales que no pueden atravesar.*

La Óptica geométrica se basa en los siguientes hechos experimentales:

- En los medios homogéneos e isotrópicos la luz se propaga en línea recta.
- Las líneas rectas que coinciden con la dirección de propagación de la luz son los rayos.
- Los rayos de luz son independientes en su propagación; es decir, el cruce de dos o más rayos no afecta a su trayectoria.
- Se cumplen las leyes de la reflexión y de la refracción.
- Los rayos de luz siguen trayectorias reversibles. Consideremos un rayo que partiendo de un punto F , se reflejara en segundo punto O y llegara a un tercer punto P . La trayectoria sería la misma que la que seguiría otro rayo que partiendo de P se reflejara en el punto O ; es decir, este segundo rayo pasaría necesariamente por el punto F .

2. Naturaleza de la luz

En el mundo clásico se conocían algunas propiedades relacionadas con la velocidad de la luz, pero fue a partir del siglo XVII cuando aparecieron las primeras ideas científicas sobre su naturaleza.

La introducción de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz estableció una controversia en la comunidad científica que duró más de dos siglos y que, probablemente, ha sido la más apasionante de la historia de la Física.

2.1. Teorías ondulatoria y corpuscular de la luz

René Descartes (1569-1650) fue el primero en establecer una hipótesis sobre la naturaleza de la luz contrastada con resultados experimentales: **la teoría corpuscular de la luz**. Consideró que la luz es un flujo de partículas con una velocidad de traslación fija, cuya reflexión en los espejos se explica mediante choques de aquellas contra éstos. Sin embargo, para explicar la ley de la refracción se ve obligado a admitir que las “partículas de luz” aumentan su velocidad al pasar de un medio menos denso a otro de densidad mayor, lo cual es falso como demostró mucho más tarde (en 1850) el físico francés Jean Bernard Foucault (1819-1868).

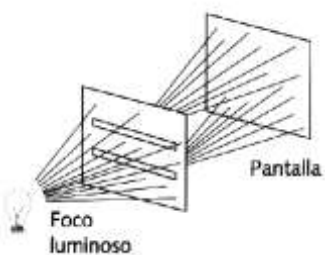
El análisis de ciertos descubrimientos relacionados con la refracción y con la velocidad de la luz llevaron a Christiaan Huygens (1629-1695) a desarrollar su propia teoría sobre la naturaleza de la luz: **la teoría ondulatoria de la luz**, que expuso por primera vez en 1678. Huygens postuló que la luz, al igual que el sonido, se propaga mediante un movimiento ondulatorio, pero mientras el sonido lo hace en el aire, la luz se propaga en un medio llamado *éter*. Se suponía que el *éter* es un medio sutil, que lo llena todo (incluso el vacío) y de una elasticidad perfecta. Para explicar la propagación de la “vibración luminosa”, Huygens estableció su ya conocido principio: *Cada punto del éter alcanzado por las ondas emitidas por un foco luminoso se convierte en un nuevo centro emisor de ondas idénticas cuyas interacciones determinan la propagación global*.

Con esta idea, Huygens logró explicar las leyes de la reflexión y de la refracción, concluyendo, satisfactoriamente, que la velocidad de la luz ha de ser menor en los medios más densos. No fue capaz de explicar, sin embargo, ciertos fenómenos que más tarde se los denominó de *polarización*. La razón de esto hay que buscarla en que Huygens consideró que la luz, como el sonido, es una onda longitudinal¹. Por otro lado, la propagación rectilínea de la luz se explica mejor con la teoría corpuscular, aunque ésta tampoco da cuenta de la polarización.

Isaac Newton (1642-1727), influido por su gran descubrimiento, la *ley de la Gravitación Universal*, tendió a explicar los fenómenos eléctricos, magnéticos y luminosos de manera similar. La teoría ondulatoria no se lo permitía, pero sí la corpuscular; por esta razón y porque ésta explica mejor la propagación rectilínea de la luz, Newton se decantó por la corpuscular. Dado el enorme prestigio del científico inglés, la teoría ondulatoria, aunque tenía firmes partidarios y a pesar de que la luz experimentaba fenómenos típicamente ondulatorios, quedó olvidada.

2.2. Descripción actual de la naturaleza de la luz

A comienzos del siglo XIX, entre 1800 y 1804, el inglés Thomas Young (1773-1829) realizó una serie de experimentos que permitieron dirimir la controversia sobre la dualidad **onda/corpúsculo** en relación con la naturaleza de la luz. Consistieron estos experimentos en provocar interferencias de dos haces luminosos que procedían de dos rendijas iluminadas por el mismo foco (ver figura), con lo que se conseguían dos focos secundarios de luz coherente. La presencia de interferencias en la pantalla plasmadas en zonas oscuras y brillantes bien diferenciadas (ver figura de la página siguiente), que es un fenómeno típicamente ondulatorio, inclinó la



¹Hoy sabemos que la luz es una onda transversal

balanza de manera definitiva al lado de la naturaleza ondulatoria de la luz.

Las conclusiones de Young se reforzaron con los trabajos de Augustin Fresnel (1788-1827), quien realizó numerosos experimentos que pusieron de manifiesto los fenómenos de interferencia y de difracción de la luz; además desarrolló las bases de la teoría ondulatoria. En particular, demostró que la propagación rectilínea de la luz, que tanto preocupaba a Newton, es una consecuencia del valor extremadamente pequeño de la longitud de onda de las ondas luminosas, en torno a los $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

El espaldarazo definitivo a la naturaleza ondulatoria se produjo a mediados del siglo XIX. En primer lugar Foucault midió la velocidad de la luz tanto en el aire como en el agua, obteniendo que es menor en el agua, contrariamente a las necesidades de la teoría corpuscular. Más tarde, en 1864, el escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) obtuvo las ecuaciones fundamentales del Electromagnetismo (ecuaciones de Maxwell), que predicen la existencia de ondas electromagnéticas; es decir, ondas generadas por campos eléctricos y magnéticos variables y mutuamente perpendiculares, como muestra la figura, dando lugar a la propagación de los mismos, y con ellos a la energía que almacenan. Tras verificar que la velocidad teórica de estas ondas es idéntica a la obtenida experimentalmente por Foucault para la luz, Maxwell sugirió que la luz representa una pequeña porción del espectro de ondas electromagnéticas, aquella cuyo intervalo de longitudes de onda es capaz de impresionar el ojo humano.

La sugerencia de Maxwell fue confirmada en 1888 por Heinrich Hertz (1857-1894), quien generó ondas electromagnéticas, a partir de circuitos eléctricos, en la zona de las longitudes de onda del orden del metro (*radioondas*). Éstas, además, presentan los mismos fenómenos de reflexión, refracción, polarización y difracción que la luz ordinaria.

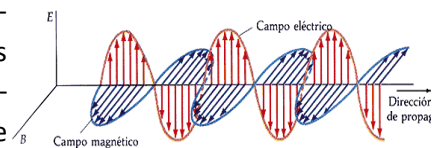
Se ponía así fin a la vieja polémica sobre la naturaleza de la luz, sin embargo todavía quedaban algunas sorpresas para los científicos. En efecto, en primer lugar hubo que revisar el viejo concepto del éter, pues las ondas electromagnéticas no necesitan ningún medio material para propagarse. El famoso experimento de Albert A. Michelson (1852-1931) y Edward W. Morley (1838-1923) destinado a detectar el "viento de éter" probó justo lo contrario, que no existe.

Por otro lado, Albert Einstein (1879-1955) reveló en 1905 algo realmente sorprendente, y es que el **efecto fotoeléctrico**² sólo puede explicarse correctamente suponiendo que la luz se comporta como un haz de partículas, que denominó **fotones**, cuya energía es proporcional a la frecuencia de la luz incidente. La energía E de cada uno de estos fotones está relacionada con la frecuencia f de la onda electromagnética por la ecuación,

$$E = hf$$

donde h es la constante de Plank, de valor es $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

De este modo se puede explicar el efecto fotoeléctrico así: los fotones "chocan" con los electrones de la superficie metálica, de modo que, si su energía ($E = hf$) es



² Algunos metales pueden liberar electrones cuando son irradiados por luz u otras ondas electromagnéticas. Este efecto se llama *fotoeléctrico* y el hecho de que se liberen o no electrones depende de la frecuencia de la radiación.

igual o mayor que la energía que mantiene ligado el electrón al átomo, éste absorbe la energía del fotón y se libera del metal. El número de electrones liberados depende del número de fotones que, a su vez, depende de la intensidad de la luz; pero para que se liberen electrones es necesario que la frecuencia de la luz sea tal que la energía de los fotones supere a la energía que mantiene a los electrones ligados al metal. Esta es la base del funcionamiento de las células fotoeléctricas de los “mandos a distancia” de televisores o de los cierres centralizados de los coches.

El efecto fotoeléctrico puede, por lo tanto, interpretarse como un choque entre un fotón y un electrón, por lo que en la interacción luz-materia la luz se comporta más como una partícula que como una onda.

De esta manera se cerraba un círculo de casi 250 años de controversia que se podría resumir fundamentalmente así,

La luz (y el resto de las ondas electromagnéticas) se comporta como una onda en todo lo referente a su propagación; sin embargo, lo hace como un haz de partículas (fotones) cuando interacciona con la materia.

3. Propagación de la luz en medios materiales: índice de refracción

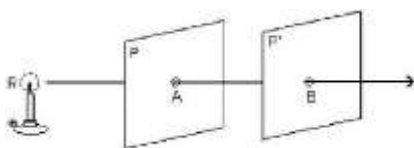
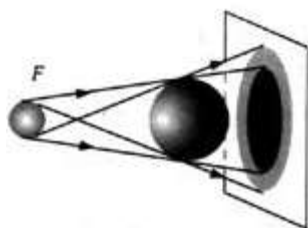
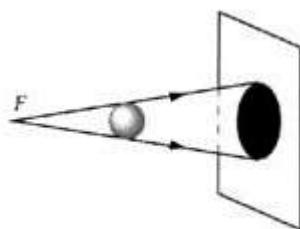
3.1. Propagación rectilínea

Como ya hemos dicho, la luz manifiesta su naturaleza ondulatoria cuando se encuentra con aberturas u obstáculos cuyo tamaño es comparable a su longitud de onda. En los demás casos podemos considerar que viaja siguiendo trayectorias en línea recta, que denominamos rayos y podemos analizar de una forma puramente geométrica.

Consecuencia inmediata y comprobación experimental de la propagación rectilínea de la luz es la formación de sombras al colocar un objeto opaco entre un foco luminoso y una pantalla. Si el foco es puntual (ver figura superior) y los bordes del objeto no son afilados³, aparece una sombra con contornos bien definidos que queda determinada por las prolongaciones de los rayos que, saliendo del foco, son tangentes al objeto. Si el foco es extenso (ver figura intermedia), aparece, como en el caso anterior, una zona a la que no llega ningún rayo (sombra) y otra que es alcanzada sólo por una fracción de los rayos procedente del objeto (penumbra). La penumbra es cada vez más luminosa conforme se aleja de la región de sombra.

De esta forma se pueden explicar los eclipses, totales o parciales, que se producen cuando parte de la superficie terrestre queda dentro de la sombra o penumbra proyectada por la Luna, al interponerse entre el Sol y la Tierra.

Otro experimento que muestra claramente la propagación rectilínea de la luz es el mostrado en la figura inferior. Para que la luz pase por la rendija *B*, es necesario que esté alineada con *A* y *B*.



³Si los bordes de objeto son muy afilados se ponen de manifiesto fenómenos de difracción.

3.2. Velocidad de la luz en el vacío

La velocidad de la luz es tan grande que durante mucho tiempo se consideró que su propagación era instantánea. El primer intento para medir experimentalmente la velocidad de la luz se debe a Galileo, pero no tuvo éxito.

El primer experimento satisfactorio lo obtuvo el astrónomo danés Olaf Röemer en 1676 estudiando los eclipses de los satélites de Júpiter. Estando Júpiter más alejado del Sol que la Tierra, tiene un periodo extraordinariamente más largo que el terrestre; así que, (ver figura) mientras la Tierra pasa de T_1 a T_2 (medio año), Júpiter se desplaza muy poco sobre su órbita. Cada 24 horas aproximadamente se observa desde la Tierra, en la posición T_1 , un eclipse de uno de los satélites de Júpiter tras este planeta. Es por lo tanto sencillo predecir la hora exacta en que se debe verificar el eclipse cuando la Tierra está en T_2 , transcurrido medio año desde que se encontraba en T_1 . La observación revela un retraso aproximado de 1000 s, debido al mayor camino (de T_1 a T_2) que la luz debe recorrer para llegar a la nueva posición de la Tierra. Siendo el eje mayor de la órbita terrestre de unos 296.000.000 km, se obtiene para la velocidad de la luz:

$$c \approx 296 \cdot 10^6 / 10^3 = 2,96 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

Los cálculos que hemos hecho no son exactamente los que hizo Röemer, los suyos fueron menos precisos, llegando en sus deducciones a un valor para la velocidad de la luz de $2,14 \cdot 10^5 \text{ km/s}$.

Una medida de mayor precisión fue realizada por el físico francés Armand Fizeau en 1849 (ver figura). La luz del foco se refleja en el espejo semitransparente de la derecha y pasa a través de un hueco de la rueda dentada giratoria hasta el espejo de la izquierda, situado a varios kilómetros de distancia del foco. Si se hace girar la rueda a suficiente velocidad, la luz reflejada en el espejo izquierdo vuelve al observador pasando por el hueco siguiente de la rueda dentada, al ser reflejada por el espejo derecho. La velocidad de rotación de ésta permite determinar el tiempo transcurrido y, en consecuencia, la velocidad de la luz. Fizeau obtuvo una velocidad de $3,1 \cdot 10^5 \text{ km/s}$.

El método fue perfeccionado por Foucault, en 1850, que sustituyó la rueda por un espejo giratorio (ver figura) y, posteriormente por Albert A. Michelson, que obtuvo para la velocidad de la luz en el aire un valor de $2,997 \cdot 10^5 \text{ km/s}$.

