

TEMA 6.- Óptica

ÍNDICE GENERAL

1.- Óptica física: la luz.

1.1.- Naturaleza de la luz.

1.1.1.- Teoría corpuscular.

1.1.2.- Teoría ondulatoria.

1.1.3.- Naturaleza doble o dual de la luz.

1.2.- Propagación de la luz: principio de Fermat. Fenómenos luminosos.

1.2.1.- Velocidad de la luz.

1.2.1.1.- Velocidad de la luz en el vacío.

1.2.1.2.- Índice de refracción.

1.2.2.- Reflexión de la luz.

1.2.3.- Refracción de la luz. Ángulo límite y reflexión total.

1.2.3.1.- Dispersión de la luz. Prisma óptico. Espectroscopía.

1.2.4.- Interferencia, difracción, polarización y absorción de la luz.

2.- Óptica geométrica.

2.1.- Conceptos básicos y convenio de signos.

2.2.- Dioptrios esférico y plano: distancias focales e imágenes.

2.3.- Espejos plano y esférico.

2.4.- Lentes delgadas.

2.4.1.- Concepto y tipos.

2.4.2.- AMPLIACIÓN: Potencia de una lente.

2.4.3.- Construcción de imágenes.

2.4.4.- Sistemas ópticos.

2.5.- AMPLIACIÓN: El ojo humano.

A partir de las propiedades de la luz podemos entender multitud de fenómenos, tales como el color azul del cielo o la propagación del arco iris, así como estudiar sus múltiples aplicaciones, tales como la fibra óptica. La **Óptica** es la parte de la Física que estudia el comportamiento de la luz, es decir, su naturaleza, propagación y fenómenos relacionados con ella. Ahora bien, este estudio puede llevarse a cabo desde 2 puntos de vista diferentes:

- La **Óptica Física** estudia la luz atendiendo a sus propiedades ondulatorias.
- La **Óptica Geométrica** estudia la luz considerando que ésta se comporta como un rayo, es decir, sin entrar en consideraciones sobre su carácter electromagnético o corpuscular.

1.- ÓPTICA FÍSICA: LA LUZ.

1.1.- NATURALEZA DE LA LUZ.

Aunque la luz ha sido estudiada desde la Antigüedad, no fue hasta el siglo XVII en que se postularon algunas teorías para explicar su naturaleza y propiedades. Las dos principales teorías acerca de la naturaleza de la luz, la corpuscular y la ondulatoria, permanecieron enfrentadas hasta la llegada de la Física Moderna a principios del siglo XX.

1.1.1.- TEORÍA CORPUSCULAR.

Los orígenes de esta teoría se deben a Descartes (1637) y Newton (1671), quienes consideraron que la luz debía estar formada por corpúsculos luminosos, los cuales, al chocar con la retina del ojo, producían la visión, y que se propagaban en línea recta gracias a su pequeña masa y elevada velocidad. Por otra parte, no todos los corpúsculos tenían la misma masa: las distintas masas explicaban los distintos colores de la luz.



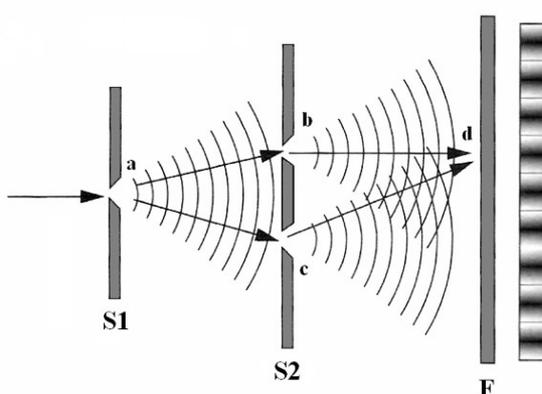
Esta teoría tuvo un gran éxito, pues explicaba la mayoría de los fenómenos luminosos conocidos: propagación rectilínea, formación de sombras bien definidas, fenómenos de reflexión y refracción, existencia de distintos colores, etc. Sin embargo, no era capaz de explicar otros fenómenos, tales como por qué algunas luces se refractaban más que otras o por qué se producían las interferencias.

1.1.2.- TEORÍA ONDULATORIA.

Para intentar explicar estos fenómenos, el físico holandés *Christian Huygens* publica en 1690 un libro en el que afirma que la luz tiene naturaleza ondulatoria, de manera que está formada por minúsculas ondas semejantes a las ondas sonoras. Ello exigía la existencia de un medio para su propagación, al que se llamó **éter lumínico**. De esta manera, la teoría ondulatoria de la luz explicaba la reflexión, la refracción y las interferencias; uno de los puntos de mayor discrepancia con Newton consistía en que, para explicar la refracción, la teoría ondulatoria suponía que la luz se propagaba a menor velocidad en el agua o en el aire, lo cual estaba en contra de la teoría corpuscular. Debido a la gran influencia de Newton, la teoría ondulatoria fue abandonada durante casi 100 años.

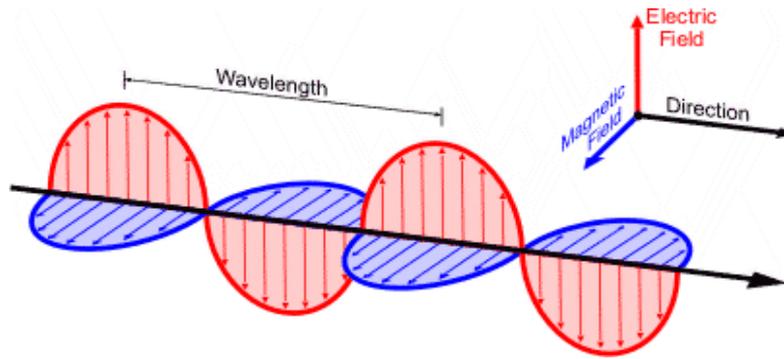


El siglo XIX va a resultar fundamental en el resurgimiento de la teoría ondulatoria. Así, en el año 1801, el físico inglés *Thomas Young* realizó un experimento para estudiar las interferencias entre ondas. De dicho experimento (ver figura a la derecha) dedujo que la luz se comportaba como una onda al observar zonas alternativas de luz y de sombra. El comportamiento ondulatorio de la luz fue corroborado por los experimentos de difracción de Fresnel en 1815. Ambos fenómenos vinieron a corroborar la teoría ondulatoria de la luz propuesta por Huygens.



Sin embargo, esta teoría presentaba un gran inconveniente: la existencia de un medio – el éter lumínico – lo suficientemente rígido como para permitir la elevada velocidad de propagación de la luz y lo suficientemente poco denso para no oponer resistencia al movimiento de los cuerpos. Esta dificultad fue definitivamente superada por el físico escocés *James Clerk Maxwell*, quien en 1865 demostró a partir de sus famosas 4 ecuaciones del Electromagnetismo que la luz era una onda electromagnética que se propaga por el vacío, sin necesidad de un soporte material, a $3 \cdot 10^8$ m/s, al igual que las restantes ondas electromagnéticas. Este importante descubrimiento supuso la unificación definitiva entre la Óptica y el Electromagnetismo.

Una **onda electromagnética** está formada por un campo eléctrico y otro magnético variables en el tiempo (su intensidad varía de forma periódica) que vibran, en fase, en planos perpendiculares entre sí y, a su vez, perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Se trata, pues, de una onda transversal polarizada:



El origen de una onda electromagnética es la aceleración u oscilación de una carga eléctrica cualquiera; dicha perturbación puede propagarse en cualquier medio, incluso por el vacío.

Las ecuaciones de los campos eléctrico y magnético son las de una onda:

$$E = E_0 \text{ sen } (\omega t - kx)$$

$$B = B_0 \text{ sen } (\omega t - kx)$$

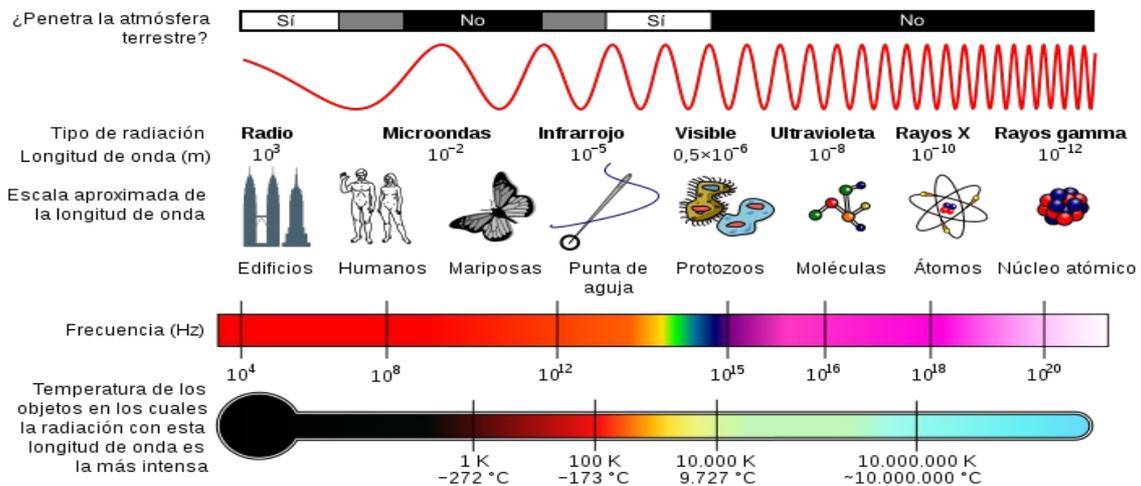
donde E_0 y B_0 son las amplitudes, respectivamente, de los campos eléctrico y magnético.

