

LA LUZ. OPTICA FÍSICA (UNIDAD 7 DE EDITEX)

1 Primeras teorías sobre la naturaleza de la luz

¿Por qué vemos los objetos? ¿Cuál es el mecanismo de la visión?

- La **escuela pitagórica** decía que la visión se produce por un fuego invisible que sale de los ojos, va hacia los objetos, los toca y los explora. **Ptolomeo**: “los ojos emiten rayos rectilíneos que se propagan todos a la misma velocidad”
- **Euclides** hacia el año 300 a.C. afirmaba que la visión se producía porque los objetos, tanto los luminosos como los iluminados, emitían diminutas partículas que penetraban en el ojo. Esta idea le permitió describir la ley de la reflexión de la luz.

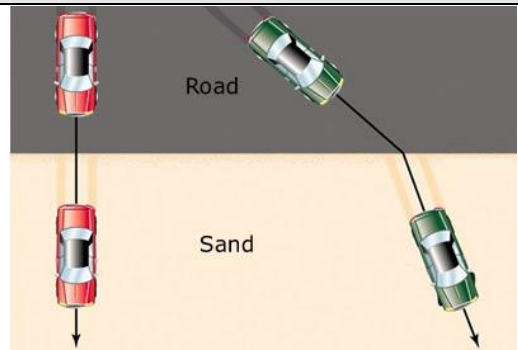
Ninguna de las **dos hipótesis explica el por qué no se ven los objetos en la oscuridad**. Se creía erróneamente que el acto de ver no tenía ninguna relación con el acto de emitir luz algunos objetos incandescentes, por ejemplo. El primero que relacionó correctamente ambos hechos fue un médico árabe.

- El médico árabe **Alhazen** (965-1040) afirma la idea correcta de que la luz llega a los objetos procedente de los cuerpos luminosos, los ilumina y de estos va a los ojos. De forma errónea dice que la imagen se forma en el cristalino (la lente del ojo) al desconocer el papel de la retina (esta explicación la daría Kepler en el s. XVII)

2 Modelos corpuscular y ondulatorio de la luz

Una vez establecido lo anterior, se dudó durante mucho tiempo **si la luz era una onda o una partícula**. La luz se reflejaba y refractaba, pero esos fenómenos también los sufren, en cierta manera, una pelota que rebota contra una pared (reflexión) o un coche que cambia de terreno, pasando de una carretera asfaltada a tierra de forma no perpendicular. La rueda que entra primero en la tierra se frena y hace que la dirección del coche varíe (refracción). La **prueba definitiva** para conocer que **la luz es una onda**, pues era capaz de hacer interferencias, se produjo en 1801, con el **experimento de la doble rendija de Young**.

Hasta entonces hubo 2 teorías, la de que la luz estaba formada por **partículas (Newton)** y la de que era una **onda (Huygens)**.



2.1 Teoría corpuscular de Newton

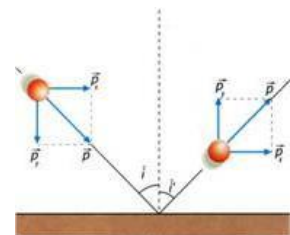
En 1671, **Isaac Newton** publica la **teoría corpuscular de la luz**, que considera que la luz está formada por partículas materiales muy pequeñas llamadas corpúsculos, que son lanzados gran velocidad por los cuerpos emisores de luz y que se desplazan en línea recta (debido a la inercia que tienen) en todo medio transparente y homogéneo.

Según Newton, el fenómeno de la visión se produce cuando estos corpúsculos chocan contra la retina de los ojos, y los distintos colores que percibimos son debidos a que estos corpúsculos tienen distinta masa.

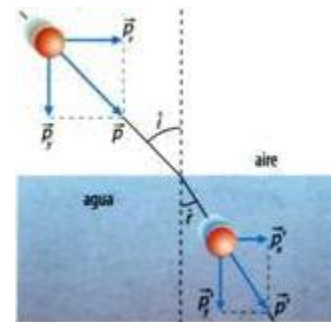
Permite explicar fenómenos como:

- La **propagación rectilínea de la luz** en el medio (partículas minúsculas, $m \approx 0$, MRU).
- La **ley de la reflexión**: los corpúsculos chocaban elásticamente ($\vec{p} = \text{constante}$) contra la superficie de separación entre dos medios. Como la diferencia de masas entre los corpúsculos y la superficie de separación es muy grande, los corpúsculos rebotaban, de modo que la componente horizontal de la cantidad de movimiento p_x se mantiene constante ($p_x = p_x'$) mientras que la componente normal p_y cambia de sentido, pero como