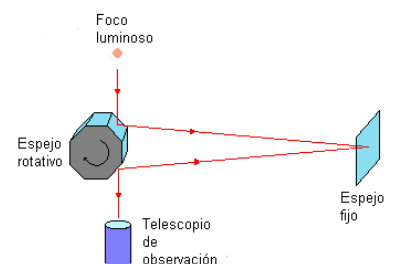
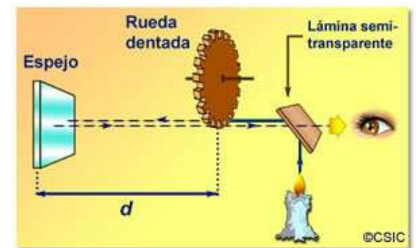
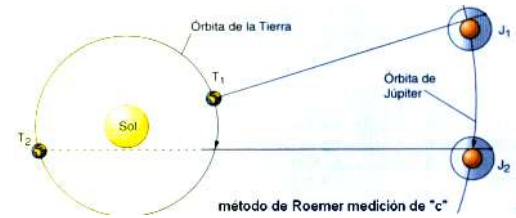
En la actualidad el valor aceptado para la velocidad de la luz en el vacío es:

$$c = 2,99792 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

por lo que se puede emplear el valor de $3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$ sin cometer un error significativo. Como acabamos de ver, la velocidad de la luz depende del medio en el que se propague y es máxima en el vacío.

3.3. Índice de refracción

Foucault determinó también la velocidad de la luz a través de varios líquidos, entre ellos el agua, y averiguó que era bastante inferior a la que lleva en el aire, en concordancia con la teoría ondulatoria de Huygens sobre la naturaleza de la luz, lo que supuso la consolidación definitiva de la teoría ondulatoria. Obtuvo para la



velocidad de la luz en el agua un valor de $2,25 \cdot 10^5 \text{ km/s}$.

Se define el **índice de refracción absoluto** (n) de un medio material a la relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la que tiene en dicho medio; esto es,

$$n = c/v$$

Como se cumple que $c > v$, los índices de refracción absolutos son siempre mayores que la unidad.

En el vacío la velocidad de la luz es la misma para todas las longitudes de onda, pero no ocurre lo mismo en los medios materiales transparentes. En efecto, en cualquier medio material la velocidad de la luz depende de la longitud de onda. Teniendo en cuenta que la frecuencia de una luz determinada es la misma en cualquier medio (pues depende de la fuente), como $\lambda = v/f$, si cambia la velocidad es porque lo hace la longitud de onda

Para comparar la velocidad de la luz en dos medios distintos, cuyos índices de refracción absolutos son n_1 y n_2 , se emplea el **índice de refracción relativo** del medio 2 respecto al 1, que se define como,

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

De acuerdo con esta ecuación, los índices de refracción y las velocidades de la luz en dos medios distintos son inversamente proporcionales.

Se dice que *un medio es más refringente que otro cuando su índice de refracción es mayor* y, por consiguiente, la luz se propaga en ese medio a *menor* velocidad.

4. Reflexión de la luz

Como se ve en el tema de Movimiento ondulatorio, la reflexión y la refracción son dos fenómenos característicos de todas las ondas, pero son particularmente importantes en las ondas luminosas.

Cuando la luz incide sobre una superficie que no puede atravesar, una parte se refleja (es decir, regresa al medio de procedencia) y otra parte es absorbida.

La **reflexión** es el cambio de dirección que experimenta un rayo de luz dentro del mismo medio de propagación cuando incide sobre una superficie (ver figura).

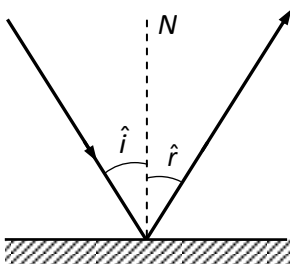
Este fenómeno permite ver los objetos no luminosos: los rayos de luz reflejados por un objeto permiten formar la imagen de éste en la retina del ojo.

En el tema de Movimiento ondulatorio se prueba, mediante el principio de Huygens, las dos leyes experimentales de Snell de la reflexión, que son.

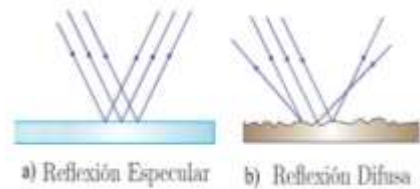
- El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en el mismo plano.
- El ángulo que forma el rayo incidente con la normal (ángulo de incidencia, $\hat{i}$) es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con la normal (ángulo de reflexión $\hat{r}$); es decir,

$$\boxed{\hat{i} = \hat{r}} \quad (2)$$

Se pueden distinguir dos tipos de reflexión: la **dirigida** (o **especular**) y la **difusa**. La reflexión es dirigida cuando los rayos paralelos son también paralelos después de la reflexión; se da cuando las rugosidades de la superficie reflectante son menores



que la longitud de onda (figura a). Un ejemplo de este tipo de reflexión es la que se obtiene en un espejo. La reflexión es difusa cuando los rayos reflejados se dispersan en todas las direcciones; se da cuando las irregularidades son mayores que la longitud de onda (figura b); es el tipo de reflexión es la que nos permite visualizar los objetos al llegar a los ojos la luz que reflejan.



5. Refracción de la luz. Reflexión total. Fibras ópticas.

5.1. Concepto

Cuando la luz incide sobre una superficie que separa dos medios transparentes, una parte se refleja y otra parte se refracta (o sea, se propaga por el otro medio con un cambio de dirección y de velocidad), como se ve en la figura.

La **refracción** es el cambio de dirección que experimenta un rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro en el que varía su velocidad de propagación.

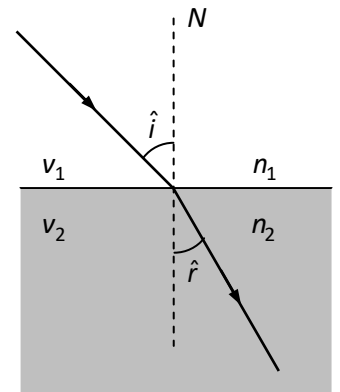
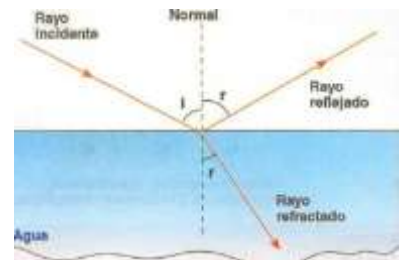
Como en la reflexión, en el tema de Movimiento ondulatorio se utiliza el principio de Huygens para probar las dos leyes experimentales de Snell de la refracción:

- El rayo incidente, la normal y el rayo refractado están en el mismo plano.
- La relación que existe entre el seno del ángulo que forma el rayo incidente con la normal (ángulo de incidencia, $\hat{i}$) y el seno del ángulo que forma el rayo refractado con la normal (ángulo de refracción $\hat{r}$) es la misma que la que existe entre las velocidades de propagación de la luz entre los dos medios; es decir,

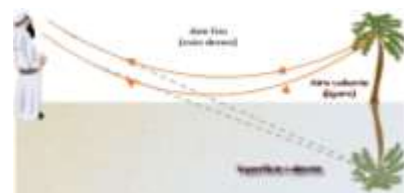
$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$$

donde v_1 y v_2 son, respectivamente, las velocidades de la onda en el medio incidente y en el refractado, como se ve en la figura. Combinando esta ecuación con la (1),

$$\left. \begin{array}{l} \sin \hat{i} / \sin \hat{r} = v_1 / v_2 \\ n_2 / n_1 = v_1 / v_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \boxed{n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{r}} \quad (3)$$

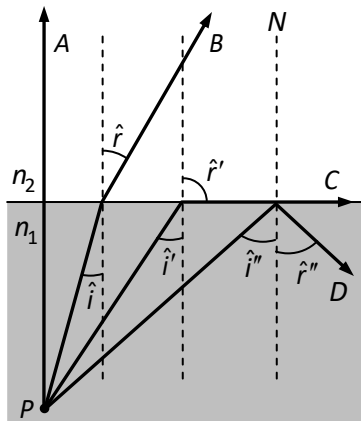


La refracción atmosférica es la responsable de las ilusiones ópticas denominadas **espejismos**. La causa es el desigual índice de refracción de las diferentes capas de aire cuando se encuentran a diferente temperatura, muy común en los desiertos cuando calienta el Sol. La figura muestra un caso concreto: el suelo, muy caliente, aumenta la temperatura de las capas de aire próximas, que se va enfriando a medida que ascendemos. El aire caliente (menos denso) tiene un índice de refracción menor que el frío (más denso), lo que ocasiona que los rayos de luz sufran refracciones sucesivas que los curvan, como se ve en la figura. Como nuestro ojo está acostumbrado que los rayos de luz le lleguen en línea recta, la posición aparente del objeto es distinta de la real, como se ve en la figura.



5.2. Ángulo límite y reflexión total

De acuerdo con la segunda ley de la refracción, cuando un rayo luminoso pasa de un medio a otro menos refringente, por ejemplo del agua al aire; el rayo refractado se aleja de la normal. En estas condiciones, si el ángulo de incidencia es sufi-



cientemente grande, el rayo luminoso puede no refractarse, reflejándose totalmente en la superficie de separación de ambos medios.

Consideremos un punto luminoso P (ver figura), situado en un medio de índice de refracción n_1 , que emite rayos luminosos que se refractan al pasar a otro medio menos refringente de índice de refracción n_2 ($n_1 > n_2$). Como los rayos refractados se alejan de la normal, si consideramos rayos incidentes cada vez más inclinados; es decir, con ángulos de incidencia cada vez mayores, los rayos refractados correspondientes poseen también ángulos de refracción cada vez más elevados. Para un cierto ángulo de incidencia $\hat{i}' = \hat{l}$, el ángulo de refracción vale 90° (rayo PC de la figura). A ese ángulo se le llama **ángulo límite** y, de acuerdo con la segunda ley de la refracción, su valor es,

$$n_1 \sin \hat{l} = n_2 \sin 90 \Rightarrow \sin \hat{l} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ya que } \sin 90 = 1)$$

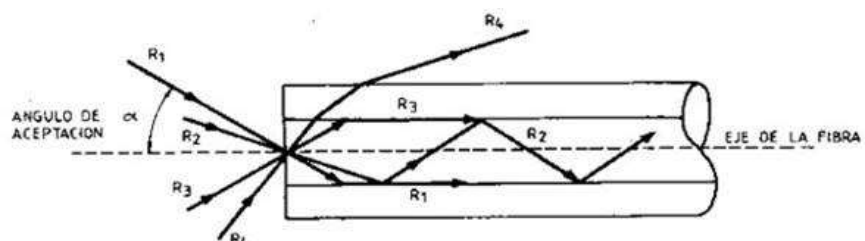
Para ángulos mayores que el límite no se produce refracción, sino reflexión (rayo PD de la figura). Este fenómeno, que **sólo puede producirse cuando la luz pasa de un medio más refringente a otro menos refringente**, se denomina **reflexión total**.

El ángulo límite para el vidrio corriente es 42° , lo que permite fabricar *prismas*⁴ de reflexión total, de utilidad en muchos instrumentos ópticos, pues absorben menor cantidad de luz que los espejos. En las figuras se representan dos prismas de vidrio en los que se produce una reflexión total, ya que los ángulos de incidencia son de 45° y, por tanto, mayores que el ángulo límite. En el primer prisma se obtiene un cambio de dirección de 180° y en el segundo de 90° .

La reflexión total tiene muchas aplicaciones. Así por ejemplo, los prismas de reflexión total son utilizados en instrumentos ópticos como periscopios, prismáticos, etc. Por ejemplo, la marcha de los rayos de luz en un periscopio requiere de dos prismas de reflexión total, como se ve en la figura inferior.

5.3. Fibras ópticas

Una aplicación muy importante de la reflexión total son las **fibras ópticas**, hilos de vidrio o plástico de alto índice de refracción y de un diámetro de unos pocos micrómetros. La figura ilustra su comportamiento: la luz penetra por una de las dos superficies extremas, que son planas, con un ángulo menor que el límite α quedando atrapada en su interior si el rayo incidente, en sus múltiples reflexiones con las paredes sufre la reflexión total, hasta salir por el otro extremo.



Si en lugar de utilizar una sola fibra se utiliza un haz, se puede transmitir una imagen de un extremo al otro del mismo, conduciendo cada fibra una parte de la mis-

⁴ Un **prisma óptico** es un medio transparente limitado por dos superficies planas no paralelas. El ángulo que forman las dos superficies es el ángulo del prisma.

ma. Gracias a las fibras ópticas se construyen instrumentos médicos (*endoscopios*) que permiten visualizar zonas internas del cuerpo humano; por ejemplo, puede explorarse el estómago introduciendo las fibras ópticas, que son flexibles, por la boca. Unas fibras transportan la luz para iluminar la zona y el resto llevan la luz reflejada hacia el exterior.

Las fibras ópticas se utilizan también en telecomunicaciones (telefonía, internet, televisión, ...) transmitiendo información mediante pulsos de luz. La información viaja más rápido, permite más densidad de información que los hilos de cobre y está libre de interferencias. Por ejemplo, un solo par de fibras puede soportar 672 conversaciones telefónicas simultáneas de ida y vuelta, mientras que un par de hilos de cobre permite sólo 24.

6. Conceptos básicos de Óptica Geométrica. Normas y Convenio de signos

La Óptica geométrica estudia fundamentalmente la formación de imágenes por reflexión y por refracción. Los sistemas ópticos más habituales para la formación de este tipo de imágenes son los **espejos** y las **lentes**, los primeros forman imágenes por reflexión y las segundas por refracción.

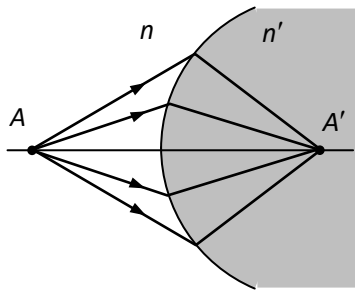
La Óptica geométrica ha permitido un gran avance de los instrumentos ópticos, como el telescopio, el microscopio o la cámara fotográfica. Incluso la **Óptica fisiológica** considera al ojo humano como un instrumento óptico. Todo ello a partir de leyes muy sencillas, como las de la reflexión y la refracción, que pueden ser tratadas desde una perspectiva puramente geométrica, sin necesidad de hacer suposición alguna sobre la naturaleza de la luz. A continuación vamos a definir una serie de elementos fundamentales de la Óptica geométrica:

- **Espejo.** Superficie muy pulimentada, generalmente metálica, que permite una reflexión dirigida. Los más importantes son los *planos* y los *esféricos*.
- **Dioptrio.** Conjunto formado por dos medios transparentes con índices de refracción diferentes separados por una superficie. Si la superficie de separación es plana, se trata de un *dioptrio plano*; si es esférica, de un *dioptrio esférico*.
- **Sistema óptico.** Conjunto de varios dioptrios y/o espejos.
- **Eje óptico.** Es el eje de simetría de un espejo, un dioptrio o un sistema óptico alineado centralmente.
- **Centro óptico, O.** Es el punto de intersección de un dioptrio o de un espejo con el eje óptico.