Los campos eléctrico y magnético se perturban mutuamente, es decir, una perturbación del campo eléctrico perturba el campo magnético, y viceversa. De esta manera, la perturbación global – onda electromagnética – se propaga por todo el Universo. En la misma posición y tiempo, los módulos de ambos campos están relacionados de la manera siguiente:

$$B = \frac{E}{c}$$

donde “c” es la velocidad de propagación de la onda electromagnética.

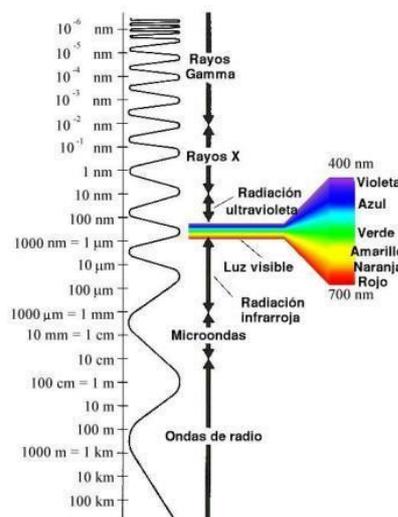
Todas las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, y se diferencian únicamente en su frecuencia y en su longitud de onda. Llamamos **espectro electromagnético** al conjunto de todas las ondas o radiaciones en que puede descomponerse la radiación electromagnética. Algunas de sus propiedades son las siguientes:



Mencionamos a continuación las características más importantes de estas radiaciones:

- **Ondas de radio:** son producidas por un circuito eléctrico oscilante de corriente alterna, y se emplean en radio y televisión.
- **Microondas:** son producidas por medio de dispositivos electrónicos, y se emplean en los microondas y en radares, así como en el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia.
- **Radiación infrarroja (IR):** son emitidas por los cuerpos calientes y se deben a vibraciones de los átomos. Se utilizan en la industria, en Medicina, en los mandos a distancia, etc. Aproximadamente, la mitad de la radiación emitida por el Sol es infrarroja.
- **Luz visible:** es la única que puede ser percibida por la retina del ojo humano; se trata de la zona más pequeña del espectro y se debe a los saltos electrónicos entre niveles de energía de los átomos. Comprende 7 colores básicos, cuya superposición da lugar a la luz blanca, y cuyas longitudes de onda son las siguientes:

COLOR	INTERVALO DE LONGITUDES DE ONDA
Rojo	6200 – 7500 Å
Naranja	5900 – 6200 Å
Amarillo	5700 – 5900 Å
Verde	4900 – 5700 Å
Azul	4600 – 4900 Å
Añil	4300 – 4600 Å
Violeta	4000 – 4300 Å



- **Radiación ultravioleta:** se produce por saltos electrónicos entre átomos y moléculas excitados. Es la que da lugar al bronceado de la piel, aunque en dosis excesivas es una radiación peligrosa. Parte de la radiación ultravioleta (UV) procedente del Sol es absorbida por la capa de ozono.
- **Rayos X:** son producidos por oscilaciones de los electrones cercanos a los núcleos de los átomos. Se utilizan en la industria y en Medicina. La exposición descontrolada a esta radiación puede ser peligrosa, pues puede causar daños irreversibles a los tejidos vivos.
- **Rayos gamma:** se producen en los fenómenos radiactivos y en reacciones nucleares. Tienen un gran poder de penetración y, por tanto, son muy peligrosos para los seres vivos. Se utilizan de forma controlada en radioterapia para destruir las células cancerígenas.

1.1.3.- NATURALEZA DOBLE DE LA LUZ.

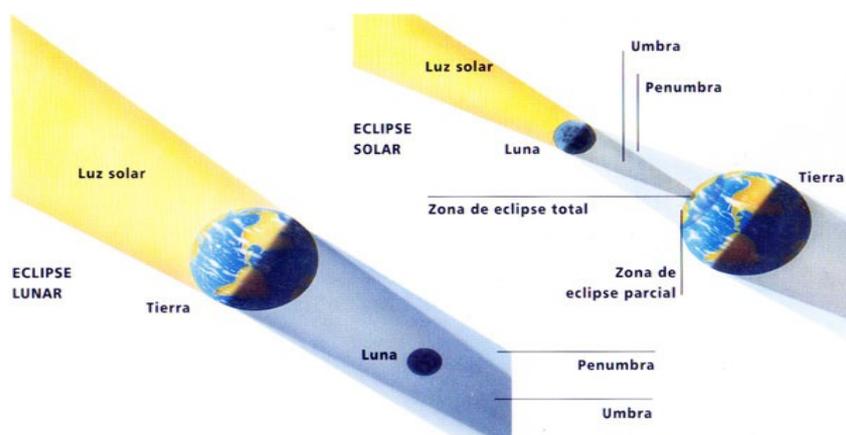
No obstante lo anterior, a principios del siglo XX se descubren nuevos fenómenos, como el efecto fotoeléctrico (que será explicado en el tema 7), que ponen de manifiesto que la luz está formada por fotones (pequeños paquetes o cuantos de energía), lo cual supone un nuevo resurgimiento de la teoría corpuscular. La energía de dichos fotones depende de la frecuencia (magnitud característica de las ondas); es por ello por lo que llegamos a la conclusión de que **la luz tiene una naturaleza doble o dual, es decir, se puede comportar bien como una onda bien como una partícula, según sea el fenómeno que tenga lugar. Sin embargo, este carácter dual nunca se manifiesta simultáneamente en un mismo fenómeno.** Así, en los fenómenos de interferencia y difracción se comporta como una onda, mientras que en todas aquellas experiencias en que la luz interactúa con la materia (efecto fotoeléctrico, efecto Compton,...) se la considera constituida por fotones.

1.2.- PROPAGACIÓN DE LA LUZ: PRINCIPIO DE FERMAT. FENÓMENOS LUMINOSOS.

Cualquier fenómeno que perciba el ojo humano parte de la base de que la luz se propaga en línea recta. A la línea recta imaginaria que describe la luz cuando se propaga en una cierta dirección y sentido, perpendicular a las direcciones de vibración de los campos eléctrico y magnético, se le llama **rayo**. Si el medio es homogéneo e isótropo (sus propiedades son las mismas en todas direcciones), la luz viajará en él con velocidad constante siguiendo la dirección de un rayo. Esto es consecuencia del **principio de Fermat** (1601-1665), el cual establece que la trayectoria seguida por un rayo de luz al propagarse de un punto a otro es siempre aquella tal que la luz tarda en recorrerla un tiempo mínimo.



La propagación rectilínea de la luz explica fenómenos tan cotidianos como la formación de sombras y penumbras, los eclipses de Sol y de Luna (ver figura siguiente), la formación de imágenes en espejos, etc.



1.2.1.- VELOCIDAD DE LA LUZ.

La velocidad de la luz es una de las constantes fundamentales de la Naturaleza, tal y como explicaremos en el tema siguiente en el apartado dedicado a la Teoría de la Relatividad. En este apartado recordaremos su valor cuando se propaga por el vacío e introduciremos el concepto de índice de refracción.

1.2.1.1.- VELOCIDAD DE LA LUZ EN EL VACÍO.

A finales del siglo XVII se consideraba que la luz se propagaba instantáneamente, es decir, que su velocidad era infinita. No obstante, algunos científicos (Roemer en 1676, Fizeau en 1849 y Foucault en 1850) idearon métodos para poder determinar su valor. Actualmente, se acepta que **la velocidad de la luz en el vacío tiene el siguiente valor:**

$$c = 2'99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

siendo este valor prácticamente igual al de la velocidad de la luz en el aire.

1.2.1.2.- ÍNDICE DE REFRACCIÓN.

Cuando la luz se propaga en un medio distinto al vacío o al aire, su valor disminuye. Al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, c , y la velocidad de la luz en un medio, v , se le llama **índice de refracción** absoluto del medio, n :

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

Como acabamos de decir, al ser siempre $v < c$, el índice de refracción siempre será mayor o igual que la unidad.

OBSERVACIONES:

1. El índice de refracción depende las propiedades físicas del medio, y su valor bajo o elevado determina algunas propiedades de los materiales transparentes (por ejemplo, el brillo de los diamantes).
2. Un medio es más refringente que otro cuando tiene mayor índice de refracción.
3. Su valor depende de la longitud de onda de la luz que atravesase un medio, pues la frecuencia de la luz cuando se propaga por un medio permanece constante. Si cambia la velocidad de propagación, entonces deberá variar la longitud de onda. En efecto:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 \cdot f}{\lambda \cdot f} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \Rightarrow \lambda < \lambda_0$$

siendo λ_0 y λ las longitudes de onda del rayo de luz en el vacío y en el medio, respectivamente.

4. El índice de refracción relativo, $n_{2,1}$ del medio 2 con respecto al medio 1 es el cociente entre los índices de refracción de los medios 2 y 1, respectivamente:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

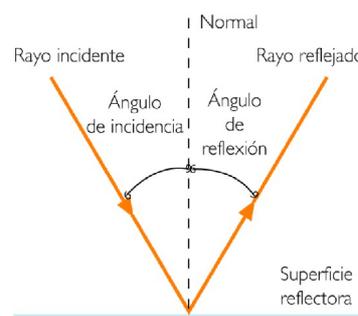
5. La luz no cambia de color al pasar de un medio a otro de diferente índice de refracción, pues aunque cambian su velocidad de propagación y longitud de onda, no varía su frecuencia, que es la que determina la energía de la onda luminosa y su color.

1.2.2.- REFLEXIÓN DE LA LUZ.