$|\vec{p}| = |\vec{p}'| = cte \rightarrow \sqrt{p_x^2 + p_y^2} = \sqrt{p_x'^2 + p_y'^2} \rightarrow p_y = -p_y'$. Así, $\hat{i} = \arctg \frac{p_x}{p_y} = \hat{r} = \arctg \frac{p_x'}{p_y'}$; Se cumple la ley de la reflexión, el ángulo de incidencia y de reflexión eran iguales.



- La **ley de la refracción**: En la refracción, al pasar la luz de propagarse por aire a hacerlo por agua, los corpúsculos atraídos por el agua, según Newton, serían acelerados al entrar en ella. Por tanto v_y aumentaba y los corpúsculos variaban su dirección de propagación acercándose a la normal. Según esto, la velocidad de propagación de la luz en agua debía ser mayor que en el aire. Esto podía permitir distinguir esta teoría de la ondulatoria (si era una onda, debía cumplir la ley de Snell: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}_c}$. Como $\hat{i} > \hat{r}_c, v_1 > v_2$. entonces, debía ir más lenta en el agua que en el aire, como así se comprobó luego).



Debido al gran prestigio del que gozaba Newton, su teoría fue la que predominó a lo largo de siglo y medio, hasta que en 1801 Thomas Young descubrió los fenómenos de interferencias, y en 1815 Agustín Fresnel los de difracción. Además, en 1850 Foucault midió la velocidad de la luz en el aire y en el agua y observó que era mayor en el aire que en el agua, con lo que la explicación de Newton quedaba completamente descartada.

2.2 Teoría ondulatoria de Huygens

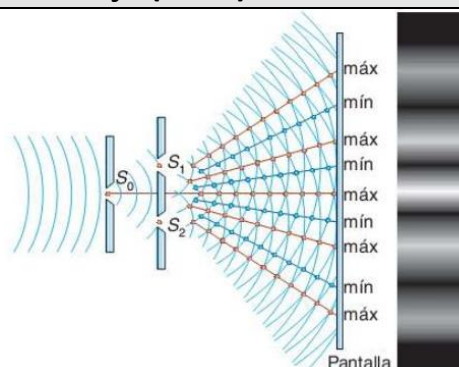
Huygens (contemporáneo de Newton, en 1690) propuso que la luz consistía en una **onda mecánica**. Creía que eran **ondas longitudinales** (al propagarse en gases y líquidos, como el sonido). Como se sabía que la luz puede propagarse en el vacío, debe inventarse una sustancia muy sutil que debe invadir el vacío (sin ser detectado y por tanto de una densidad ínfima) y al mismo tiempo tener una enorme elasticidad (millones de veces más rígido que el acero para soportar las enormes frecuencias de la luz). A esa sustancia tan peculiar que llenaba todo el espacio, incluso el vacío, **se le llamó éter y costó varios siglos desterrarla de la física**.

Explicaba fácilmente fenómenos como reflexión y la refracción.

Contra esta teoría se argumentaba que si era una onda debía haber fenómenos de difracción e interferencia que no se habían encontrado porque su longitud de onda es muy pequeña y que el resto lo explicaba la teoría corpuscular. La discusión acabó con el experimento de la doble rendija de Young (1801)

3 Interferencias. Experimento de Young de la doble rendija (1801)

Es un experimento clásico, ya que supone la demostración palpable de que la luz tiene carácter ondulatorio. Cuando se intentaba realizar interferencias con la luz procedente de una lámpara **a través de 2 rendijas no se observaban** y Young pensó que eso podía deberse a que las ondas que llegaban a cada rendija no eran coherentes, es decir, no tenían idéntica fase inicial (cada rayo de luz podía llegar de una parte de la llama). A Young se le ocurrió hacer pasar a la luz original por una rendija única previa, en la que, según el principio de Huygens, se formaría una nueva onda que sería la misma que llegaría a las siguientes 2 rendijas y por tanto tendríamos ondas coherentes saliendo de esas 2 rendijas (ya que la luz provenía de un único foco real). Observó así un patrón de franjas claras y oscuras alternadas, es decir un patrón de interferencias.