Cuando los rayos luminosos procedentes de un punto A, denominado punto **objeto**, se encuentran ante un dioptrio, un espejo o un sistema óptico puede suceder que, después de reflejarse o refractarse en sus distintas superficies, converjan y se junten a la salida en otro punto A'. Si esto sucede, al punto A' se le llama punto **imagen** de A. Como los rayos salen realmente de A y se cortan realmente en A', se dice que el primero es un punto **objeto real** y el segundo un punto **imagen real**.

También puede ocurrir que los rayos salgan divergentes, pero que sus prolongaciones, en el sentido contrario al de propagación, se corten en un punto A'. En este caso el punto se llama **imagen virtual** de A.

Las figuras de la página siguiente muestran la marcha de los rayos después de



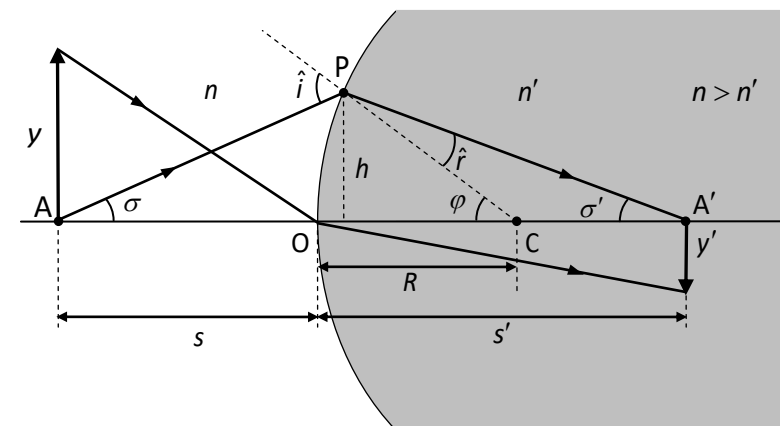
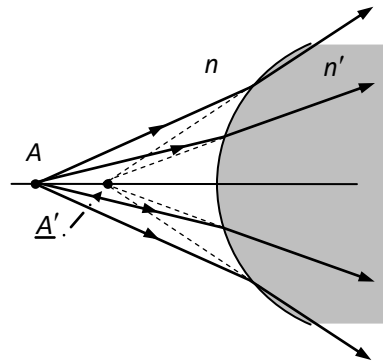
atravesar la superficie de un dioptrio esférico. En el primer caso la imagen es real (se cortan los rayos refractados) y en el segundo virtual (se cortan las prolongaciones de los rayos refractados).

La imagen real del punto puede visualizarse en una pantalla. Mientras que la imagen virtual puede verse directamente pero no es posible recogerla en una pantalla, ya que no existe realmente.

Si los rayos luminosos proceden de un objeto en vez de un punto, se forma una imagen del objeto compuesta por las imágenes de todos los puntos que forman el objeto. En realidad, lo que hacen un dioptrio, un espejo o un sistema óptico es representar al objeto en su imagen.

Una imagen que tiene la misma orientación que el objeto se llama **directa o derecha**; mientras que si la orientación es opuesta, es **invertida**.

Los objetos se representan por medio de flechas verticales orientadas hacia arriba y colocadas en el eje óptico. Las imágenes también se representan con flechas verticales, orientadas hacia arriba si la imagen es derecha y hacia abajo si es invertida. La figura muestra una imagen real e invertida de un objeto formada por un dioptrio esférico.



Las distancias del objeto (s) y de la imagen (s') al centro óptico (O) se llaman, respectivamente, **distancia objeto** y **distancia imagen**.

Se dice que un dioptrio, un espejo o un sistema óptico son **estigmáticos** cuando todos los rayos que salen de un punto A se cortan exactamente (ellos mismos o sus prolongaciones) en otro punto A' , después de atravesarlos; de lo contrario, se dice que son **astigmáticos**. En este caso, a cada punto del objeto le corresponde una mancha en la imagen, lo que hace que sea borrosa.

En nuestro estudio de la Óptica Geométrica utilizaremos el convenio de signos propuesto en las normas DIN, que son:

- Las letras que hacen referencia a la imagen son las mismas que las referidas al objeto, pero con el símbolo “prima”. Por ejemplo, si el tamaño del objeto es y , el de la imagen es y' .
- Los objetos se colocan de modo que la luz incidente proceda de la izquierda y se propague hacia la derecha.
- Las magnitudes lineales se consideran negativas hacia la izquierda del centro óptico (punto O para el dioptrio de la figura) y positivas hacia la derecha; es decir, como si el centro óptico estuviera situado en el origen de un eje coordenado. En la figura, s es negativa y s' positiva.
- Las distancias al eje óptico son positivas si están por encima del eje y negativas si están por debajo. En la figura y es positiva y y' negativa.
- Los ángulos que los rayos y las rectas forman con el eje óptico o con cualquier otro eje secundario son positivos si al llevar el rayo a coincidir con el eje mediante un giro, por el camino más corto, se gira en sentido contrario al de las

agujas del reloj. En caso contrario son negativos. En la figura, σ es negativo y σ' positivo.

- Los ángulos que los rayos forman con la recta normal de un dioptrio o de un espejo son positivos si al llevar el rayo a coincidir con la normal mediante un giro, por el camino más corto, se gira en sentido de las agujas del reloj. En caso contrario son negativos. En la figura, $\hat{i}$ y $\hat{r}$ son positivos.

En nuestro estudio consideraremos solamente rayos **paraxiales**; es decir, rayos de luz cuyos ángulos de incidencia con las normales a las superficies reflectoras o refractoras son pequeños. Los rayos que marchan próximos al eje óptico son paraxiales. Para estos rayos *se pueden sustituir los senos y las tangentes de los ángulos por los mismos ángulos expresados en radianes sin cometer un error apreciable*

Aumento lateral

Se define el **aumento lateral** (M_L) de un dioptrio, espejo o sistema óptico como la relación entre el tamaño de la imagen y el del objeto; esto es,

$$M_L = \frac{y'}{y}$$

7. Imágenes obtenidas por reflexión: espejos planos

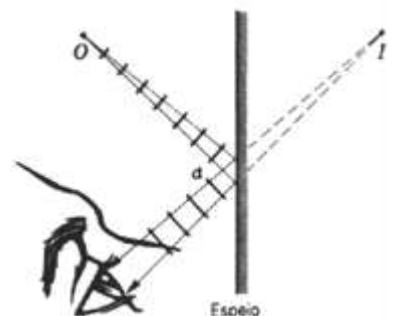
Los espejos tienen una capacidad reflectora de más del 95% de la intensidad de la luz incidente. Según su forma geométrica pueden ser planos, esféricos, parabólicos, hiperbólicos ... Como ya se ha dicho, los espejos más importantes son los planos y los esféricos; éstos últimos pueden clasificarse a su vez en *convexos* y *cóncavos*.

En adelante supondremos que la cara reflectante de cualquier espejo es la de la izquierda.

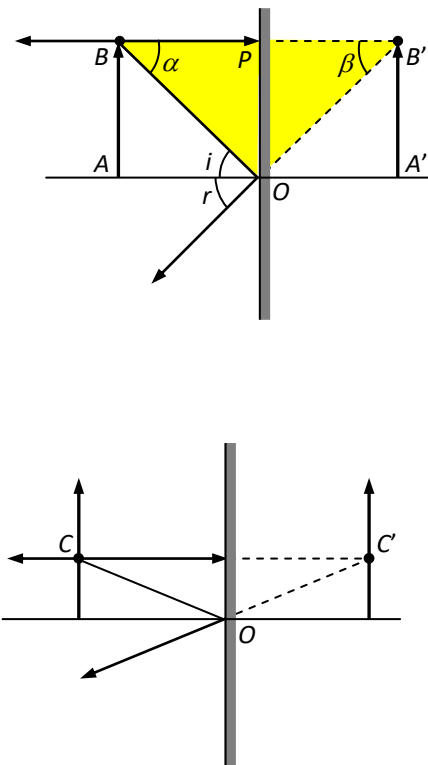
7.1. Espejos planos. Relación entre el objeto y la imagen

Al ponerse delante de un espejo plano se observa una imagen que parece estar “dentro” del mismo y a igual distancia. Se percibe una imagen que llega a nuestros ojos, pero ¿puede venir luz de la zona que está detrás del espejo? La explicación se encuentra en la reflexión dirigida (o especular) de la luz.

Sea un punto luminoso O (punto objeto) que se encuentra delante de un espejo plano, como ilustra la figura. De los infinitos rayos que salen de O sólo dos son necesarios dos para explicar el fenómeno, tal como se indica en la figura. Éstos, al llegar al espejo, se reflejan y, en cada caso, el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales. Los rayos reflejados, que son divergentes, alcanzan la pupila⁵ y vemos el objeto. Ahora bien, como ya hemos mencionado, nuestros ojos ven en línea recta; esto es, estamos habituados a que los rayos luminosos que proceden de los objetos nos lleguen siempre en línea recta. Si observamos la figura, vemos que las prolongaciones de los rayos reflejados se cortan en el punto I (punto ima-



⁵ Para que en la retina se forme la imagen de un punto de un objeto es necesario que rayos divergentes procedentes de ese punto alcancen la pupila.



gen), por lo que los rayos parecen proceder del punto I y, en consecuencia, *el ojo ve una imagen de O en el punto que se obtiene por la intersección de las prolongaciones de los rayos reflejados*. Por lo tanto, la imagen que se obtiene mediante un espejo plano es virtual.

La figura muestra un objeto AB colocado delante de un espejo plano y sobre su eje óptico. De los infinitos rayos que salen del punto B , uno marcha perpendicular al espejo (incidiendo en él en el punto P) y otro lo hace en el punto O , formando un ángulo de incidencia i con la normal en ese punto (que es el propio eje óptico). La ley de la reflexión establece que $\hat{i} = \hat{r}$, de lo que se deduce que los ángulos α y β son iguales a $\hat{i}$ y, por lo tanto a $\hat{r}$. Como el cateto PO es común a los dos triángulos rectángulos coloreados, éstos son iguales. Así pues, la distancia del objeto al espejo es igual a la de la imagen, lo que significa que *la imagen de un objeto en un espejo plano se forma a la misma distancia del espejo que la del objeto*. Además, la construcción geométrica de la figura muestra que *la imagen tiene el mismo tamaño que el objeto*.

Observa en la figura que si consideramos dos rayos que parten de un punto intermedio C del espejo, su imagen se forma en el punto C' , que es donde se cortan sus proyecciones. De este modo se forma la imagen $A'B'$ del objeto AB compuesta por las imágenes de todos los puntos que lo forman.

El espejo plano es el único dispositivo óptico rigurosamente estigmático para todos los puntos del espacio. Esto justifica que forme imágenes nítidas y sin distorsiones.

7.2. Espejos esféricos

7.2.1. Elementos ópticos

- **Centro de curvatura, C .** Es el centro de la superficie esférica a la que pertenece el espejo.
- **Radio de curvatura, R .** Es el radio del espejo. Si R es positivo (C a la derecha de O) se trata de un *espejo convexo* y si es negativo (C a la izquierda de O) de uno *cóncavo*.
- **Eje óptico.** Es la recta que pasa por el centro de curvatura y que divide al espejo en dos mitades iguales.
- **Centro óptico, O .** Es el punto en el que el eje óptico corta a la superficie esférica del espejo.
- **Foco imagen, F' .** Cuando sobre un espejo esférico inciden rayos paralelos al eje óptico, los rayos reflejados (o sus prolongaciones) convergen en un punto de dicho eje. Éste es el foco imagen.
- **Distancia focal imagen, f' .** Es la distancia, con signo positivo o negativo, entre el foco imagen y el centro óptico.
- **Foco objeto, F .** Es el punto del eje óptico que cumple que todo rayo (o prolongación del mismo) que pasa por él se refleja paralelo al eje óptico. En los espejos esféricos los focos imagen y objeto coinciden en el mismo punto.
- **Distancia focal objeto, f .** Es la distancia, con signo positivo o negativo, entre el foco objeto y el centro óptico.

La figura muestra un espejo cóncavo con sus elementos ópticos, se ve que los focos objeto e imagen coinciden en el mismo punto.

En los espejos esféricos sólo existe un punto focal, F , que recibe el nombre de **foco principal del espejo**, y cuya posición, como probaremos después, es $f = R/2$.

El convenio de signos es el que se ha visto en el punto 6; es decir, el propuesto en las normas DIN aplicado a los espejos.

7.2.2. Ecuación fundamental de los espejos esféricos

La figura muestra un espejo cóncavo que forma una imagen $A'B'$ de un objeto AB . Para obtener la imagen se ha utilizado un rayo paralelo que, al reflejarse, pasa por el foco imagen F y otro focal que, al reflejarse, marcha paralelo al eje.

En la figura se ve que los triángulos coloreados son semejantes porque son rectángulos con un ángulo común; entonces se cumplen las relaciones,

$$\frac{A'B'}{MP} = \frac{A'F}{FM}$$

Como estamos usando rayos paraxiales⁶ se cumple aproximadamente que,

$$FM \approx FO = -f \Rightarrow A'F \approx -s' - (-f)$$

donde los signos negativos son necesarios porque s' y f son negativos. Así que,

$$\frac{A'B'}{MP} = \frac{-s' - (-f)}{-f} = \frac{s'}{f} - 1 \quad (3)$$

Observa en la figura el rayo que sale de B e incide en O ; como la normal al espejo en O es el eje óptico, los ángulos que forman los rayos incidente y reflejado son iguales (2ª ley de Snell). Por lo tanto, los triángulos coloreados son semejantes (rectángulos con un ángulo común). Así que se cumple en ellos que,

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{A'O}{AO} = \frac{-s'}{-s}$$

Pero la figura muestra que $AB = MP$, así que la ecuación queda como,

$$\frac{A'B'}{MP} = \frac{A'O}{AO} = \frac{-s'}{-s} \quad (4)$$

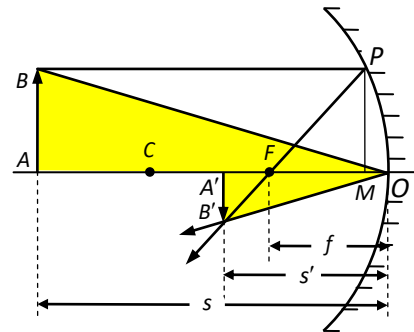
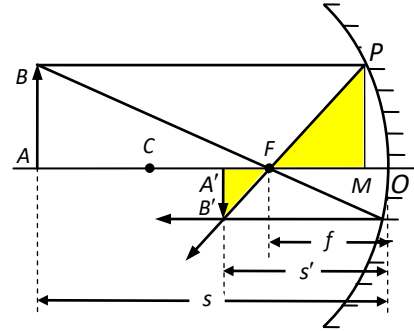
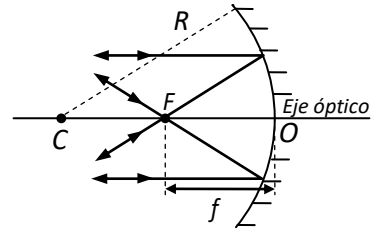
por lo que, al combinar las ecuaciones (3) y (4), resulta que,

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

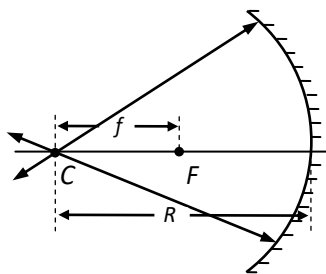
y si multiplicamos los dos miembros de la última ecuación por $1/s'$, obtenemos,

$$\left(\frac{s'}{s} + 1\right) \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

que es la ecuación de los espejos esféricos válida solo para rayos paraxiales y que, aunque se ha deducido para un caso particular, es de validez general.