Cuando una onda luminosa llega a la superficie de separación de dos medios, parte de ella se refleja y parte se refracta, pasando al otro medio y sufriendo una cierta absorción.

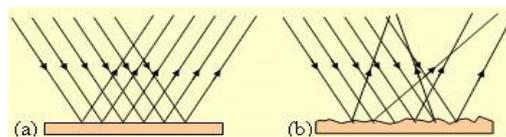
Si el rayo incidente forma un ángulo i con la normal, y el rayo reflejado forma un ángulo r con ella, entonces las leyes de Snell de la reflexión establecen que:

- El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión: $i = r$.



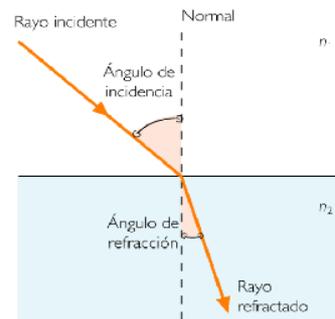
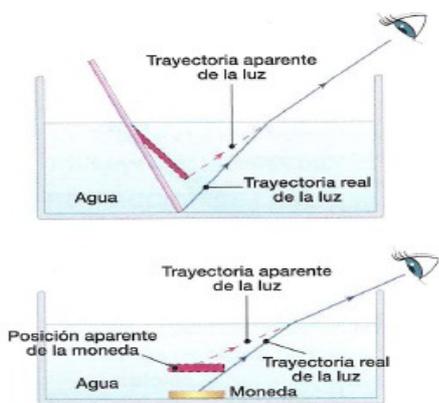
La reflexión puede ser de 2 tipos, tal y como se indica en la figura siguiente:

- a) **Reflexión regular, especular o nitida:** tiene lugar sobre una superficie pulida, de modo que todos los rayos reflejados son paralelos entre sí.
- b) **Reflexión irregular o difusa:** tiene lugar sobre una superficie rugosa, y se debe a que los rayos reflejados no tienen una dirección única. Es la más frecuente.



1.2.3.- REFRACCIÓN DE LA LUZ. ÁNGULO LÍMITE Y REFLEXIÓN TOTAL.

Es el cambio de dirección y de velocidad de un rayo de luz cuando atraviesa oblicuamente la superficie de separación de dos medios de diferente índice de refracción. Este fenómeno explica la deformación aparente de los objetos sumergidos en el agua, la profundidad aparentemente menor a la que se encuentran éstos (ver figura a la izquierda) o la aparición de los espejismos debido a la refracción atmosférica.



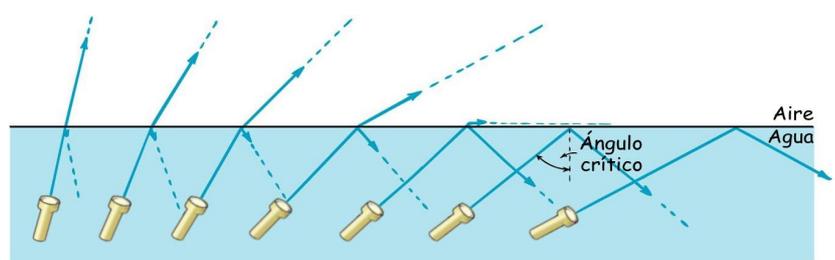
Si el rayo incidente forma un ángulo i con la normal, y el rayo refractado forma un ángulo r con ella, entonces **las leyes de Snell de la refracción** establecen que:

- El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano.
- El índice de refracción del segundo medio respecto al primero es igual al cociente entre los senos de los ángulos incidente y refractado:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } r$$

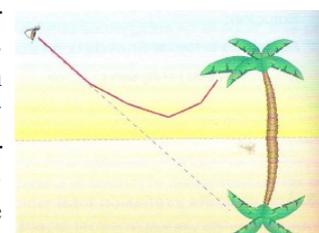
de donde se deduce que un incremento en el índice de refracción implica una disminución en el ángulo, y viceversa. Al producto entre el seno del ángulo y del correspondiente índice de refracción se le llama **invariante de refracción**.

En algunas ocasiones, cuando el ángulo de incidencia es lo suficientemente grande, el rayo luminoso que pasa de un medio a otro menos refringente ($n_2 < n_1$) puede no refractarse, **reflejándose totalmente** en la superficie de separación de ambos medios. Como el rayo refractado tiende a separarse de la normal al aumentar el ángulo de incidencia, existirá un valor máximo de éste, llamado **ángulo límite (L)**, para el cual el ángulo de refracción es igual a 90° :



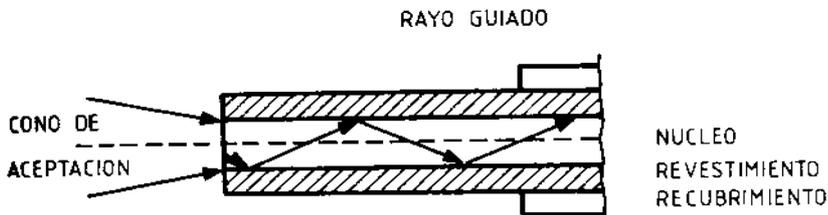
$$\frac{\text{sen } L}{\text{sen } 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \text{sen } L = \frac{n_2}{n_1}$$

Así, para ángulos de incidencia superiores al ángulo límite no se produce refracción, sino que la luz se refleja totalmente en la superficie de separación de ambos medios. A este fenómeno se le conoce con el nombre de **reflexión total**. Observar que este fenómeno no puede darse cuando el rayo luminoso pasa de un medio poco refringente a otro más refringente ($n_2 > n_1$). En la reflexión total basan su funcionamiento muchos instrumentos ópticos, como los prismáticos, los telescopios, las cámaras réflex, etc. Los **espejismos** son otro ejemplo de fenómeno de reflexión total (ver figura a la derecha); en las zonas desérticas el suelo está recalentado por el Sol, de modo que se forman capas de aire caliente en contacto con él. Estas capas tienen un índice de refracción menor que el de las capas más frías; es por ello por lo que los rayos solares experimentan sucesivamente refracciones al pasar de



una capa a otra hasta producirse la reflexión total. El ojo humano ve entonces los objetos invertidos (como reflejados en un espejo), creándose la falsa impresión de que hay agua en el suelo y que es en ella donde se reflejan los objetos.

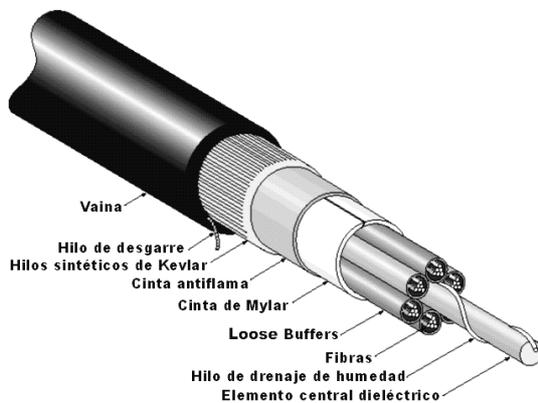
Otra de las principales aplicaciones del fenómeno de reflexión total es la **fibra óptica**, mostrada en



la figura de la izquierda. Consiste en conducir la luz (generalmente emitida por un láser), mediante reflexiones totales sucesivas, a lo largo de una varilla muy delgada de vidrio o de plástico (materiales muy resistentes a la corrosión). El núcleo de la fibra óptica suele estar fabricado de vidrio o plástico

de alto índice de refracción, y el revestimiento que lo envuelve es un material con un índice de refracción li-

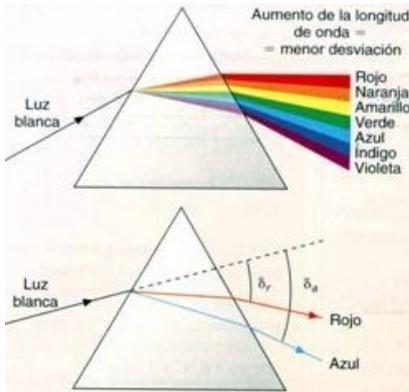
geramente menor, para así conseguir la reflexión total interna. Con estas reflexiones sucesivas se consigue que la luz viaje casi por el centro del cable, evitando pérdidas al transportarla a grandes distancias. En lugar de una única fibra, para transmitir una imagen suele utilizarse un haz de fibras muy delgadas (cuyo diámetro es de unas pocas micras), de modo que cada una de ellas transporta una parte de la imagen (ver imágenes a izquierda y derecha). Las aplicaciones de las fibras ópticas son múltiples:



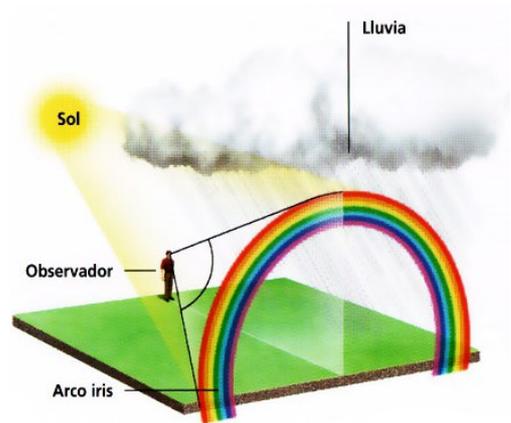
- En Medicina, se utilizan para construir endoscopios (aparatos que permiten visualizar zonas internas del cuerpo humano) y, junto con un pequeño bisturí, en cirugía (laparoscopia).
- En telecomunicaciones (telefonía, redes de comunicación entre ordenadores, etc.), la señal eléctrica se transforma en una señal luminosa (láser) que viaja a la velocidad de la luz a través de una fibra óptica. Posteriormente, dicha señal se vuelve a transformar en señal eléctrica al llegar al receptor. Así, un par de fibras puede soportar hasta 672 conversaciones simultáneas de ida y vuelta.