Decíamos que una interferencia es **constructiva** cuando las ondas están en fase (diferencia de $0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2n\pi$). En este caso la amplitud resultante es la suma de las amplitudes de las ondas y su intensidad, proporcional al cuadrado de la amplitud, es máxima. Se observa una luz más intensa. Recordamos que esto sucede cuando la diferencia de caminos entre los 2 rayos que llegan a un punto procedentes de cada foco es $r_2 - r_1 = n\lambda$.

Una interferencia es **destructiva** si las ondas están en oposición de fase (diferencia de π o múltiplo impar de π : $\pi, 3\pi, 5\pi, \dots, (2n-1)\pi$). La amplitud de fase es la diferencia de las amplitudes de las ondas y la intensidad es mínima. Se observa oscuridad. Recordamos que esto ocurre cuando la diferencia de caminos entre los 2 focos es $r_1 - r_2 = (2n+1)\lambda/2$.

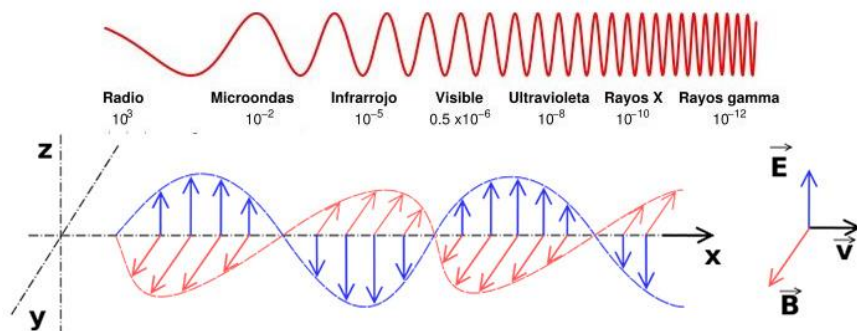
4 La luz es una onda electromagnética. Teoría de Maxwell

Como consecuencia de su teoría del electromagnetismo, Maxwell propuso en 1864 que la luz podía ser una clase particular de propagación de un campo electromagnético. Esta predicción fue confirmada por

Heinrich Hertz, cuando, en 1887, produjo y detectó estas ondas¹ y estableció que la luz es un tipo de onda electromagnética caracterizada por un cierto intervalo de frecuencias.

Las ondas electromagnéticas tienen las siguientes características:

- Las ecuaciones de Maxwell muestran que se genera una onda electromagnética cuando **cargas eléctricas son aceleradas**. Si las cargas eléctricas se mueven con velocidad constante no se genera una onda, aun cuando existe un campo eléctrico y un campo magnético.
- Constan de un campo magnético \vec{B} y un campo eléctrico \vec{E} oscilantes sinusoidalmente (armónicos), con direcciones \vec{E} y \vec{B} perpendiculares entre sí y con la dirección de propagación (que viene determinada por $\vec{E} \times \vec{B}$) y están los 2 en fase, es decir, alcanzan simultáneamente sus valores máximos y mínimos (ver dibujo).



- Dichos campos abandonan la fuente donde se forman y viajan a través del espacio (en el vacío) creándose y recreándose mutuamente, según la 3ª y 4ª ecuaciones de Maxwell: El campo magnético variable con el tiempo induce un campo eléctrico proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético y perpendicular a él (inducción, ley de Faraday-Henry-Lenz) y este campo eléctrico variable en el tiempo induce un campo magnético proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo eléctrico y perpendicular a él (Ley de Ampere modificada por Maxwell).
- Los vectores E y B varía sinusoidalmente en el tiempo y la posición, con la ecuación de las ondas armónicas:

$$E = E_0 \text{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = E_0 \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$B = B_0 \text{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = B_0 \text{sen}(\omega t - kx)$$

- Las dos ondas se propagan en fase (alcanzan sus máximos y mínimos simultáneamente) y sus elongaciones en una posición y en un instante determinado están relacionadas con la ecuación: $|\vec{E}| = c |\vec{B}|$.

c es la velocidad de la luz en el vacío y su valor es 299 792 458 m/s (la aproximaremos a $3 \cdot 10^8$ m/s)

- No necesitan soporte material para propagarse y su velocidad de propagación depende del medio y está relacionada con las constantes dieléctrica, ϵ , y permeabilidad magnética del medio, μ . Maxwell demostró que podía calcular c de forma teórica relacionándola con las 2 constantes anteriores (lo que confirmo su idea de onda electromagnética):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