⁶En la figura se han exagerado deliberadamente los tamaños del objeto y de la imagen para que se perciba mejor la figura. En la realidad los objetos son mucho menores en relación al espejo y los rayos se pueden considerar paraxiales.



De la ecuación podemos deducir la relación entre la distancia focal y el radio del espejo. La figura muestra un espejo cóncavo y un objeto puntual colocado en el centro de curvatura C. Los rayos que salen de C y llegan al espejo no se desvían por incidir perpendicularmente a la superficie del espejo⁷; por otro lado, la distancia entre C y cualquier punto del espejo es igual al radio R.

Aplicando la ecuación de los espejos, tenemos que $s=R$ y $s'=R$; así pues,

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{2}{R} = \frac{1}{f} \Rightarrow R = 2f \Rightarrow f = \frac{R}{2}$$

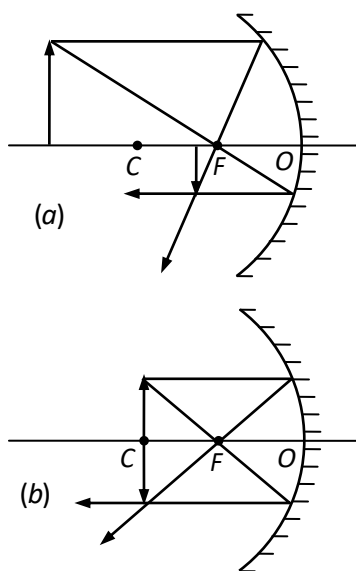
7.2.3. Construcción de imágenes

Para obtener gráficamente la imagen creada por un espejo basta trazar dos rayos procedentes de la punta de flecha que representa al objeto. Cuando estos rayos se reflejan, ellos mismos o sus prolongaciones se cortan en un punto que es el punto imagen de la punta de flecha.

Los rayos que se utilizan se llaman **principales** porque sus rayos reflejados son fáciles de obtener. Son los siguientes:

- Rayo paralelo al eje óptico (**paralelo**). El rayo reflejado (o su prolongación) pasa por el foco del espejo.
- Rayo que pasa (él o su prolongación) por el foco (**focal**). El rayo reflejado es paralelo al eje óptico.
- Rayo que pasa (él o su prolongación) por el centro de curvatura (**radial**). El rayo reflejado no se desvía.

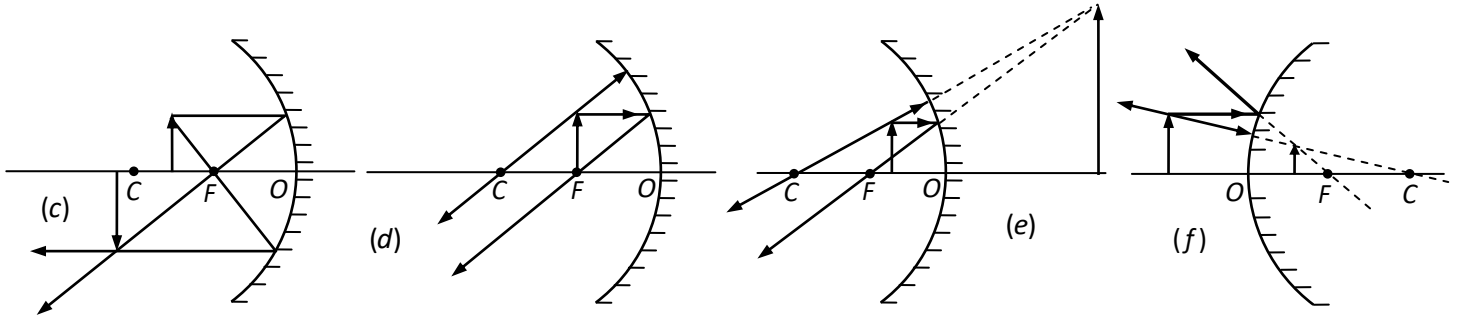
Construcción gráfica de las imágenes:



- **Espejos cóncavos.** Se producen las cinco situaciones siguientes:
 - a) Objeto situado a la izquierda del centro de curvatura (figura a). La imagen es real, invertida y menor que el objeto. Está situada entre el centro de curvatura y el foco.
 - b) Objeto situado en el centro de curvatura (figura b). La imagen es real, invertida e igual que el objeto. Está situada en el centro de curvatura.
 - c) Objeto situado entre el centro de curvatura y el foco (figura c de la página siguiente). La imagen es real, invertida y mayor que el objeto. Está situada a la izquierda del centro de curvatura.
 - d) Objeto situado en el foco del espejo (figura d de la página siguiente). Los rayos reflejados son aproximadamente paralelos y la imagen, que es virtual, se forma en el infinito del espacio objeto.
 - e) Objeto situado a la derecha del foco (figura e de la página siguiente). La imagen es virtual (pues se cortan las prolongaciones de los rayos reflejados), derecha y mayor que el objeto. Se forma a la derecha del punto O, esto es, detrás del espejo.

⁷En efecto, estos rayos tienen siempre la dirección de la normal a la superficie del espejo en el punto de incidencia, por ello se cumple que $\hat{i}=0$. Ahora bien, la ley de Snell para la reflexión establece que $\hat{i}=\hat{r}$, se tiene que $\hat{r}=0$. Esto es, que el rayo incidente y el reflejado tienen la misma dirección, aunque se propagan en sentidos opuestos.

- **Espejos convexos.** Se produce una única situación, en la que la imagen es virtual, derecha y más pequeña que el objeto (figura f) que está entre O y F .



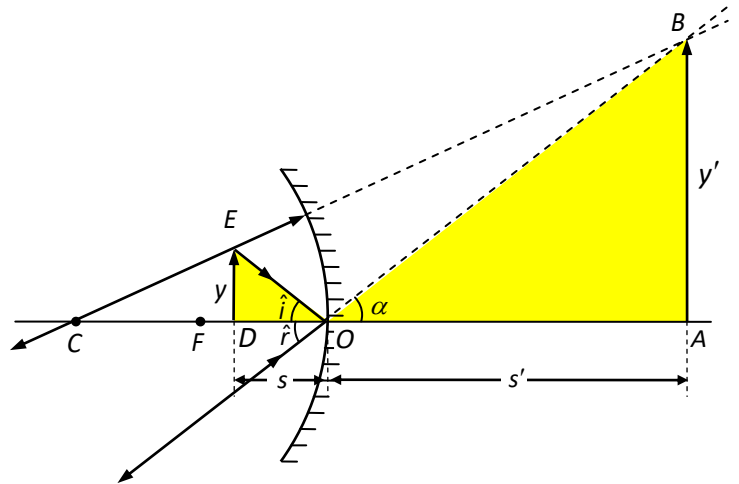
Observa que en los espejos las imágenes reales son invertidas y situadas a la izquierda de O ; mientras que las virtuales son derechas y están a la derecha de O . Los espejos convexos solo crean imágenes virtuales.

7.2.4. Aumento lateral

Para construir la imagen del espejo cóncavo de la figura se han utilizado el rayo radial (que pasa por el centro de curvatura C y no se desvía al reflejarse) y el que incide en el espejo en centro óptico O . Las prolongaciones de estos rayos se cortan en el punto B , por lo que la imagen (virtual) se forma en el punto A .

Para el rayo que se refleja en el centro óptico se tiene, aplicando la ley de Snell de la reflexión, que $\hat{i} = \hat{r}$; pero de la figura se obtiene que $\hat{r} = \alpha$, por lo que se deduce que $\hat{i} = \alpha$. Así que los triángulos OAB y ODE son semejantes porque son rectángulos y además tienen un ángulo igual. Por lo tanto, se cumple que,

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

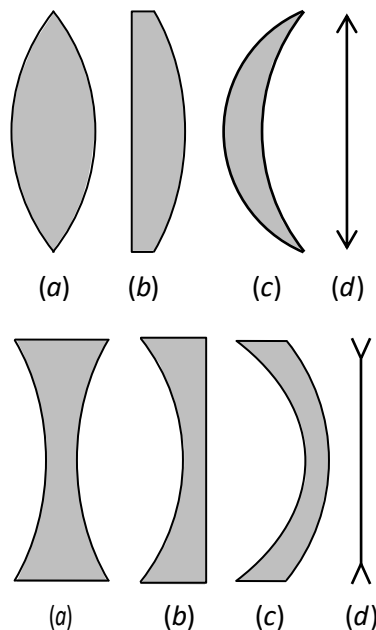


donde el signo menos es necesario para que el cociente s'/s sea positivo ya que (ver figura) s es negativo. Al igual que en el punto 7.2.2, la ecuación ha sido deducida para un caso particular pero es de validez general.

Recordando la ecuación del espejo esférico, resulta que el aumento lateral, al igual que la posición de la imagen, depende únicamente de la curvatura del espejo y de la posición del objeto.

8. Imágenes obtenidas por refracción: lentes delgadas

Normalmente no se utilizan simples dioptrios para la formación de imágenes por refracción, sino **sistemas ópticos centrados** que son una sucesión de dioptrios que separan varios medios y cuyos centros de curvatura se encuentran todos alineados a lo largo del eje óptico. Entre estos sistemas los más utilizados son las **lentes**, que son cuerpos transparentes (por ejemplo, de vidrio) delimitados por dos superficies, una de las cuales al menos es esférica. Se emplean para corregir los defectos del ojo y para fabricar instrumentos ópticos, tales como microscopios, telescopios o

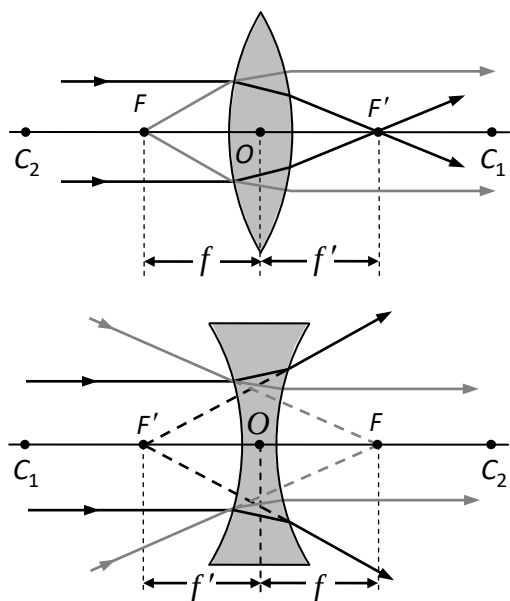


cámaras fotográficas. El sistema óptico que definen está formado por tres medios (habitualmente aire-vidrio-aire) y dos dioptrios, cuyas superficies de separación son las caras de la lente. Los sistemas de las figuras representan lentes y se pueden clasificar en:

- **Lentes convergentes**, son más gruesas en el centro que en los bordes, como se aprecia en la figura superior que representa distintos tipos de lentes convergentes. Según la forma de sus caras se tienen los siguientes tipos: *biconvexa* (a), *plano convexe* (b) y *menisco convergente* (c). Esquemáticamente se visualizan utilizando el símbolo de la figura (d).
- **Lentes divergentes**, son más gruesas en los bordes que en el centro, como se ve en la figura inferior que representa distintos tipos de lentes divergentes. Según la forma de sus caras pueden ser: *bicóncava* (a), *plano cóncava* (b) y *menisco divergente* (c). Se visualizan mediante el símbolo de la figura (d).

8.1. Elementos ópticos. Convenio de signos y aproximación paraxial

Las figuras muestran dos lentes delgadas, una convergente (la superior) y otra divergente (la inferior), y sus elementos ópticos. Éstos son:



- **Centros de curvatura**, C_1 y C_2 . Son los centros de los dioptrios que la forman; es decir, de sus superficies esféricas. Si una cara es plana, su centro está en el infinito.
- **Eje óptico**. Es la recta que une los centros de curvatura de los dos dioptrios. Si uno de ellos es plano, el eje óptico es la perpendicular al mismo que pasa por el centro de curvatura del otro.
- **Centro óptico**, O . Es un punto del interior de la lente que está en su eje óptico y que tiene la propiedad de que los rayos que pasan por él no experimentan cambio de dirección.
- **Foco imagen**, F' . Si sobre una lente inciden rayos paralelos al eje óptico, los rayos refractados (o sus prolongaciones) convergen en un punto de dicho eje. Este punto es el *foco imagen*.
- **Distancia focal imagen**, f' . Es la distancia, con signo positivo o negativo, que hay entre el foco imagen y el centro óptico. La lente convergente tiene su foco imagen a la derecha de O y la divergente a la izquierda.
- **Foco objeto**, F . Es el punto del eje óptico para el que todo rayo (o prolongación del mismo) que pasa por él emerge de la lente paralelo al eje óptico.
- **Distancia focal objeto**, f . Es la distancia, con signo positivo o negativo, que hay entre el foco objeto y el centro óptico. La lente convergente tiene su foco objeto a la izquierda de O y la divergente a la derecha.

Limitaremos nuestro estudio al caso de las **lentes delgadas**, que son aquellas cuyo grosor es despreciable frente a las distancias del objeto y de la imagen a la lente y a los radios de los dioptrios que las forman. En consecuencia, podemos medir todas las distancias desde las correspondientes superficies de la lente en lugar de hacerlo respecto al centro óptico O .