1.2.3.1.- DISPERSIÓN DE LA LUZ. PRISMA ÓPTICO. ESPECTROSCOPIA.

Todos sabemos que la luz blanca es la suma o superposición de las luces cuyos colores corresponden a los del arco iris. **La dispersión de la luz** (blanca) consiste en la descomposición de ésta en otras luces más simples (llamadas *luces monocromáticas*), cada una de ellas con su longitud de onda característica. Para producir la dispersión se utiliza un **prisma óptico** de vidrio (ver figura en la página siguiente). Como su índice de refracción varía según sea la longitud de onda de la luz que lo atraviesa, cuando la luz blanca pase a través de él se separarán las distintas luces de colores al desplazarse a diferente velocidad en el interior del prisma. Así, la luz roja se desplazará más lentamente (será menos desviada) mientras que la violeta es la que se desplaza a mayor velocidad (será más desviada). **El haz que emerge del prisma se llama haz dispersado, y al conjunto de luces que lo forman se le llama espectro visible.** Uno de los ejemplos más llamativos de la dispersión de la luz es la formación del arco iris al dispersarse la luz del Sol en las gotas de agua que se encuentran en el aire, siempre y cuando el Sol se encuentre por detrás del observador (ver figura en la página siguiente).



El prisma óptico es un ejemplo de espectroscopio o espectrómetro, es decir, un aparato capaz de separar una luz en las distintas radiaciones monocromáticas que la componen. Si el espectroscopio es capaz de reflejar el espectro obtenido en una placa fotográfica se le suele llamar espectrógrafo. Así, la **espectroscopía** es la ciencia

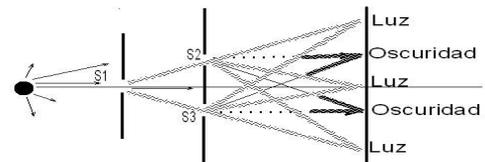


que estudia las propiedades físicas y químicas de los objetos a partir de los espectros de emisión o absorción de éstos, es decir, de los registrados cuando la muestra a estudiar emite o absorbe energía. Sabemos que los espectros de los átomos y moléculas son característicos y están formados por rayas; de su estudio se han deducido las estructuras de los átomos y moléculas de las sustancias conocidas.

1.2.4.- INTERFERENCIA, DIFRACCIÓN, POLARIZACIÓN Y ABSORCIÓN DE LA LUZ.

Lógicamente, al tratarse la luz de una onda electromagnética, sufrirá los mismos fenómenos que cualquier otra onda. Los estudiamos brevemente:

- 1) **Interferencia**: la interferencia de ondas luminosas fue llevada a cabo por Thomas Young en 1801 para demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz. Así, cuando dos ondas luminosas coherentes (igual frecuencia y longitud de onda y diferencia de fase constante entre ellas) interfieren, pueden darse 2 casos:

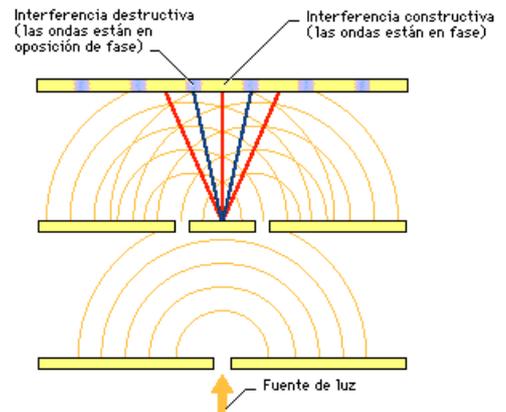


- ✓ **Interferencia constructiva**: se produce cuando las ondas llegan a un mismo punto en fase, lo cual sucede cuando la diferencia entre las distancias recorridas por ambas es un nº entero de veces la longitud de onda:

$$x_2 - x_1 = n\lambda$$

- ✓ **Interferencia destructiva**: se produce cuando las ondas llegan a un mismo punto en oposición de fase, lo cual sucede cuando la diferencia entre las distancias recorridas por ambas es un múltiplo impar de la semilongitud de onda:

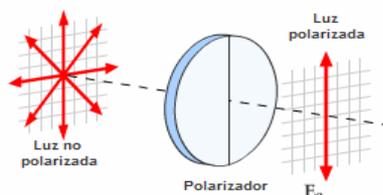
$$x_2 - x_1 = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$



- 2) **Difracción**: es un fenómeno ondulatorio que consiste en que la luz es capaz de cambiar de dirección de propagación con el fin de superar un obstáculo o una rendija que impida el avance de parte del frente de onda. Recordamos aquí que para que el fenómeno de difracción sea apreciable, el tamaño del obstáculo o rendija debe ser comparable a la longitud de onda de la luz que incide sobre él. Su explicación se basa en el principio de Huygens, según el cual los puntos del frente de onda no obstaculizados se convierten en emisores de nuevos frentes de onda, de manera que la luz puede ser

percibida en puntos no iluminados directamente por ella (o incluso parcialmente ocultos). Ejemplos de difracción son las imágenes con bordes difusos de estrellas o bombillas lejanas, los cuales se deben a la difracción que se produce en las irregularidades de la pupila del ojo. Igualmente sucede con las luces de las farolas los días nublados o húmedos, debido a la difracción de la luz en las pequeñas gotas de agua del ambiente.

- 3) **Polarización:** recordemos que el plano de polarización es el formado por la dirección de propagación y por la de vibración de la onda. En el caso de las ondas luminosas, se dice que la luz está polarizada si el campo eléctrico vibra en una sola dirección, de modo que forme un plano de polarización con la dirección de propagación. A cualquier dispositivo capaz de polarizar (fijar el plano de vibración) de la luz se le llama polarizador. Un ejemplo es la polarización de la luz solar por parte de la atmósfera. Este fenómeno es una prueba



de la naturaleza ondulatoria transversal de la luz.

- 4) **Absorción:** consiste en la pérdida de intensidad luminosa al atravesar un determinado medio debido al rozamiento con él, de acuerdo con la ecuación:

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta r}$$

donde I_0 e I son las intensidades inicial y final, β es el coeficiente de absorción del medio, y r su espesor. Generalmente, el coeficiente de absorción depende de la frecuencia, lo cual significa que el proceso de absorción puede, o no, tener lugar de forma significativa. Por ejemplo, el vidrio apenas absorbe la radiación solar, pero sin embargo apenas deja pasar la radiación infrarroja que emiten los objetos que han visto aumentada su temperatura (lo cual constituye el efecto invernadero).

2.- ÓPTICA GEOMÉTRICA.

2.1.- CONCEPTOS BÁSICOS Y CONVENIO DE SIGNOS.

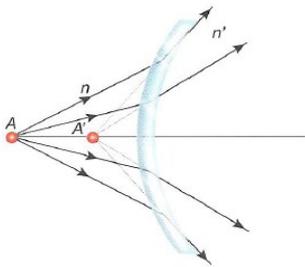
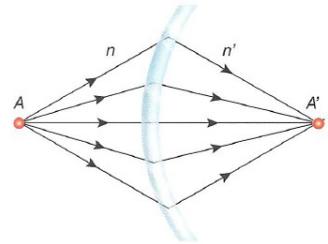
Al principio del tema comentamos que la Óptica Geométrica estudia los fenómenos luminosos ignorando el carácter corpuscular u ondulatorio de la luz, considerándola como un rayo. Las **características de los rayos luminosos** son las siguientes:

1. Los rayos tienen la dirección de propagación de la luz.
2. La luz se propaga en línea recta en los medios homogéneos e isótropos.
3. El cruce de dos o más rayos no afecta a su posterior trayectoria.
4. Los rayos cumplen las leyes de la reflexión y la refracción.
5. EL camino seguido por un rayo luminoso es independiente del sentido en que se propaga, es decir, si un rayo se desplaza de A a B por un camino, cuando se desplace de B a A describirá el mismo camino.

A continuación, definimos algunos conceptos muy empleados en Óptica Geométrica:

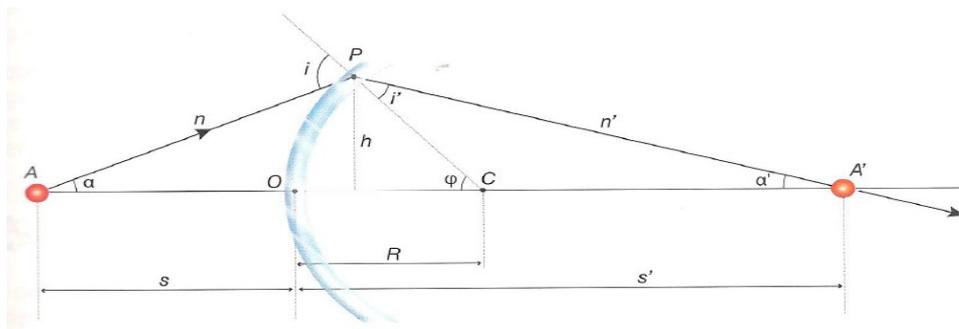
- **Dioptrio:** es el conjunto formado por dos medios transparentes, homogéneos e isótropos, con diferentes índices de refracción, separados por una superficie. Según la forma de ésta, pueden ser esféricos, planos, etc.
- **Centro de curvatura:** es el centro de la superficie esférica a la que pertenece el dioptrio (esférico).
- **Radio de curvatura del dioptrio:** es el radio de la superficie esférica.
- **Sistema óptico:** es el conjunto de varios dioptrios.
- **Eje óptico o principal:** es el eje común a todos los dioptrios de un sistema óptico.