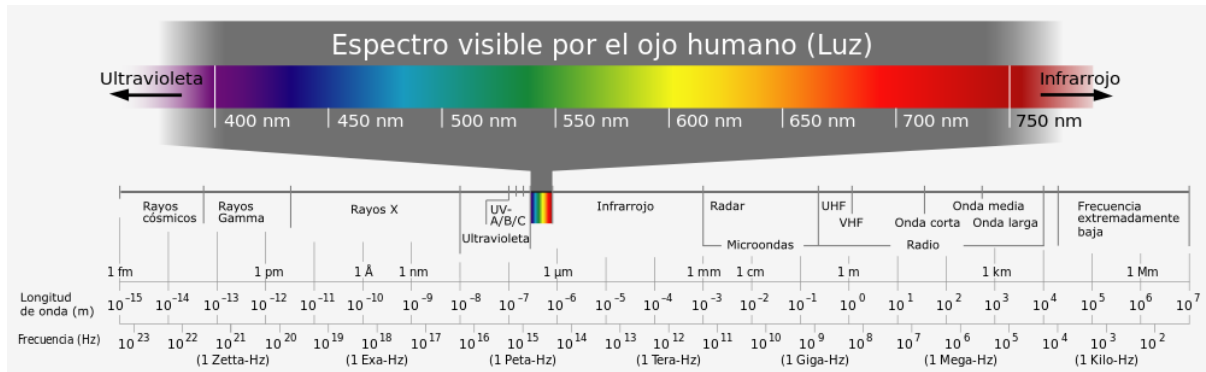
- Las ondas electromagnéticas también se caracterizan por su longitud de onda y su frecuencia, que están relacionadas por la expresión: $c = \lambda \cdot f$.
- Las ondas luminosas solo se diferencian de las de radio en que su frecuencia, mucho mayor impresiona la retina del ojo. Parecía que se había aclarado la naturaleza de la luz.

¹ El experimento de Hertz consistió en producir ondas electromagnéticas en un circuito formado por dos esferas conectadas a una bobina de inducción (Bobina de Ruhmkorff). Al producir descargas o chispas eléctricas oscilantes entre las esferas, se originan radiaciones electromagnéticas, pues toda carga eléctrica acelerada emite energía en forma de radiación electromagnética. Hertz diseñó un receptor o antena para detectar las ondas que debían producirse. Estaba constituido por un cable curvado con dos esferitas en sus extremos. Si las ondas electromagnéticas llegaban al receptor se producía en él una corriente oscilante que hacía saltar chispas entre sus esferitas.

RESUMEN: Las ondas electromagnéticas son ondas transversales que consisten en la propagación, sin necesidad de soporte material, de un campo eléctrico y de otro magnético perpendicular entre sí y a la dirección de propagación, que se propagan en el vacío a la velocidad de la luz. Esta velocidad es independiente de la longitud de onda.

5 Espectro electromagnético

Llamamos espectro electromagnético a la secuencia de todas las ondas electromagnéticas conocidas, ordenadas según su longitud de onda o su frecuencia. Como ya sabemos la frecuencia y la longitud de onda se relacionan con la expresión $f = c/\lambda$. El espectro electromagnético se representa normalmente en siete zonas que no presentan límites nítidos.