Las lentes delgadas son estigmáticas siempre que se usen rayos paraxiales. Así pues, los rayos paraxiales que salen de un punto luminoso (punto objeto) y atraviesan una lente delgada, después de refractarse, se cortan en el punto imagen.

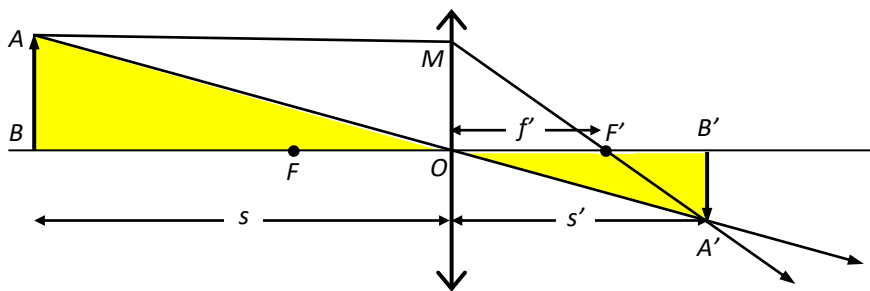
La ecuación de las lentes, que vamos a deducir a continuación, sólo se cumple para rayos paraxiales y lentes delgadas.

El convenio de signos es el que se ha visto en el punto 5; es decir, el propuesto en las normas DIN y que ya hemos aplicado a los dioptrios y espejos

Si aparece esta pregunta en un examen, tienes que enunciar las normas y convenios de signos. Además tienes que explicar qué se entiende por rayo y aproximación paraxial.

8.2. Ecuación fundamental de las lentes delgadas

En la figura se ve una lente convergente que forma una imagen $A'B'$ de un objeto AB . Para obtener la imagen se ha utilizado un rayo paralelo que, al refractarse, pasa por el foco imagen F' y otro que pasa por O y que, por lo tanto, no se desvía.



Observa en la figura que los triángulos OBA y $OB'A'$ son semejantes por ser rectángulos y tener un ángulo común, por lo tanto,

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB} = \frac{s'}{-s} = -\frac{s'}{s}$$

donde el signo menos delante de s se debe al convenio de signos (observa en la figura que s es negativo). Los triángulos OMF' y $F'B'A'$ también son semejantes, por la misma razón que los anteriores; así que,

$$\frac{A'B'}{OM} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{F'B'}{OF'} = \frac{s' - f'}{f'}$$

Igualando las dos ecuaciones llegamos a,

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

y multiplicando los dos miembros de la ecuación por $1/s'$, llegamos a,

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}}$$

que es la ecuación de las lentes delgadas.

Como las lentes delgadas solo son estigmáticas para rayos paraxiales, la ecuación se cumple rigurosamente únicamente en la zona paraxial.

Al igual que ocurre en los espejos, la ecuación se ha obtenido en un caso particular. Sin embargo, razonando del mismo modo puede demostrarse que es de aplicación general. Las únicas condiciones que se han de cumplir es que los rayos sean paraxiales⁸ y las lentes delgadas.

A partir de la ecuación podemos deducir la relación entre las distancias focales objeto e imagen. La figura muestra el foco objeto de una lente convergente. Al aplicar la ecuación tenemos, para un objeto puntual situado en F , que $s = f$ y $s' = \infty$ (pues los rayos refractados son paralelos, lo que significa que se cortan en el infinito, que es donde se forma la imagen); por lo tanto,

$$\frac{1}{\infty} - \frac{1}{f} = \frac{1}{f'} \Rightarrow f = -f'$$

es decir, el foco objeto está a la misma distancia del centro óptico que el imagen, pero en el lado opuesto.

8.3. Construcción de imágenes

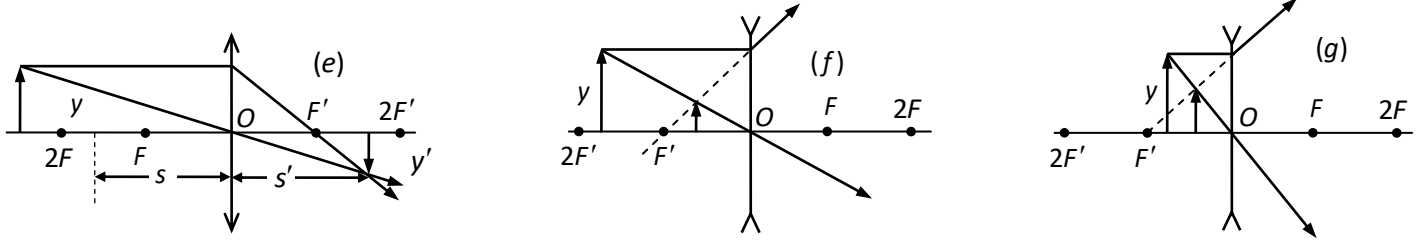
Como en los espejos, la construcción gráfica de imágenes se puede realizar dibujando al menos dos rayos. La imagen se forma en el punto en el que se cortan (ellos o sus prolongaciones) después de refractarse. Los rayos que se usan (**rayos principales**), por ser rayos de fácil trazado son los siguientes:

- Rayo paralelo al eje óptico (**paralelo**). Después de refractarse pasa (él o su prolongación) por el foco imagen.
- Rayo que pasa (él o su prolongación) por el foco objeto (**focal**). Cuando se refracta marcha paralelo al eje óptico.
- Rayo que pasa por el centro óptico (**central**). No se desvía al refractarse.

En la construcción gráfica de las imágenes vamos a distinguir entre las lentes convergentes y las divergentes:

- **Convergentes ($f' > 0$)**. Se producen las situaciones siguientes:
 - a) Objeto situado entre F y O (figura a). La imagen es virtual, derecha y mayor que el objeto. Está situada a la izquierda de O .
 - b) Objeto situado en F (figura b). Los rayos refractados marchan paralelos y la imagen, que es virtual, se forma en el infinito del espacio objeto
 - c) Objeto situado entre F y $2F$ (figura c). La imagen es real, invertida y mayor que el objeto. Está situada a la derecha de $2F'$.
 - d) Objeto situado en $2F$ (figura d). La imagen es real, invertida e igual que el objeto. Está situada en $2F'$.
 - e) Objeto situado a la izquierda de $2F$ (figura e de la pág. siguiente). La imagen es real, invertida y menor que el objeto. Está situada entre F' y $2F'$.
- **Divergentes ($f' < 0$)**. Se produce básicamente una única situación, en la que la imagen es virtual, derecha, menor y situada entre O y F' (figuras f y g).

⁸ Recuerda que un rayo es paraxial cuando el ángulo de incidencia con la normal a la superficie de la lente es pequeño. Los rayos que marchan próximos al eje óptico son paraxiales.



Observa que en las lentes las imágenes reales son invertidas y situadas a la derecha de O ; mientras que las virtuales son derechas y están a la izquierda de O . Las lentes divergentes solo crean imágenes virtuales.

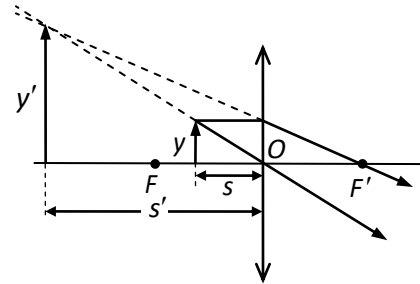
8.4. Aumento lateral

De la figura se desprende, por semejanza de triángulos, que la ecuación del aumento lateral de una lente se puede escribir como,

$$M_L = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$$

que aunque, como en el punto 8.2, se ha deducido para un caso particular, es de validez general.

Si el aumento tiene signo positivo, la imagen es virtual y los rayos divergen; mientras que si es negativo, la imagen es real y los rayos son convergentes. Esto es así porque las imágenes virtuales se forman a la izquierda de O ($s' < 0 \Rightarrow M_L > 0$); mientras que las reales lo hacen a la derecha de O ($s' > 0 \Rightarrow M_L < 0$).



8.5. Potencia

Se define la **potencia** de una lente (P) como el inverso de su distancia focal imagen. Así que,

$$P = \frac{1}{f'}$$

por lo que mide la mayor o menor convergencia de los rayos refractados: a mayor potencia, mayor convergencia de los rayos (f' menor). La potencia es positiva para lentes convergentes y negativa para lentes divergentes.

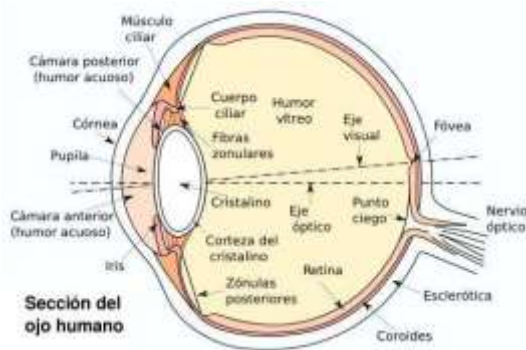
De la ecuación se deduce que la unidad de potencia en el S.I. es el m^{-1} , que recibe el nombre de **dioptría** y que se puede definir con palabras como *la potencia de una lente cuya distancia focal imagen es de un metro*.

Con frecuencia se utilizan dos o más lentes alineadas para obtener una potencia diferente. El caso más simple es el de dos lentes yuxtapuestas; es decir, tales que la distancia entre sus centros es despreciable. En este caso puede probarse que la potencia del conjunto es la suma de las potencias de cada una de las lentes,

$$P = P_1 + P_2$$

9. Defectos de la vista: corrección

9.1. El ojo humano como sistema óptico. Acomodación



El ojo humano es de forma aproximadamente esférica, como se ve en la figura. Está rodeado por una membrana exterior y resistente llamada **esclerótica**, que se hace transparente en su parte anterior y central formando la **córnea**, que es una lente convergente de curvatura relativamente pequeña con un índice de refracción de 1,38. A continuación se encuentra el **cristalino**, una lente convergente flexible que se sujeta al globo ocular mediante los **músculos ciliares**. El cristalino divide al ojo en dos partes: la anterior tiene un fluido denominado **humor acuoso** y la posterior otro más gelatinoso, el **humor vítreo**.

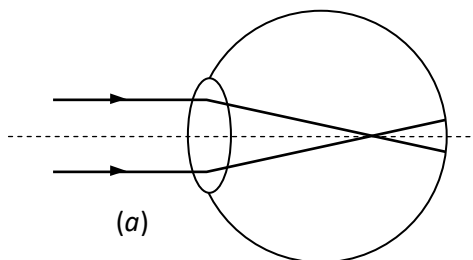
La cantidad de luz que entra en el ojo se ajusta mediante un diafragma coloreado llamado **iris**, que posee una abertura, la **pupila**, cuyo diámetro está controlado por unas fibras musculares en función de la intensidad de luz.

Los rayos de luz divergentes de un objeto llegan al cristalino, que forma una imagen real, menor e invertida sobre la **retina**, que contiene las prolongaciones del **nervio óptico**, cuya misión es transmitir las señales ópticas al cerebro.

Un ojo normal, **en estado de relajación**, se puede simplificar a efectos ópticos identificándolo con una lente convergente. La zona de la retina próxima al eje óptico se sitúa entonces alrededor del punto donde deben converger los rayos paralelos al eje óptico; es decir, del **foco imagen**. En consecuencia un ojo normal ve de forma nítida las imágenes que le llegan del infinito.

Cuando un objeto se encuentra más próximo, para que su imagen se forme en la retina actúan los músculos ciliares aumentando la curvatura del cristalino; esto es, disminuyendo su distancia focal; proceso que recibe el nombre de **acomodación**. Un ojo normal puede acomodar objetos situados hasta una distancia mínima de 25 cm, posición que se llama **punto próximo**. Por contra, el **punto remoto** es aquel que se halla a una distancia para la que el ojo no presenta acomodación; para un ojo normal se encuentra en el infinito⁹. La visión sin acomodación es más cómoda para el ojo porque el cristalino está en estado de relajación.

9.2. Miopía



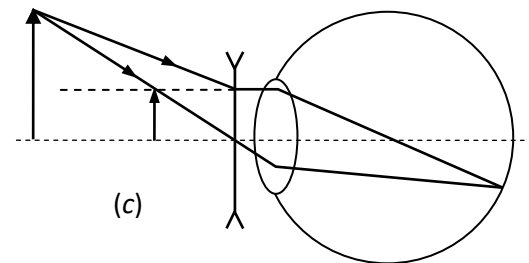
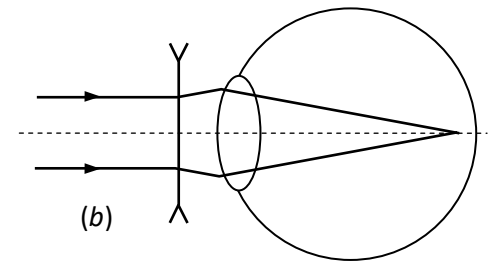
Es un defecto del ojo que se produce cuando el cristalino no enfoca sobre la retina los rayos paralelos procedentes de un objeto lejano, sino que la imagen se forma delante de la misma, como ilustra la figura a. Por consiguiente, un miope ve los objetos lejanos borrosos.

La miopía se debe a que la córnea tiene demasiada curvatura o a que el ojo tiene un diámetro mayor de lo normal. Para corregirla se usan lentes divergentes que divergen los rayos de luz lo suficiente como para que el sistema óptico córnea/cristalino pueda hacerlos converger en la retina (figura b de la página siguiente). Desde este punto de vista simple, podemos considerar a la lente como un elemento más del sistema óptico del ojo.

⁹ En realidad, para un ojo normal, puede considerarse que un objeto situado a una distancia por encima de los 13 m se encuentra en el infinito óptico.

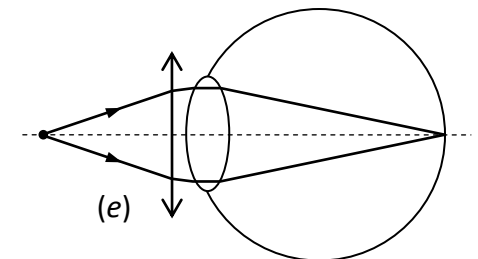
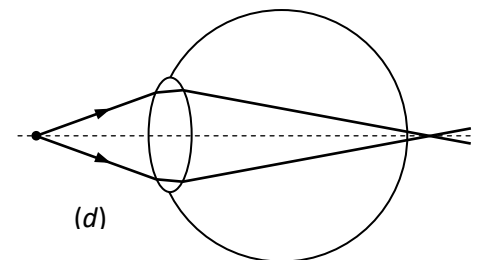
Considerando a la lente como un instrumento óptico, ésta forma una imagen (del objeto que se desea ver) virtual, derecha, menor y más cerca del ojo (figura c). Para que esta imagen, que es la que el ojo ve, sea nítida es necesario que se encuentre a una distancia del ojo igual o menor del punto remoto del ojo miope, que es la máxima distancia a la que puede enfocar correctamente.