- **Vértice o centro óptico del dioptrio:** es el punto de intersección del dioptrio esférico con el eje óptico.
- **Imagen de un objeto:** es el punto donde se juntan los rayos que, procediendo de cada uno de los puntos del objeto, han experimentado una reflexión, refracción,... Puede ser de dos tipos:
 - **Imagen real de un objeto A:** es aquella que no se ve a simple vista, pero que puede recogerse en una pantalla. Por tanto, se encuentra en el punto A' donde convergen los rayos al otro lado del sistema óptico (ver figura a la derecha).



- **Imagen virtual de un objeto A:** no existe realmente, puede verse y no puede recogerse sobre una pantalla. Se encuentra en el punto A' donde convergen las proyecciones de los rayos que divergen al atravesar el sistema óptico (ver figura a la izquierda).
- **Sistema óptico estigmático:** es aquel tal que los rayos emitidos por un punto objeto se cortan en un mismo punto imagen.
- **Sistema óptico astigmático:** es aquel tal que los rayos emitidos por un punto objeto no se cortan en un mismo punto imagen.

Todas las magnitudes empleadas en Óptica Geométrica obedecen a un **convenio de signos**; estos criterios son los siguientes (observar las distintas magnitudes en el dibujo):

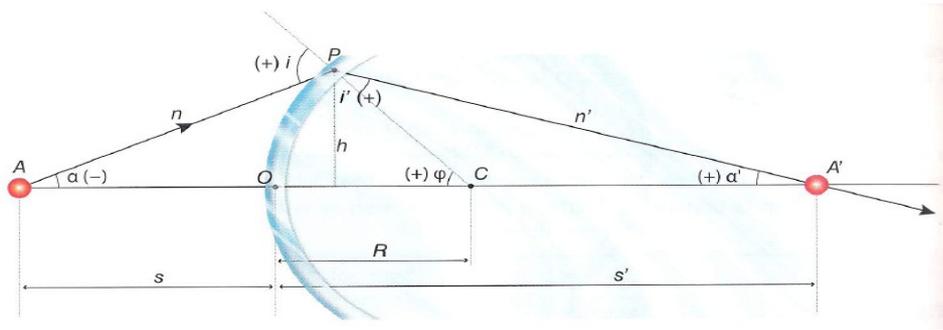


1. Las letras que hacen referencia a la imagen son las mismas que las del objeto, pero con el apóstrofe “prima”. Si A es el punto objeto, el punto imagen será A'.
2. Los puntos se representan con letras mayúsculas y las distancias, con minúsculas. La única excepción es el radio de curvatura, que se representa con la letra R para no confundirlo con el ángulo de refracción r.
3. La luz siempre incide por la izquierda y avanza hacia la derecha.
4. Las distancias situadas a la izquierda del vértice se consideran negativas, y las situadas a la derecha, positivas.
5. Asimismo, las distancias situadas por encima del eje óptico son positivas y las situadas por debajo, negativas.
6. Los ángulos que los rayos forman con el eje óptico son positivos si al girarlos sobre dicho eje por el camino más corto se gira en sentido contrario a las agujas del reloj. En caso contrario, se considerarán ángulos negativos.
7. Los ángulos de incidencia, reflexión y refracción son positivos cuando al girar el rayo sobre la normal por el camino más corto, el giro se produce en el mismo sentido de las agujas del reloj.

2.2.- DIOPTRIOS ESFÉRICO Y PLANO: DISTANCIAS FOCALES E IMÁGENES.

Consideremos el **dioptrio esférico** de la figura siguiente. El eje óptico pasa por el vértice o centro óptico del dioptrio, O, y por el centro de curvatura, C. La distancia objeto, s, es la distancia del punto objeto A al vértice del dioptrio; la distancia imagen, s', es la distancia del punto imagen A' al vértice del dioptrio. El radio de curvatura del dioptrio es R y n y n' son los índices de refracción de los medios separados por la su-

perficie. Si el dioptrio esférico es convexo, su radio de curvatura es positivo; si es cóncavo, su radio de curvatura será negativo.



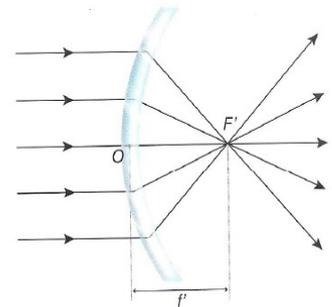
AMPLIACIÓN: Si consideramos únicamente rayos paraxiales (aproximación de Gauss), esto es, rayos que formen ángulos pequeños (inferiores a 10°) con el eje óptico, entonces se cumple la **ecuación fundamental del dioptrio esférico**:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R}$$

OBSERVACIONES:

1. A partir de la ecuación fundamental del dioptrio esférico definimos las distancias focales imagen y objeto:

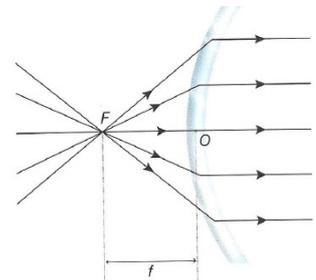
- Si el punto objeto se encuentra muy lejos del dioptrio ($s = -\infty$), entonces el haz de rayos que llega al dioptrio es paralelo al eje óptico, de modo que la imagen se formará en el punto F' , llamado **foco imagen**, situado a una distancia s' del vértice a la que se llama **distancia focal imagen (f')**.



AMPLIACIÓN: Podemos calcular dicha distancia focal a partir de la ecuación del dioptrio esférico:

$$\frac{n'}{f'} - \frac{n}{-\infty} = \frac{n' - n}{R} \Rightarrow f' = R \frac{n'}{n' - n}$$

- Los rayos que parten del punto F , llamado **foco objeto**, salen paralelos al eje óptico ($s' = \infty$); a la distancia, f , entre el punto objeto y el vértice del dioptrio se le llama **distancia focal objeto (f)**.



AMPLIACIÓN: Podemos calcular la distancia focal objeto a partir de la ecuación del dioptrio esférico:

$$\frac{n'}{\infty} - \frac{n}{f} = \frac{n' - n}{R} \Rightarrow f = -R \frac{n}{n' - n}$$

AMPLIACIÓN: Si dividimos ambas distancias focales obtenemos:

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'}$$

y si las sumamos:

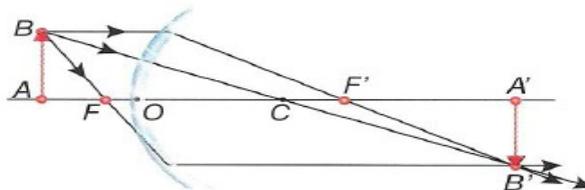
$$f + f' = R$$

Por último, podemos expresar la ecuación fundamental del dioptrio esférico en función de las distancias focales objeto e imagen (**ecuación de Gauss**):

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

2. **Para construir la imagen de un objeto** tendremos en cuenta 3 rayos luminosos característicos (ver figura):

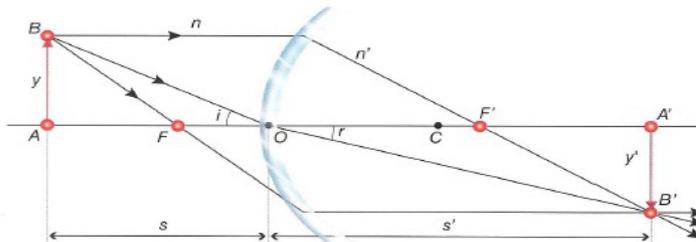
- El rayo que parte de B y es paralelo al eje óptico se refracta pasando por el foco imagen F'.
- El rayo que pasa por el foco objeto F se refracta paralelo al eje principal.
- El rayo que pasa por el centro de curvatura no se desvía porque, al ser perpendicular al dioptrio, el ángulo de incidencia es nulo.



En el punto B' en el que se cortan los 3 rayos anteriores se forma la imagen real B' del objeto B.

3. Si el tamaño del objeto es “y” y el de la imagen y', se llama **aumento lateral**, M_L , a la relación entre ambos tamaños:

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



Su valor positivo o negativo nos indicará si la imagen es, respectivamente, derecha o invertida.

AMPLIACIÓN: Para calcular la ecuación del aumento lateral, aplicamos la ley de Snell de la refracción:

$$n \sin i = n' \sin r$$

Ahora bien, si consideramos rayos paraxiales, se cumplirá que:

$$i \approx \sin i \approx \text{tg } i \approx \frac{y}{-s} \quad ; \quad r \approx \sin r \approx \text{tg } r \approx \frac{-y'}{s'}$$

con lo cual la ley de Snell se transforma en:

$$n i = n' r \Rightarrow -\frac{ny}{s} = -\frac{n'y'}{s'}$$

de donde se deduce que la ecuación del aumento lateral será:

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

Vemos que el aumento lateral del dioptrio esférico depende de las distancias objeto e imagen y de los índices de refracción de ambos medios.

Consideremos ahora un **dioptrio plano**; lógicamente, se tratará de un dioptrio esférico de radio infinito.

AMPLIACIÓN: Su ecuación fundamental quedará de la siguiente manera:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{\infty} \Rightarrow \frac{n}{s} = \frac{n'}{s'}$$

Un ejemplo de dioptrio plano es la superficie de separación entre el aire y el agua, dando lugar a que la profundidad aparente de un objeto sumergido en agua sea menor que la profundidad real, tal y como se indica en la figura de la derecha. En efecto, un observador observará el objeto a una distancia s' de la superficie del agua, inferior a la distancia real s .

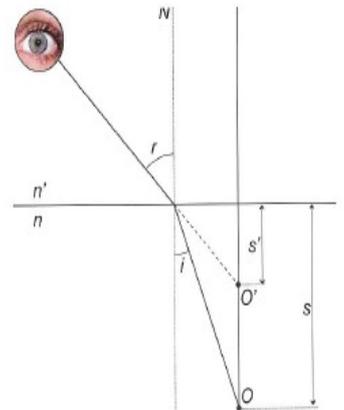
AMPLIACIÓN: Este hecho puede deducirse de la ecuación del dioptrio plano:

$$\frac{s'}{s} = \frac{n'}{n} \Rightarrow s' < s \text{ al ser } n' < n$$

Para calcular el tamaño de la imagen aplicamos la ecuación del aumento lateral:

$$M_L = \frac{y'}{y} = \frac{n s'}{n' s} = 1$$

de donde se deduce que el tamaño de la imagen es igual al del objeto.

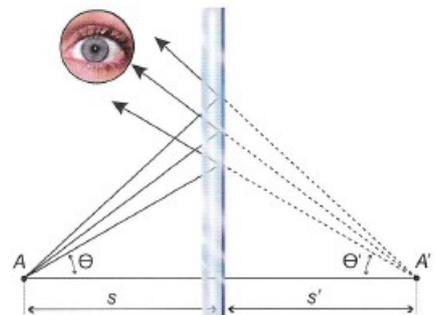


2.3.- ESPEJOS PLANO Y ESFÉRICO.

Podemos estudiar el comportamiento de un rayo luminoso al incidir sobre un espejo como un caso particular de refracción: al tratarse de una reflexión, el índice de refracción de los medios incidente y reflejado es el mismo, pero con signo contrario de acuerdo con el convenio de signos.

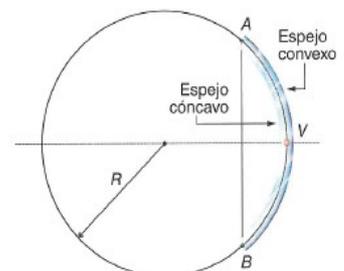
AMPLIACIÓN: La ecuación del dioptrio plano es aplicable también para un **espejo plano**:

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



Así pues, la imagen, que se forma detrás del espejo, es virtual y se encuentra a la misma distancia del objeto que el espejo. Por último, dicha imagen tendrá el mismo tamaño que el objeto, al igual que sucede en el dioptrio plano.

Los **espejos esféricos** tienen un cierto radio de curvatura, y pueden ser cóncavos o convexos (ver figura a la derecha), según su radio sea negativo o positivo.



AMPLIACIÓN: Para obtener la ecuación de los espejos esféricos partimos de la ecuación del dioptrio esférico y, al igual que para el estudio de los espejos planos, tenemos en cuenta que $n' = -n$. Así pues:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R} \Rightarrow \frac{-n}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{-2n}{R}$$

de donde obtenemos la **ecuación fundamental de los espejos esféricos**:

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

Al igual que en el dioptrio esférico, podemos determinar la distancia focal imagen si sobre el espejo incide un haz de rayos paralelo al eje óptico ($s = -\infty$):

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

Si los rayos reflejados son paralelos al eje principal ($s' = -\infty$), entonces la distancia focal objeto será:

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

En definitiva, **la distancia focal de un espejo esférico es igual a R/2**.

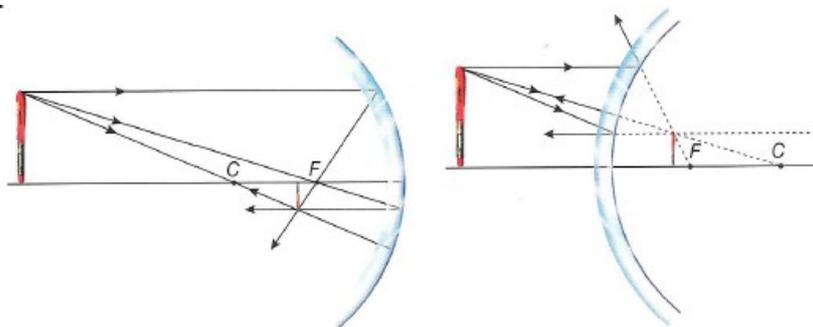
AMPLIACIÓN: Por otra parte, teniendo en cuenta la distancia focal, la ecuación de los espejos esféricos se puede escribir, análogamente a la del dioptrio esférico, de la manera siguiente:

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

Por último, el aumento lateral se calculará de la siguiente forma:

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

Para **construir la imagen formada por un espejo esférico**, tenemos en cuenta los 3 rayos siguientes:

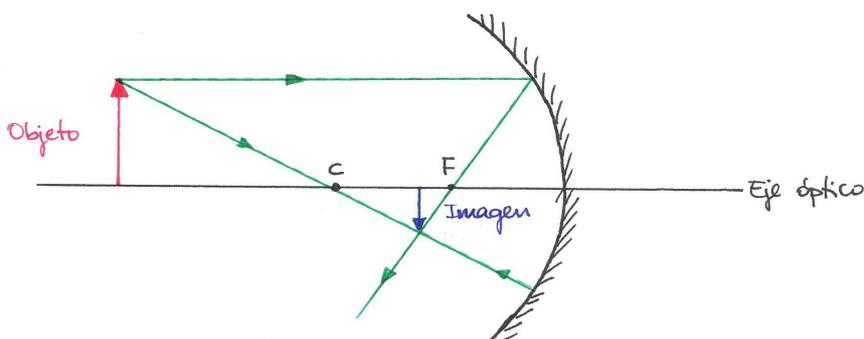


- ➔ Un rayo paralelo al eje óptico, al reflejarse en el espejo, pasa por el foco si el espejo es cóncavo y parece provenir del foco si el espejo es convexo.

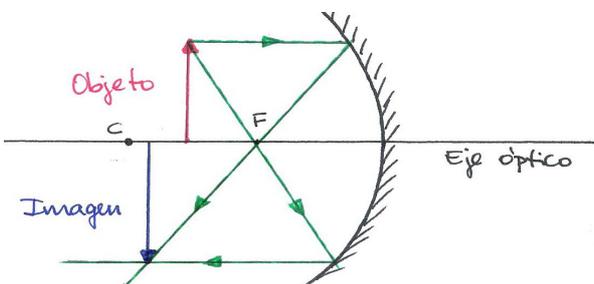
- ➔ Un rayo que pasa por el centro de curvatura de un espejo cóncavo incide sobre el espejo perpendicularmente a su superficie y, por tanto, se refleja siguiendo la misma trayectoria inicial. Si el rayo se dirige al centro de curvatura del espejo convexo, incide sobre el espejo perpendicularmente a su superficie y, por tanto, se refleja siguiendo la misma trayectoria inicial.
- ➔ Un rayo que pasa por el foco de un espejo cóncavo, o se dirige al foco de un espejo convexo, se refleja paralelamente al eje óptico.

Consideremos ahora la construcción de imágenes formadas por espejos esféricos en algunos casos concretos:

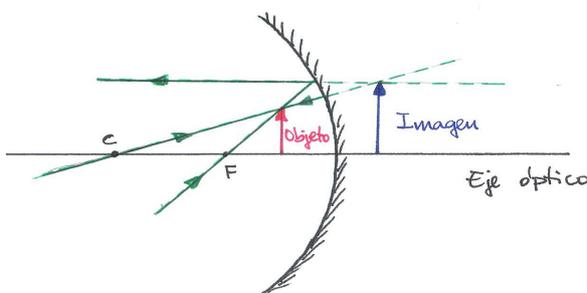
- a) Si el objeto está situado a una distancia de un **espejo cóncavo** mayor que su radio de curvatura, la imagen será real, invertida y de menor tamaño, y estará situada entre el objeto y el espejo:



- b) Si el objeto está situado entre el centro de curvatura y el foco de un **espejo cóncavo**, la imagen será real, invertida y de mayor tamaño que el objeto, y estará situada a la izquierda de éste:

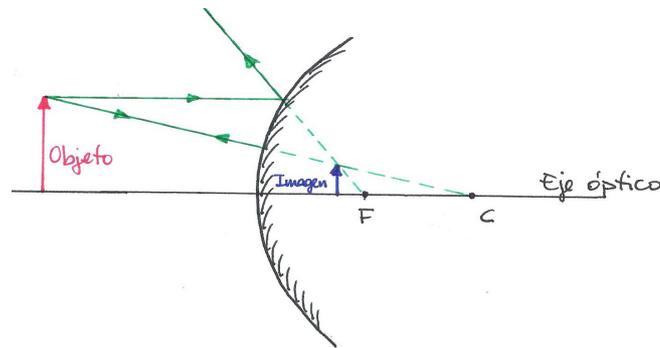


- c) Si el objeto está situado entre el foco y el **espejo cóncavo**, la imagen será virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto:



- d) Cuando el **espejo** es **convexo**, es decir, el centro de curvatura y el foco son virtuales, la imagen obtenida es virtual, derecha y de menor tamaño que el objeto, y se sitúa entre el espejo y el foco. De ello se deduce que **los espejos convexos tienen un amplio campo de visión, lo que los hace muy útiles**

como espejos retrovisores de los automóviles y para dar vistas panorámicas de grandes espacios: cruces de calles, garajes, etc.:



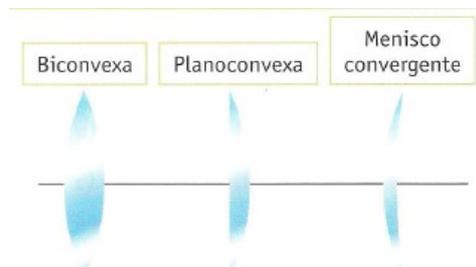
2.4.- LENTES DELGADAS.