Cuanto más cerca se encuentre el punto remoto, más próxima ha de formarse la imagen para verla de forma nítida y menor será la distancia focal de la misma, es decir, la potencia de la lente ha de ser mayor. En cada caso particular hemos de calcular la lente necesaria utilizando la fórmula de las lentes delgadas.

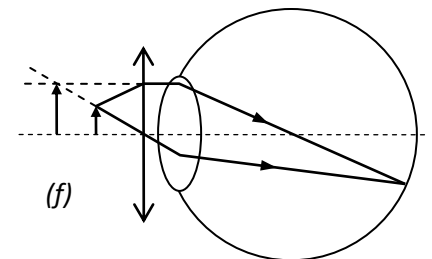


9.3. Hipermetropía

Es el defecto opuesto a la miopía. Los rayos de luz procedentes de un objeto próximo al ojo se enfocan en un punto situado detrás de la retina, como se ve en la figura d; por consiguiente, los hipermétropes ven borrosos los objetos próximos al ojo. El ojo es más corto de lo normal o la córnea demasiado plana (con poca curvatura). Para corregirla se usan lentes convergentes, que posibilitan que el sistema óptico córnea/cristalino pueda converger los rayos en la retina (figura e). Desde este punto de vista simple, podemos considerar a la lente como un elemento más del sistema óptico del ojo.



Como en el caso de la miopía, considerando a la lente como un instrumento óptico, ésta forma una imagen (del objeto que se desea ver) virtual, derecha, mayor y más lejos del ojo (figura f). Para que esta imagen, que es la que el ojo ve, sea nítida es necesario que se encuentre a una distancia del ojo igual o mayor del punto próximo del ojo hipermetrope, que es la mínima distancia a la que puede enfocar correctamente.



Cuanto más lejos se encuentre el punto próximo de la lente, a mayor distancia ha de formarse la imagen para verla de forma nítida y menor será la distancia focal de la misma; es decir, la potencia de la lente ha de ser mayor. En cada caso particular hemos de calcular la lente necesaria utilizando la fórmula de las lentes delgadas.

9.4. Presbicia

La presbicia o vista cansada se debe a la disminución del poder de acomodación del ojo. Debido a la edad, los músculos ciliares se debilitan y disminuye la flexibilidad del cristalino, alejándose el punto próximo, por lo que se ven los objetos próximos con dificultad, como en el ojo hipermetrope. Se corrige con lentes convergentes (su fundamento es idéntico al de la hipermetropía).

9.5. Astigmatismo

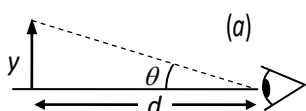
Generalmente se debe a que la córnea no es perfectamente esférica y el ojo no enfoca simultáneamente las líneas horizontales y verticales. Se corrige mediante lentes cilíndricas.

10. Otros instrumentos ópticos

El ojo humano es un órgano notablemente eficiente, pero su alcance puede aumentarse de muchas maneras mediante *instrumentos ópticos* como los **anteojos**, las **lupas**, los **telescopios** o los **microscopios**. En casi todos los instrumentos ópticos complejos modernos, las fórmulas para los espejos y las lentes delgadas sólo se cumplen aproximadamente; además, en la mayoría de ellos las lentes son del tipo compuesto; es decir, están hechas de varios componentes para minimizar los defectos producidos en las imágenes.

Muchos aparatos ópticos están diseñados para crear una imagen ampliada: queremos que algo *parezca* más grande de lo que el ojo ve sin ayuda. La ampliación lateral es una medida incompleta del tamaño aparente de una imagen. Un sistema óptico puede producir una imagen ampliada, pero si se forma lejos del ojo, pudiera ser que el observador lo viese más pequeño que el objeto real; el resultado neto no es lo que el observador llamaría una imagen ampliada.

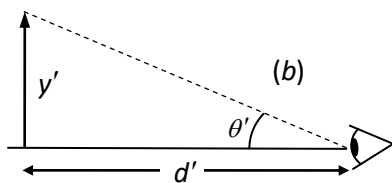
10.1. Aumento angular



La figura *a* representa la formación de una imagen en un ojo humano. El tamaño de la imagen en la retina está determinado por el ángulo θ subtendido por el objeto. Para objetos pequeños situados a distancias grandes, el ángulo θ (en radianes) puede aproximarse por,

$$\theta \simeq \tan \theta = y / -d$$

donde y es el tamaño del objeto y d su distancia desde el ojo. Puesto que $d < 0$ (pues la imagen se forma a la izquierda del ojo), el signo menos de la fórmula es necesario para que el cociente sea positivo.



En la figura *b*, el observador ve al objeto a través de un sistema óptico que forma una imagen de tamaño y' a una distancia d' del ojo. Cuando la imagen se ve a través del sistema óptico, el observador la ve mayor que el objeto original si subtien- de un ángulo θ' mayor que el subtendido por el objeto; esto es, si el cociente,

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

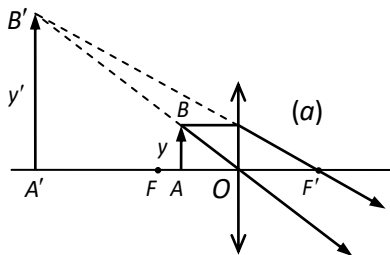
es mayor que la unidad. Por definición, *el cociente entre el ángulo subtendido por la imagen y el subtendido por el objeto es el **aumento angular*** y es el que determina si el tamaño de una imagen se ve mayor o menor que el objeto real.

En el ejemplo de las figuras *a* y *b*, $\theta' > \theta \Rightarrow M_A > 1$, lo que significa que el tamaño aparente de la imagen es mayor que el del objeto y, en consecuencia, el ojo la ve más grande; es decir, existe una sensación real de aumento del objeto.

10.2. La lupa

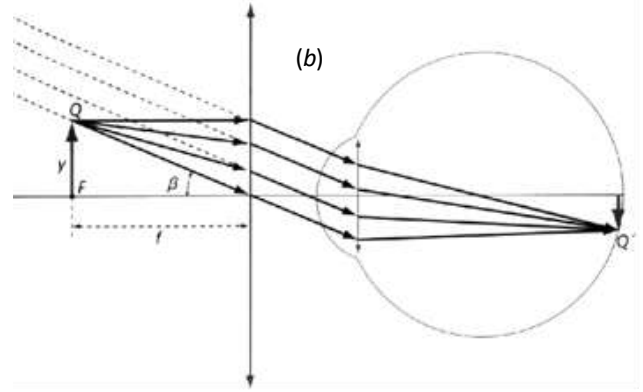
La lupa, o microscopio simple, es el más sencillo de los instrumentos ópticos, se trata de una lente convergente de pequeña distancia focal (y, por tanto, de gran potencia), como la de la figura (*a*), que se interpone entre el ojo y el objeto a observar, para aumentar el tamaño de la imagen formada en la retina.

Para que la imagen $A'B'$ formada por la lupa sea mayor que la del objeto AB , hay que colocar éste entre el foco F y el centro óptico de la lente O , como se muestra



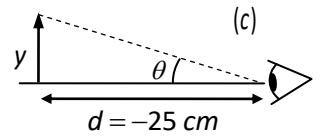
en la construcción gráfica de la figura (a). A medida que el objeto se va acercando más al foco F , la imagen aumenta de tamaño y se aleja de la lente (puedes comprobarlo colocando el objeto AB más próximo al foco y construyendo su imagen gráficamente).

El caso límite se presenta cuando el objeto se coloca en el foco. Ahora los rayos, que procedentes del objeto llegan a la lente, salen paralelos, por lo que sus prolongaciones convergen en el infinito, como se ve en la figura (b) y, por lo tanto, la imagen se forma en el infinito. Aunque resulte paradójico, también en este caso se forma una imagen real en la retina, que recibe el nombre de **imagen con visión al infinito**. Se ve en la figura que la lupa y el ojo forman un sistema óptico en el cual a cualquier punto del objeto (Q) le corresponde un punto imagen (Q') en la retina.



Deduzcamos el aumento angular de la lupa. Para que el ojo desnudo vea un objeto con el mayor tamaño posible, hemos de colocarlo en el punto próximo (25 cm para un ojo normal), como se ve en la figura (c); entonces el ángulo subtendido por el objeto, si éste es pequeño en relación a d , viene dado por,

$$\theta \simeq \tan \theta = y / -d \quad \text{donde } d = -25 \text{ cm}$$



Si colocamos al objeto delante de una lupa, como muestra la imagen (d), el ángulo subtendido por la imagen formada es,

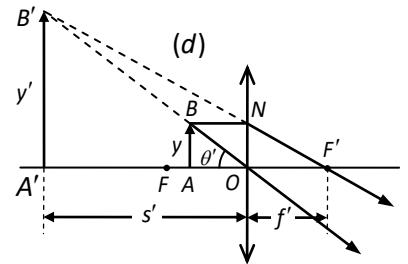
$$\theta' \simeq \tan \theta' = y' / -s'$$

así que el aumento angular es,

$$M_A = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{y' / -s'}{y / -d} = \frac{y'}{y} \frac{d}{s'}$$

Considerando los triángulos semejantes de la figura $A'B'F'$ y ONF' vemos que,

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



y por sustitución obtenemos para el aumento angular,

$$M_A = \left(\frac{-s'}{f'} + 1 \right) \frac{d}{s'} = \frac{-d}{f'} + \frac{d}{s'} = d \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{f'} \right)$$

Como d y s' son negativos, al sustituir sus valores quedan positivos los dos términos de la suma, obteniéndose aumentos visuales positivos.

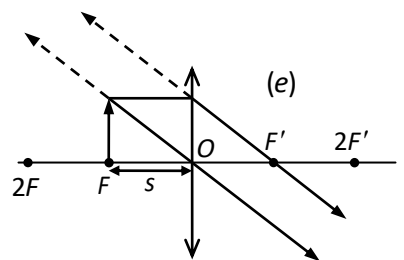
Veamos el aumento que se consigue en los dos casos más importantes:

a) Aumento con visión al infinito

Se da cuando el objeto se coloca en el foco objeto de la lupa, como se ve en las figuras (b) y (e). En este caso la imagen se forma en el infinito, por lo que $s' = \infty$; así que la ecuación del aumento angular queda como,

$$M_A = d \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{f'} \right) = d \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{f'} \right) = -\frac{d}{f'} \quad \text{donde } d = -25 \text{ cm}$$

Recordando que la potencia de una lente es $P = 1/f'$ y expresando d en metros (unidad del S.I.), se tiene que,



$$M_A = -\frac{d}{f'} = \frac{0,25}{f'} = \frac{P}{4}$$

Esto es, el aumento de una lupa con visión al infinito; es decir, sin acomodación del ojo (visión más cómoda), es la cuarta parte de su potencia en dioptrías.

Observa que para que haya un aumento real con visión al infinito, la lupa ha de tener una potencia superior a cuatro dioptrías. Por otro lado, como los rayos llegan al ojo paralelos, la posición del ojo del observador respecto a la lente es indiferente, posición que influye en los demás casos.

b) Aumento con visión en el punto próximo

Se da cuando el objeto se coloca de modo que su imagen se forma en el punto próximo, como muestra la figura. En este caso $s' = d$; así que la ecuación del aumento angular queda como,

$$M_A = d \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{f'} \right) = d \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f'} \right) = 1 - \frac{d}{f'} \quad \text{donde } d = -25 \text{ cm}$$

Usando $P = 1/f'$ y expresando d en metros, queda que,

$$M_A = 1 - \frac{d}{f'} = 1 + \frac{0,25}{f'} = 1 + \frac{P}{4}$$

Observa que en estas condiciones *cualquier lente convergente* permite un aumento real. Además el aumento con visión en el punto próximo es el mayor que se puede conseguir porque la imagen se forma a la *mínima distancia de visión del observador*.

El aumento de una lupa con visión en el punto próximo cuando el ojo está prácticamente pegado a la lente recibe el nombre de **aumento comercial**.

Es importante destacar que, como se ve en la figura, los ángulos subtendidos por el objeto y la imagen formada por la lupa son iguales. Entonces, ¿por qué se tiene una sensación de aumento?

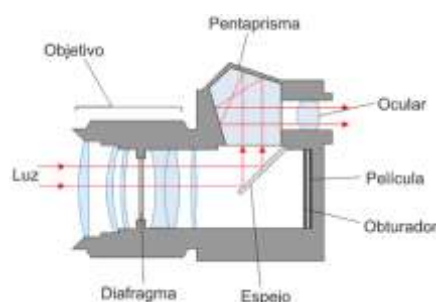
La clave está en la distancia del objeto a la lente. Ésta es siempre menor de 25 cm, por lo que si tenemos el ojo pegado a la lente y retiramos ésta, veremos el objeto igual de grande pero borroso. Al colocar la lente se ve la imagen *nítida* del mismo tamaño que el objeto porque está en el punto próximo o más allá.

10.3. La cámara fotográfica

La **cámara fotográfica** es un dispositivo tecnológico que tiene como objetivo recoger imágenes quietas de los objetos que se fotografían.

En su versión más simplificada, una cámara consta, como se ve en la figura, de los siguientes elementos:

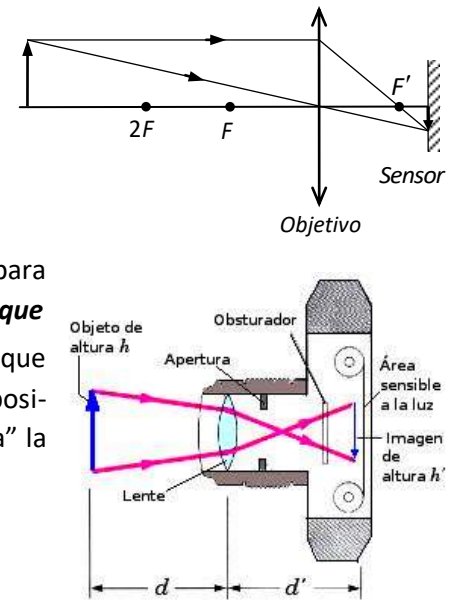
- Una lente convergente (en realidad un conjunto de lentes) denominado **objetivo de la cámara**.
- Un **diafragma** o **iris** de abertura variable, que regula el diámetro del objetivo y, por lo tanto, la cantidad de luz que recoge.
- Un **obturador** cuya velocidad de apertura o cierre determina el tiempo durante el que entra la luz.
- Un **sensor fotográfico** donde se forma y se procesa la imagen.