Una lente es un sistema óptico formado por dos dioptros, de los cuales al menos uno debe ser esférico. Se utilizan para corregir los defectos del ojo, para fabricar microscopios, telescopios, cámaras fotográficas,...

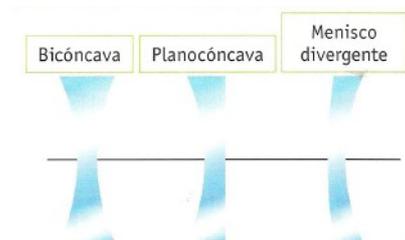
2.4.1.- CONCEPTO Y TIPOS.

Una lente delgada es aquella cuyo grosor es despreciable en comparación con el tamaño de la lente (y, por tanto, en comparación con su radio de curvatura). Pueden ser de 2 tipos:

- **Convergentes:** son aquellas más gruesas en el centro que en los bordes. Algunos tipos aparecen en la figura siguiente:



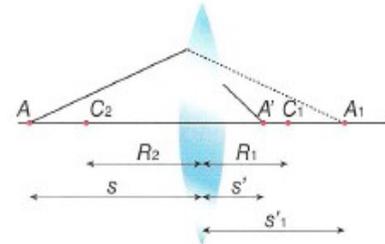
- **Divergentes:** son más gruesas en los bordes que en su parte central. Algunos tipos aparecen en la figura siguiente:



En las construcciones gráficas representaremos las lentes convergentes y divergentes como se indica siguiente:



AMPLIACIÓN: Para deducir la ecuación de las lentes delgadas, consideremos el caso general de una lente biconvexa (ver figura a la derecha) cuyas superficies tienen radios R_1 y R_2 (si una de las caras fuera plana, su radio de curvatura sería infinito). El primer dioptrio forma la imagen del objeto A en A_1 ; dicho punto es el objeto del segundo dioptrio, que formará la imagen definitiva en A' . Aplicando la ecuación del dioptrio esférico dos veces, una para cada superficie, considerando que la lente tiene un índice de refracción n y que se encuentra sumergida en el aire ($n = 1$), nos queda:



$$\text{primera cara de la lente} \rightarrow \frac{n'}{s'_1} - \frac{1}{s} = \frac{n - 1}{R_1}$$

$$\text{segunda cara de la lente} \rightarrow \frac{1}{s'} - \frac{n}{s'_1} = \frac{1 - n}{R_2}$$

Si sumamos ambas ecuaciones obtenemos la **ecuación fundamental de las lentes delgadas**:

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

De la ecuación anterior deducimos que la distancia focal imagen (distancia a la que se forma la imagen de un punto situado en el infinito) será:

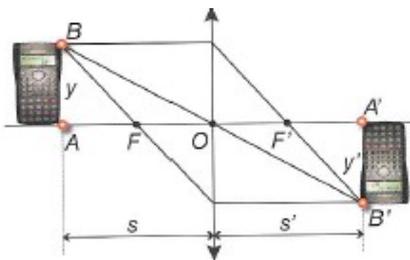
$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

La distancia focal objeto es la distancia a la que hay que colocar un punto para que su imagen se forme en el infinito; su valor será:

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

Así pues, $f' = -f$, y la ecuación fundamental de las lentes delgadas podrá escribirse de la manera siguiente:

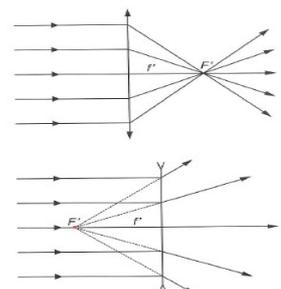
$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}$$



Por último, podemos hallar el aumento lateral de la lente con ayuda de la figura de la izquierda. Como los triángulos OAB y $OA'B'$ son semejantes, tendremos:

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

En la figura de la derecha se muestra el foco imagen de una lente delgada convergente y divergente. Observar que en el primer caso el foco es real, y en el segundo, virtual.



2.4.2.- **AMPLIACIÓN**: POTENCIA DE UNALENTE.

La **potencia de una lente** se define como el inverso de la distancia focal imagen:

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

Si la distancia focal f' se expresa en metros, la potencia se mide en *dioptrías* (D), que equivale a m^{-1} . De la definición anterior se desprende que las lentes convergentes tienen potencia positiva y las divergentes, potencia negativa (ver figura superior derecha).

Si un sistema óptico está formado por varias lentes delgadas dispuestas consecutivamente, la potencia del sistema será la suma de las potencias de cada lente:

$$P = \sum_i P_i = P_1 + P_2 + \dots$$

2.4.3.- CONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES.

Para **construir la imagen formada por una lente delgada** nos centraremos en los siguientes 3 rayos:

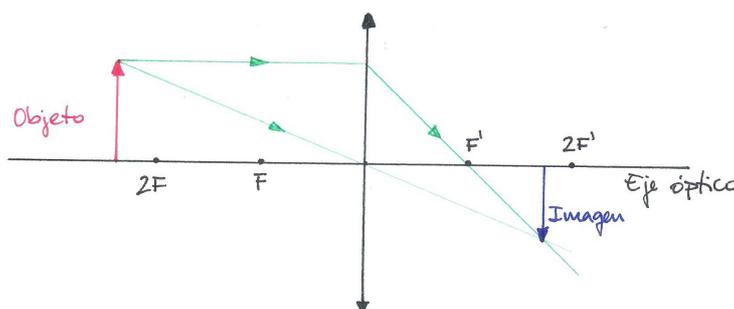
- Un rayo paralelo al eje óptico pasa por el foco imagen F' .
- Un rayo que pase por el foco objeto se refracta emergiendo paralelamente al eje óptico.
- Un rayo que pase por el centro óptico de la lente no se desvía.

Dibujando, al menos, dos de ellos, el punto de intersección será aquel donde se formará la imagen. En las figuras siguientes se muestra cómo se construye la imagen de un objeto para los dos tipos de lente:

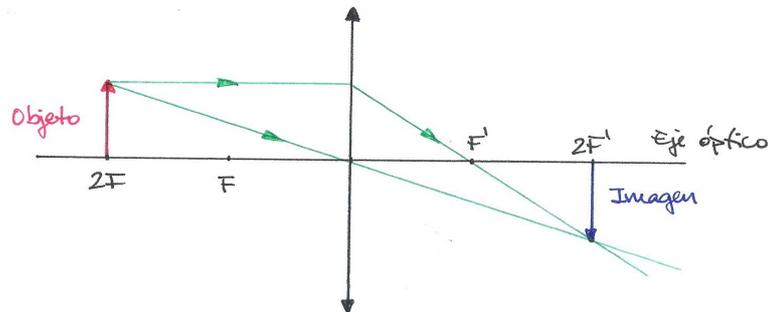


A continuación se muestran algunos ejemplos de formación de imágenes en lentes:

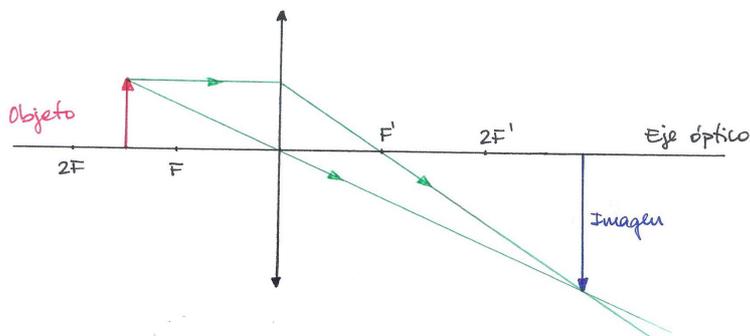
- a) Si el objeto está situado a una distancia mayor que el doble de la distancia focal de una **lente convergente**, entonces se formará una imagen real, invertida y de menor tamaño que el objeto, situada entre F' y $2F'$:



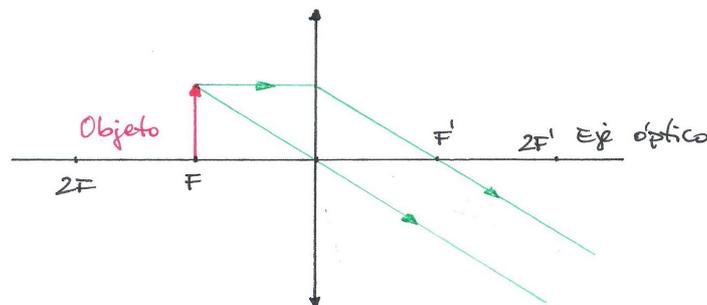
- b) Si el objeto está situado a una distancia igual al doble de la distancia focal de una **lente convergente**, entonces se forma una imagen real, invertida, del mismo tamaño que el objeto y situada a una distancia igual al doble de la distancia focal:



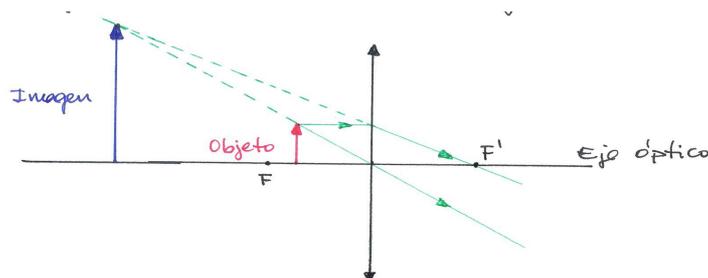
- c) Si el objeto está situado, delante de una **lente convergente**, a una distancia comprendida entre el doble de la distancia focal y dicha distancia, entonces se forma una imagen real, invertida y de mayor tamaño que el objeto, encontrándose situada a una distancia mayor que el doble de la distancia focal:



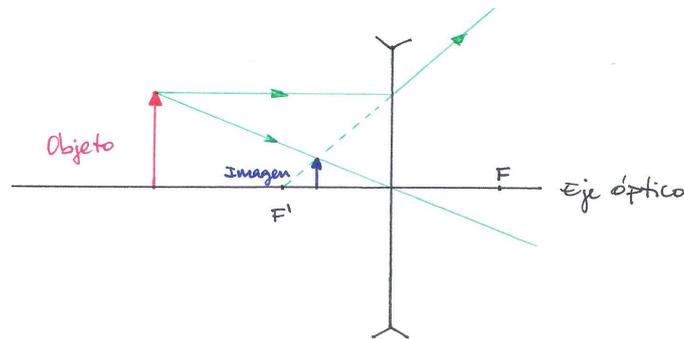
- d) Si el objeto está localizado en el foco de una **lente convergente**, entonces no se formará imagen, pues los rayos emergen paralelos de la lente (la imagen se formaría en el infinito):



- e) Si el objeto está situado entre el foco objeto y la **lente convergente**, entonces se forma una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto. Éste es el principio de funcionamiento de la lupa:



- f) Si la **lente** es **divergente**, la imagen formada será siempre virtual, derecha y de menor tamaño que el objeto:



AMPLIACIÓN: Todo lo explicado sobre las lentes es válido únicamente si la lente es delgada, los rayos paraxiales y la luz monocromática. Cuando una o varias de estas condiciones no se cumple se producen defectos en las imágenes que se llaman **aberraciones**. Los 2 principales tipos de aberraciones son los siguientes:

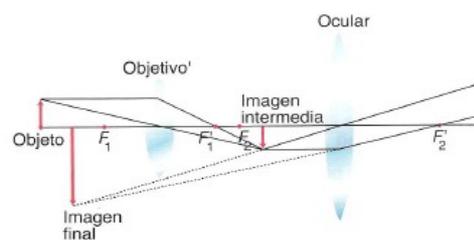
- ◆ **Aberración esférica:** se produce debido a que todos los rayos que inciden paralelos no se cortan en un punto.
- ◆ **Aberración cromática:** se debe a que el índice de refracción de la lente no es constante, sino que varía con la longitud de onda de la luz empleada. Así, por ejemplo, si sobre la lente incide luz blanca, los distintos colores no se enfocarán en el mismo punto.

2.4.4.- SISTEMAS ÓPTICOS.

Están formados por dos o más lentes, por lo que las ecuaciones que hay que utilizar son las ya vistas. Sin embargo, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ Si las lentes están acopladas (en contacto una con la siguiente), la potencia del sistema es la suma de las potencias de cada lente.
- ✓ Si las lentes están separadas, la imagen formada por la primera lente actúa como objeto de la siguiente, y así sucesivamente.
- ✓ El aumento lateral total será el cociente entre el tamaño de la imagen final y el del objeto, o bien el producto de los aumentos producidos por cada lente.

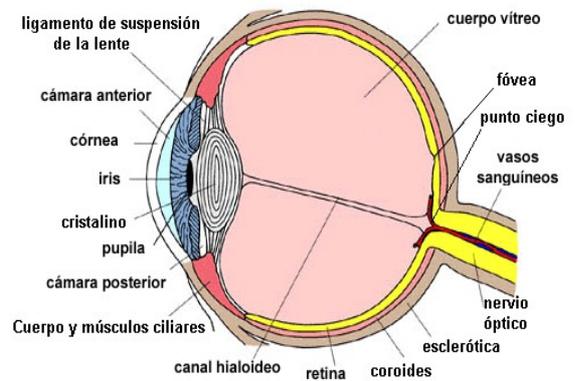
Uno de los sistemas ópticos más comúnmente empleados es el **microscopio óptico**, que está formado por 2 lentes convergentes – llamadas objetivo y ocular – de pequeña distancia focal. El objetivo se encuentra más cerca del objeto, y forma una imagen real, invertida, de mayor tamaño que él y situada dentro de la distancia focal de la segunda lente (más cercana al ojo). La imagen final es virtual, invertida y de mayor tamaño que el objeto:



2.5.- AMPLIACIÓN: EL OJO HUMANO.

El ojo humano se comporta como un sistema óptico en el que un conjunto de medios transparentes forman una imagen real e invertida sobre la retina. Es de forma aproximadamente esférica, de unos 2'5 cm de diámetro. En la figura de la derecha aparecen sus partes más importantes.

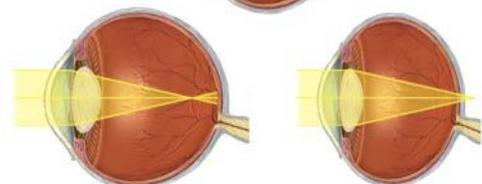
La luz penetra en el ojo a través de la córnea, que es transparente. El iris regula la cantidad de luz que entra en el ojo a través de la pupila, y el sistema córnea-cristalino enfoca la luz sobre la retina. El cristalino es una lente biconvexa con un índice de refracción igual a 1'43, ligeramente mayor que el del agua. El humor acuoso y el humor vítreo tienen un índice de refracción muy parecido al del agua. La córnea produce la mayor desviación de la luz, debido a que tiene un pequeño radio de curvatura (0'8 cm).



El cristalino hace posible la formación de la imagen sobre la retina mediante la acción de los músculos ciliares, que modifican su curvatura y permiten la visión de los objetos próximos y lejanos. Este proceso se denomina **acomodación del ojo**. Para un ojo normal, el punto más próximo que el cristalino puede enfocar en la retina está situado a unos 25 cm del ojo, distancia llamada **punto próximo**; el punto más lejano, que suele ser el infinito para un ojo normal, se denomina **punto remoto**. El punto próximo varía con la edad, oscila entre unos 7 cm para los niños y 2 m para las personas mayores. En ocasiones el ojo tiene algún defecto que disminuye este poder de acomodación; algunos de estos defectos son los siguientes:

→ **Miopía**: En un ojo miope el cristalino no enfoca sobre la retina los rayos paralelos procedentes de un objeto lejano, sino que la imagen se forma delante de la retina. Por tanto, una persona miope ve borrosos los objetos lejanos; este defecto puede deberse a que la córnea tiene demasiada curvatura o a que el ojo tiene una longitud mayor de lo normal. Para corregir la miopía se utilizan lentes divergentes, de forma que el foco imagen de esta lente coincida con el punto remoto del ojo.

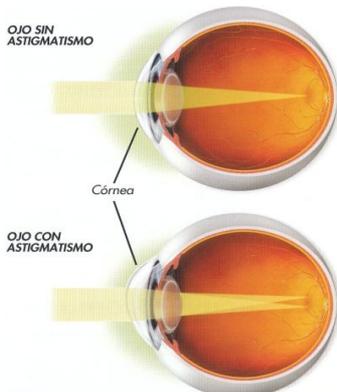
La visión normal se presenta cuando la luz se enfoca directamente sobre la retina y no al frente o detrás de ella



Miopía: la imagen visual se enfoca al frente de la retina

Hipermetropía: la imagen visual se enfoca detrás de la retina

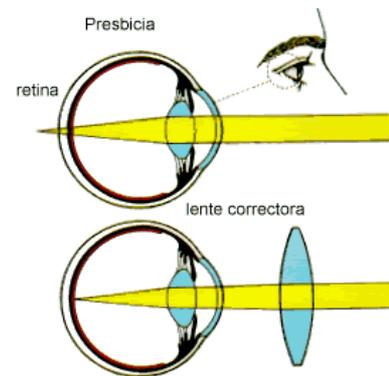
→ **Hipermetropía**: Es el defecto opuesto a la miopía. Los rayos de luz procedentes de un objeto próximo al ojo se enfocan en un punto situado detrás de la retina, de manera que los hipermétropes ven mal los objetos próximos. Se corrige con lentes convergentes.



→ **Astigmatismo**: Casi siempre se debe a que la córnea no es perfectamente esférica, por lo que el ojo no enfoca simultáneamente las líneas verticales y horizontales (ver figura de la izquierda). También puede deberse a la falta de esféricidad de otras partes del ojo. Se corrige mediante lentes cilíndricas.

- **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 cercanos con dificultad, como sucede con la hipermetropía. Se corrige con lentes convergentes (ver figura de la derecha).

Todos los defectos que hemos visto se corrigen normalmente mediante gafas graduadas que contienen las lentes necesarias con la potencia adecuada. En muchos casos, las lentes de contacto han sustituido a las gafas ordinarias, pues corrigen la curvatura inadecuada de la córnea.



Hoy en día se puede tallar la curvatura de la córnea mediante intervenciones quirúrgicas con láser. Así, se selecciona una fina lámina corneal, y con el láser se corrige su curvatura y se recoloca sin necesidad de sutura.

En los siguientes vídeos puedes estudiar los aspectos más importantes del tema:

<http://www.youtube.com/watch?v=kRQ1N61Fo2A> (1 de 2)

<http://www.youtube.com/watch?v=gHbVoUgjMO0> (2 de 2)

En la siguiente página web puedes estudiar cómo se forman las imágenes en lentes y espejos:

http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales_didacticos/bancooptico/index.html