Las figuras muestran la disposición de la lente y del sensor y la marcha de rayos en una cámara fotográfica. El conjunto de lentes de la cámara actúa como una lente convergente; como la distancia del objeto fotografiado a la lente es siempre mayor que dos veces su distancia focal, la imagen que se forma en el sensor es real, invertida y menor.

Los objetivos de las cámaras son de distancia focal fija, lo que implica que, al variar la distancia objeto/lente, hay que modificar la distancia lente/sensor para que la imagen se forme nítidamente en el sensor; operación denominada **enfoque**.

En las cámaras analógicas (las antiguas) el sensor es una **película fotográfica** que debe someterse a un proceso de **revelado**. En las digitales el sensor es un dispositivo cuyo funcionamiento se basa en el **efecto fotoeléctrico**¹⁰ y que “almacena” la imagen como un conjunto de ceros y unos en una memoria.



10.4. El microscopio compuesto

El **microscopio compuesto**, o simplemente **microscopio**, está formado por dos lentes convergentes (en realidad, sistemas de lentes): el **objetivo**, la más próxima al objeto, de distancia focal pequeña, y el **ocular**, la más próxima al ojo (prácticamente pegada a él), de distancia focal mayor.

En la figura se aprecia la disposición de las lentes en un microscopio. El objetivo forma, del objeto AB , una imagen $A'B'$ real, invertida y mayor porque el objeto está colocado entre F_{ob} y $2F_{ob}$. Esta imagen intermedia se forma cerca del foco objeto del ocular F_{oc} y actúa como objeto de esta lente, que hace las veces de lupa, obteniendo una imagen $A''B''$ ampliada de la imagen intermedia $A'B'$. La imagen final $A''B''$ es, como se ve en la figura, mayor, invertida y virtual.

Si movemos el ocular de modo que la imagen intermedia $A'B'$ se forme en el foco de éste (ver figura inferior), entonces, como hemos visto en la lupa, la imagen del ocular $A''B''$ se forma en el infinito, por lo que la observación es más cómoda (visión sin acomodación del ojo). Vamos a obtener el aumento angular del microscopio en este caso; es decir, con visión al infinito.

El aumento lateral del objetivo es,

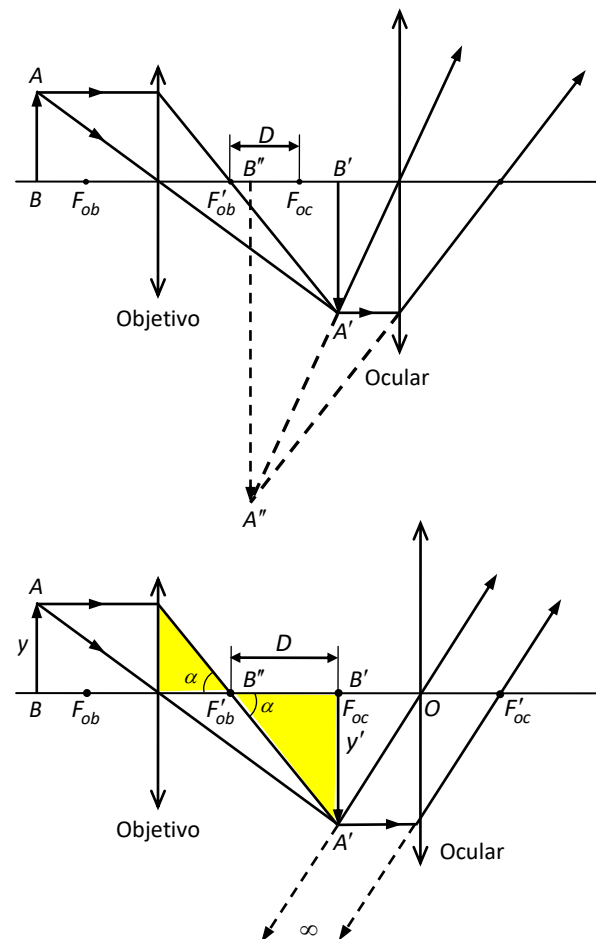
$$M_{ob} = y'/y$$

pero por semejanza de triángulos (ver figura), tenemos que,

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{-y'}{D} = \frac{y}{f'_{ob}} \Rightarrow M_{ob} = \frac{y'}{y} = -\frac{D}{f'_{ob}}$$

lo que significa que si colocáramos el objeto AB y la imagen $A'B'$ a la misma distancia del ojo, veríamos la imagen invertida y con un tamaño M_{ob} veces mayor que el objeto.

La imagen aumentada del objetivo es ahora el objeto para el ocular. Y como la



¹⁰ La superficie limpia de algunos metales desprende electrones cuando es iluminada con luz visible, lo que recibe el nombre de **efecto fotoeléctrico**. La cantidad de electrones irradiados y la energía cinética de los mismos depende, respectivamente, de la intensidad y de la frecuencia de la luz.

imagen se forma en el foco del ocular, éste actúa como una lupa con visión al infinito proporcionando un aumento angular de la imagen,

$$M_{A,oc} = \frac{-d}{f'_{oc}}$$

Puesto que la imagen es M_{ob} veces mayor que el objeto, la amplificación final del microscopio es el producto del aumento lateral del objetivo y el aumento angular del ocular; es decir,

$$M_A = M_{ob} M_{A,oc} \Rightarrow M_A = \frac{D}{f'_{ob}} \frac{d}{f'_{oc}} = -\frac{D}{f'_{ob}} \frac{0,25}{f'_{oc}} \quad (\text{en unidades del S.I.})$$

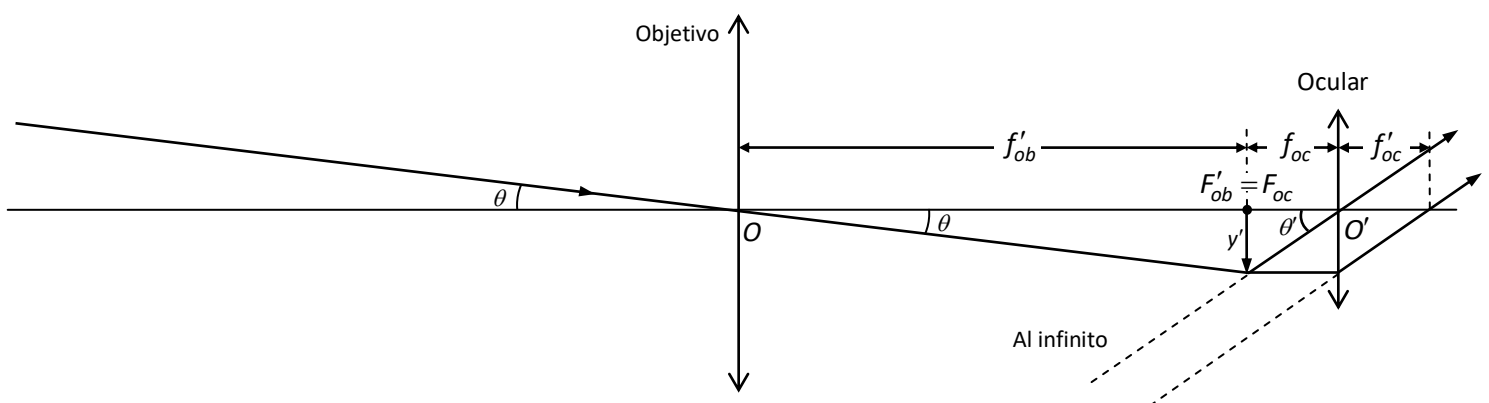
indicando el signo una imagen final invertida.

Valores típicos de un microscopio son: $D=160\text{ mm}$, $f'_{ob}=+2\text{ mm}$ y $f'_{oc}=+8\text{ mm}$, lo que da 2.500 aumentos.

10.5. El telescopio

Se utiliza para observar objetos muy alejados (prácticamente en el infinito). Su sistema óptico es semejante al del microscopio, aunque con un intervalo óptico nulo (el foco imagen del objetivo y el foco objeto del ocular están en el mismo punto). Como el objeto se encuentra muy alejado, la imagen se forma en el foco imagen del objetivo y esta imagen es el objeto del ocular

Como se muestra en la figura, al estar el objeto muy lejano, los rayos procedentes de éste llegan prácticamente paralelos al objetivo, que es una lente de gran distancia focal. La imagen (real, invertida y menor) se forma en el foco imagen del objetivo (que coincide con el foco objeto del ocular) y actúa como objeto para el ocular. Como la distancia focal del ocular es muy pequeña, actúa como una potente lupa de un “objeto” que, aunque muy pequeño, está muy cerca de la lente, por lo que el aumento angular es muy grande. El ocular forma la imagen en el infinito lo que hace la visión del objeto sea cómoda.



θ es el ángulo subtendido por el objeto. Este ángulo ha sido deliberadamente exagerado para que la imagen del objetivo pueda verse en la figura. En la práctica este ángulo es muy pequeño.

Al estar el objeto muy alejado (ver figura) podemos despreciar la distancia entre el objetivo y el ocular frente a la distancia del objeto al telescopio. Esto significa que el ángulo θ subtendido por el objeto respecto al punto O es prácticamente

el mismo que el subtendido respecto a O' , que es donde está el ojo. De la figura, por semejanza de triángulos, se deduce que,

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{y}{-s} = \frac{-y'}{f'_{ob}}$$

Por otro lado, el ángulo θ' subtendido por la imagen respecto a O' es,

$$\left. \begin{aligned} -\theta' &\approx -\tan \theta' = -y'/-f'_{oc} = y'/f'_{oc} \\ f'_{oc} &= -f'_{oc} \end{aligned} \right\} \Rightarrow -\theta' = \frac{y'}{-f'_{oc}} \Rightarrow \theta' = \frac{y'}{f'_{oc}}$$

donde el signo menos de θ' se debe a que, de acuerdo con el criterio de signos, es negativo. Por lo tanto, el aumento angular del telescopio es,

$$M_A = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{y'/f'_{oc}}{-y'/f'_{ob}} \Rightarrow \boxed{M_A = -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}}}$$

indicando el signo menos que la imagen obtenida es invertida. Parámetros típicos de un telescopio son: $f'_{ob} = 2000 \text{ mm}$; $f'_{oc} = 20 \text{ mm}$, lo que da 100 aumentos.

En general, cuanto mayor es el aumento, menor es la luminosidad de la imagen (la iluminación del objeto debe repartirse en una superficie mayor en la imagen). Este es el motivo por el que el objeto a observar en un telescopio debe estar fuertemente iluminado; por la misma razón, cuando con el telescopio se desea observar objetos lejanos, que no es posible iluminar, hay que recurrir a otra solución: aumentar el radio del objetivo, con lo que se aumenta la cantidad de luz que recoge el instrumento. Los telescopios, prismáticos, etc., tienen objetivos relativamente grandes; sin embargo, esto tiene un límite, ya que, al aumentar el diámetro, aumenta el peso del instrumento (y, además, surgen otros problemas tales como las aberraciones).

Para evitar el problema de la luminosidad de la imagen, en los telescopios dedicados a la observación de los objetos celestes se han sustituido las lentes por espejos, más ligeros y de más fácil construcción (se construyen por piezas, aunque su ensablaje entraña cierta dificultad). Estos telescopios se denominan **reflectores**, mientras que los constituidos por lentes son **refractores**.

Los telescopios reflectores utilizados para explorar el Universo utilizan espejos parabólicos para evitar la aberración esférica. Uno de los mayores es el Keck, que se encuentra en la cima del volcán Mauna Kea en la isla de Hawai; tiene un espejo de 9,8 m de diámetro.

10.6. Aberraciones

Las imágenes que forman los sistemas ópticos (especialmente las lentes, pero también los espejos) presentan ciertas modificaciones que se denominan **aberraciones**, que no son debidas a defectos en su construcción ni a deficiencias en sus materiales, sino que son resultado de la refracción y de la reflexión de la luz en ellas. En general, en el caso de las lentes, para minimizarlas, en lugar de utilizar una sola se emplean sistemas de varias lentes. Las aberraciones se clasifican en **cromáticas** y **geométricas**.

Las cromáticas sólo afectan a las lentes y se deben a que los diferentes colores que componen la luz blanca tienen un índice de refracción diferente en el material de la lente, por lo que, al atravesarla, se separan y, como consecuencia de ello, la

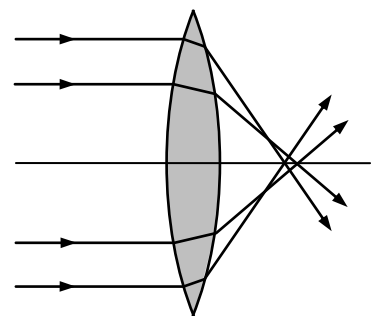
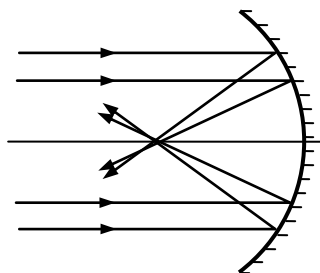


imagen de un punto es un pequeño círculo que puede aparecer de color diferente al del objeto. Este fenómeno se denomina *dispersión* y se va a tratar en el siguiente punto.



Las aberraciones geométricas son un efecto de la forma esférica de lentes y espejos. Los rayos incidentes no paraxiales paralelos al eje principal, una vez refractados o reflejados, *no se cortan en un punto* (ellos o sus prolongaciones) sino en un pequeño círculo, como muestran las figuras; extendiendo el fenómeno a todo el objeto y dando lugar a imágenes menos nítidas. Por otro lado, las imágenes de objetos que se encuentran en un determinado plano no se forman en otro plano, sino que lo hacen en una superficie curvada produciéndose una distorsión de la misma. Un ejemplo característico de ello son las imágenes observadas en los espejos convexos que se colocan en los supermercados y en las esquinas de algunas calles.

11. Prisma óptico. Dispersión. Espectro visible. Color de los cuerpos

11.1. Prisma óptico

Se llama así a todo medio transparente limitado por dos superficies planas no paralelas. El ángulo que forman las dos superficies es el **ángulo del prisma** (α).

La marcha de un rayo de luz que incide en un prisma óptico por una de sus caras se puede seguir en la figura. El rayo incidente se refracta en la primera cara del prisma acercándose a la normal (porque pasa a un medio más refringente) y vuelve a refractarse en la segunda cara alejándose de la normal (porque pasa a un medio menos refringente).

El **ángulo de desviación** (δ) que experimenta el rayo luminoso es el formado por las prolongaciones del rayo incidente y del emergente (ver figura).

En el caso de que el ángulo del prisma $\alpha = 90^\circ$ y el material sea vidrio corriente, tenemos un prisma de *reflexión total* ya que si un rayo de luz incide perpendicular a cualquiera de sus caras se produce una reflexión total, como se ha explicado en el punto 5.2.

En la figura se ve que las dos perpendiculares a las caras del prisma, N_1 y N_2 , se cortan en el punto C, formando un ángulo igual al del prisma α , por ser ángulos comprendidos entre líneas perpendiculares. Este ángulo, ver figura, es uno de los exteriores¹¹ del triángulo ABC; por lo tanto, igual a la suma de los dos ángulos internos no adyacentes del triángulo,

$$\alpha = \hat{r} + \hat{i}'$$

El ángulo δ es uno de los exteriores del triángulo ABD, por lo que,

$$\delta = \varphi + \theta$$

además, en la figura se cumplen las siguientes igualdades,

$$\hat{i} = \varphi + \hat{r} \Rightarrow \varphi = \hat{i} - \hat{r} \quad \text{y} \quad \hat{e} = \theta + \hat{i}' \Rightarrow \theta = \hat{e} - \hat{i}'$$

y como $\delta = \varphi + \theta$ resulta,

¹¹Un ángulo exterior es el formado por uno de los lados del triángulo y la prolongación de otro y es igual a la suma de los dos ángulos no adyacentes del triángulo.

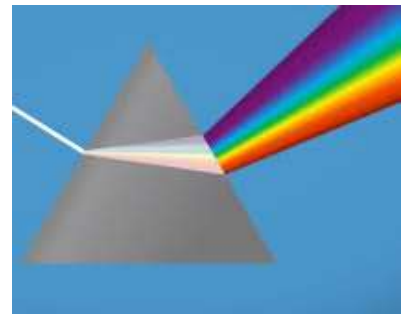
$$\delta = (\hat{i} - \hat{r}) + (\hat{e} - \hat{i}') = \hat{i} + \hat{e} - (\hat{r} + \hat{i}') \Rightarrow \boxed{\delta = \hat{i} + \hat{e} - \alpha}$$

que relaciona el ángulo desviación con los ángulos de incidencia, emergencia y desviación.

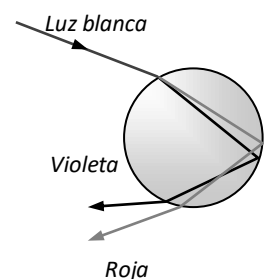
11.2. Dispersión de la luz

Se sabe que el índice de refracción de un material depende de la longitud de onda; de modo que, al aumentar la longitud de onda, disminuye el índice de refracción ($\uparrow \lambda \Rightarrow \downarrow n$). Por lo tanto, la luz con mayor longitud de onda (rojo) se refracta menos y la que tiene menor longitud de onda (violeta) lo hace más.

Así, cuando un haz luminoso formado por distintas longitudes de onda atraviesa un medio material, aparece el fenómeno de la **dispersión**, que consiste en *la separación de la luz incidente al atravesar el medio material en las distintas luces elementales caracterizadas por su respectiva longitud de onda*. El único medio no dispersivo es el vacío, aunque también pueden considerarse como tal los gases a bajas presiones.



La luz blanca es un conglomerado de luces de distintos colores simples, cada una con una frecuencia característica, denominadas **monocromáticas**. Por ello, la dispersión de la luz cuando atraviesa un medio transparente recibe el nombre de **dispersión cromática**. La forma más sencilla de producirla es mediante un prisma óptico, como ilustra la figura superior. Al incidir un haz de luz blanca sobre un prisma nos encontramos que, a la salida, dicho haz experimenta la desviación por efecto de la ley de la refracción y sufre la dispersión. En consecuencia, la luz incidente se separa en luces simples de diferentes colores, ya que éstas no se propagan dentro del prisma con la misma velocidad, y emergen del mismo con distinto ángulo de refracción.



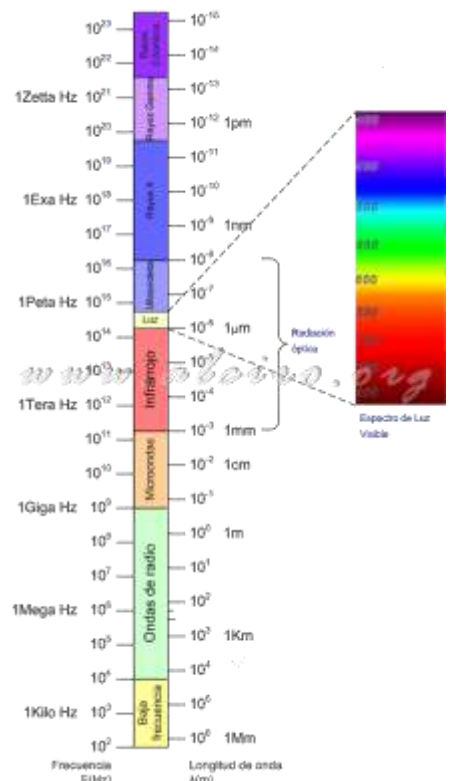
La formación del arco iris es el ejemplo más familiar de la dispersión. Se forma al refractarse la luz solar en las gotas de lluvia. Al llegar un rayo de luz a una gota de agua, sufre una doble refracción y una reflexión, descomponiéndose en los distintos colores como se ve en la figura intermedia.

Los instrumentos que, como el prisma óptico, permiten separar las distintas radiaciones monocromáticas de un haz de luz se denominan **espectroscopios o espectrómetros**; si además son capaces de registrar el espectro obtenido, mediante una fotografía, por ejemplo, se llaman **espectrógrafos**.

11.3. Espectro visible

De todo el espectro electromagnético, la luz visible ocupa una estrecha banda que se extiende desde los 380 a los 780 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), como se refleja en la figura inferior. Únicamente las ondas electromagnéticas que se hallan comprendidas entre esos dos valores son detectadas por el ojo humano, dando lugar a sensaciones visuales.

Como ya hemos visto, al hacer pasar la luz solar o la procedente de una lámpara incandescente (luz blanca) por un prisma, se obtiene una imagen visual del **espectro de la luz visible**, que es el conjunto de luces que aparecen en el haz



dispersado. Éste aparece a los ojos humanos como una gama de colores, que va desde el rojo, la radiación de menor longitud de onda, al violeta, la de mayor longitud, pasando por el naranja, el amarillo, el verde, el azul y el añil: *los colores del arco iris*.

La luz blanca es pues es una combinación de ondas de diferentes frecuencias en proporciones determinadas, que son las responsables de los siete colores en los que se dispersa. Si se modifican estas proporciones, por ejemplo, si se introduce un exceso de luz roja, la luz dejará de ser blanca y tendrá un tono más rojo.

11.4. Color de los cuerpos

El color no es una propiedad intrínseca de los objetos, ya que depende de la luz que emiten, reflejan o transmiten y que, posteriormente, alcanzan la retina del ojo. El color percibido de un objeto se configura a partir de la mezcla que se produce en el ojo de las radiaciones que le llegan de dicho objeto.

Un objeto iluminado absorbe unas frecuencias de luz y transmite otras, y son éstas últimas la que determinar el color que percibimos del mismo. Por ejemplo, si un objeto es rojo al ser iluminado con luz blanca es porque, en mayor o menor medida, absorbe todos los colores excepto el rojo; por ello, si lo iluminamos con una luz que no contiene el rojo se verá de color negro.

Un cuerpo que absorbe toda la luz que le llega se verá de color negro. Si refleja toda la luz que le llega, se verá del mismo color que el de la luz utilizada. Los cuerpos que absorben parcialmente todas las frecuencias que le llegan tiene color gris, tanto más oscuro cuanto mayor es la absorción. Un cuerpo transparente se ve de un color particular porque solo transmite ese color; por ejemplo, un vidrio se ve azul porque absorbe total o parcialmente todos los colores menos el azul.

Se llaman **colores aditivos primarios** a los que no se pueden obtener mediante la mezcla de otros colores.

La teoría clásica del color considera colores aditivos primarios el rojo (R), el verde (V) y el azul (A), como se ve en la figura. Se basa en la existencia en la retina humana de tres tipos de células receptoras, denominadas **conos**, sensibles, respectivamente, a las frecuencias de los colores rojo, verde y azul. Los demás colores se obtienen combinando en distintas proporciones los primarios.

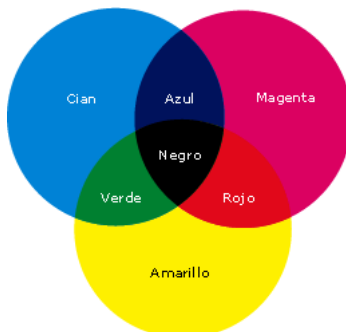
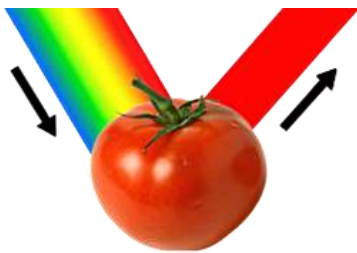
La **combinación simple** de los colores aditivos primarios da lugar a los **colores aditivos secundarios**, como ilustra la figura. Las distintas combinaciones son:

- Amarillo (*am*): $V + R$.
- Magenta (*mg*): $R + A$.
- Cian (*ci*): $V + A$.

Los cuerpos iluminados que absorben todas las radiaciones del espectro visible se ven negros bajo cualquier luz. Los cuerpos que no absorben ninguna radiación se perciben como blancos cuando se iluminan con luz blanca.

En las pantallas de TV y en los monitores en general se utilizan el rojo, el verde y el azul como colores primarios. A partir de la mezcla de los mismos, en las proporciones adecuadas, se obtienen todos los demás colores.

Para pigmentos y pinturas (lo que incluye a los cartuchos de tinta de las impresoras) tienen especial importancia los colores aditivos secundarios, que también se



denominan **colores sustractivos primarios** porque absorben a los colores aditivos primarios de acuerdo con las siguientes combinaciones:

- El amarillo absorbe al azul.
- El magenta absorbe al verde.
- El cian absorbe al rojo.

De este modo, por ejemplo, si pintamos una superficie de color amarillo, la vemos de color amarillo porque refleja solo el amarillo o el verde y el rojo, cuya combinación (ver figura superior) la percibimos como amarillo. Ahora bien, si refleja el verde y el rojo y la luz que ilumina la superficie no contiene el color verde, la percibiremos como roja.

La retina, además de los conos, contiene otras células receptoras de luz denominadas **bastones**, que son mucho más sensibles a la luz que los conos, pero que no son capaces de percibir los colores; es decir, visualizan las imágenes en blanco y negro. Durante la noche, por ejemplo, la poca intensidad de luz es detectada por los bastones, pero no por los conos. Esta es la causa por la que percibimos la luz del Sol reflejada por la Luna como blanca y no podemos distinguir los colores de los cuerpos durante la noche.

	FÓRMULAS SELECTIVIDAD	UTILIZACIÓN
	Índice de refracción de un material (n): • Absoluto: $n = c/v$ • Relativo: $n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} \Rightarrow n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2}$	• Ec. 1ª: definición de n en función de las velocidades de la luz en el vacío (c) y en el medio (v). • Ec. 2ª: definición de $n_{2,1}$ en función de n_2 y n_1. Permite hallar de $n_{2,1}$ en función de v_2 y v_1.
	Leyes de la reflexión y refracción: • Reflexión: $\hat{i} = \hat{r}$ • Refracción: $n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{r}$	• $\hat{i}$: es siempre el ángulo de incidencia. • $\hat{r}$: representa el ángulo de reflexión o de refracción. • En la refracción n_1 y n_2 son los índices de refracción del medio 1 (del que viene la luz) y del 2 (al que se dirige la luz).
	Ángulo límite y reflexión total: $n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \sin \hat{i} = \frac{n_2}{n_1}$	• Ec que, cuando la luz pasa de un medio más refringente (n_1) a otro menos refringente (n_2), permite obtener el ángulo límite ($\hat{l}$) de la refracción. Si $\hat{i} > \hat{l} \Rightarrow$ reflexión • Observa que esto solo es posible si $n_2 < n_1$.
	Parámetros asociados a las lentes. (ver figura)	• Eje óptico: el eje de simetría de la lente. • Centro óptico (O); focos objeto (F) e imagen (F'). • Distancia focal objeto (f): distancia de F a O. • Distancia focal imagen (f'): distancia de F' a O. • Posiciones objeto (s) e imagen (s'). • Alturas objeto (y) e imagen (y')
	Rayos principales necesarios para resolver problemas lentes gráficamente. Solo hay que dibujar dos rayos para resolver gráficamente un problema (ver figura).	• Paralelo: paralelo al eje óptico. Después de refractarse pasa (él o su prolongación) por F'. • Focal: pasa (él o su prolongación) por F. Cuando se refracta marcha paralelo al eje óptico. • Central: pasa por O. No se desvía al refractarse.
Convergente	Imágenes formadas por lentes convergentes	Posición del objeto: • Entre F y O: virtual, derecha y mayor. • En F: virtual, derecha e infinita. • Entre F y $2F$: real, invertida y mayor. • Entre $2F$ e infinito: real, invertida y menor.
Divergente	Imágenes formadas por lentes divergentes	• Solo forman imágenes virtuales, derechas y menores que el objeto. Están situadas a la izquierda de O.
	Fórmulas lentes delgadas: • Ec. fundamental: $\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$ • Aumento lateral: $M_L = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$	• Solas o combinadas permiten resolver analíticamente los problemas de formación de imágenes. • Si no conocemos y' ni s' pero sí la relación y'/y, podemos obtener s, s' ó f' si conocemos dos de ellos. • $f' > 0$ en lentes convergentes y $f' < 0$ en divergentes.
	Potencia de una lente: $P = 1/f'$ Lentes yuxtapuestas: $P = P_1 + P_2$	• La potencia permite hallar f' con su signo, lo que indica si la lente es convergente o divergente. • Su unidad es la dioptría (D) $\rightarrow 1 D = 1 m^{-1}$
	Aumento angular (M_A) lupa: • Visión infinito: $M_A = P/4$ • Visión punto próximo: $M_A = 1 + P/4$	• Para hallar el aumento angular con visión al infinito y al punto próximo en función de la potencia. • Nota que el aumento con visión al punto próximo es mayor.
Marcha rayos microscopio:	Marcha rayos telescopio (visión infinito)	
	Marcha rayos cámara fotográfica:	