5.1 Características de cada una de esas zonas.

- **Ondas de radio:** Son las que tienen la longitud de onda más larga: desde millones de metros hasta unos 30 cm (frecuencia entre 10^2 y 10^9 Hz). Tenemos las ondas largas de radio con longitudes de onda del orden de km; las de radio AM (f en kHz), las de FM (f en MHz) y televisión y telefonía móvil (f en GHz). Puedes pensar en el hecho que usamos mayor frecuencia cuando necesitamos mayor cantidad de datos a transmitir.
- **Microondas:** Comprenden las longitudes de onda que abarcan desde los 30 cm hasta 1 mm (frecuencias entre 10^9 y $3 \cdot 10^{11}$ Hz). El rango de frecuencias de los microondas coincide con las frecuencias de resonancia de vibración de las moléculas del agua, lo que ha popularizado su empleo en las cocinas (horno microondas) para la cocción de los alimentos, que tienen un alto contenido en agua. También se utilizan en las comunicaciones con vehículos espaciales, debido a su facilidad para penetrar en la atmósfera.
- **Infrarrojo (IR):** Sus longitudes de onda van desde 1 mm hasta los 10^{-6} m aproximadamente (frecuencias entre $3 \cdot 10^{11}$ y $3 \cdot 10^{14}$ Hz). Son emitidas por los cuerpos calientes como las brasas de una chimenea. La mitad de la energía irradiada por el Sol son, sobre todo, rayos infrarrojos.
- **VISIBLE:** Es la que nuestros ojos es capaz de captar. Es lo que vulgarmente conocemos como luz. Es la región más estrecha del espectro, abarca sólo las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm aproximadamente. Se subdivide en los colores del arco iris.
- **Ultravioleta:** Son radiaciones que se encuentran más allá del violeta. Sus longitudes de onda abarcan desde 380 nm hasta 1 nm (frecuencias entre $7 \cdot 10^{14}$ y $3 \cdot 10^{17}$ Hz). Su energía es suficiente para romper enlaces químicos o producir ionizaciones. Es el responsable del tono moreno de nuestra piel al tomar el Sol. Fueron descubiertos por Johann Ritter en 1881.
- **Rayos X:** Tienen longitudes de onda comprendidas entre 1 nm y 0,01 nm (frecuencias entre $3 \cdot 10^{17}$ y $3 \cdot 10^{19}$ Hz). El tamaño de estas longitudes de onda es equiparable al de los átomos y a las distancias interatómicas en los sólidos. Son útiles en cristalografía para determinar las disposiciones atómicas en un cristal por el método de difracción de rayos X y también en medicina, en las radiografías. Tienen mucha energía y son peligrosos por lo que las dosis de las radiografías se miden cuidadosamente.
- **Rayos γ :** Sus longitudes de onda van desde los 10^{-11} m, hasta valores infinitesimales (frecuencias superiores a $3 \cdot 10^{19}$ Hz). Su frecuencia es elevadísima así como su energía. Son muy peligrosos para

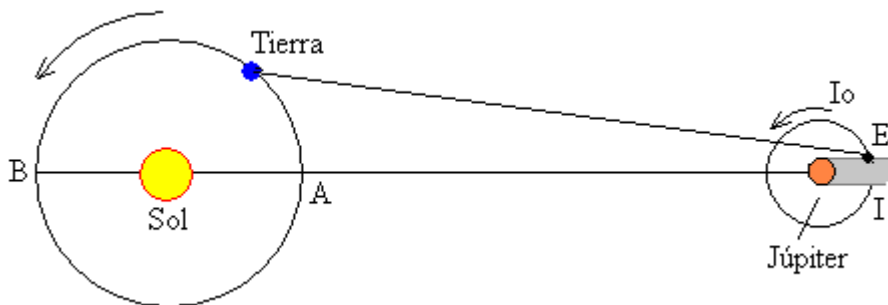
Color	Longitud de onda
violeta	380–450 nm
azul	450–495 nm
verde	495–570 nm
amarillo	570–590 nm
naranja	590–620 nm
rojo	620–750 nm

cualquier forma de vida. Se ha encontrado utilidad en radioterapia para combatir células cancerosas. Las pequeñas longitudes de onda hacen que la naturaleza corpuscular prevalezca sobre la ondulatoria. Se producen en las reacciones nucleares y sólo son absorbidos por el plomo o el hormigón a partir de cierto grosor.

6 Medida de la velocidad de la luz

6.1 Método astronómico (Römer):

En 1676 el astrónomo danés **Römer** se basó en observar los eclipses de un satélite de Júpiter, Io. En la figura, se muestra el Sol, la Tierra, Júpiter y su satélite Io en su órbita alrededor de este planeta. El Sol ilumina Júpiter, que proyecta su sombra en el espacio.



Io es el satélite más cercano de Júpiter, y está situado prácticamente en el plano de su órbita alrededor del Sol. El satélite Io entra en la sombra proyectada por Júpiter por el punto I quedando oculto (eclipse) durante un pequeño intervalo de tiempo, y sale de la sombra por el punto E.

Supongamos que la Tierra está en la posición A, la más cercana a Júpiter (oposición), cuando Io aparece de la sombra de Júpiter. El mismo acontecimiento ocurrirá 42.5 horas más tarde, cuando Io haya completado una vuelta.

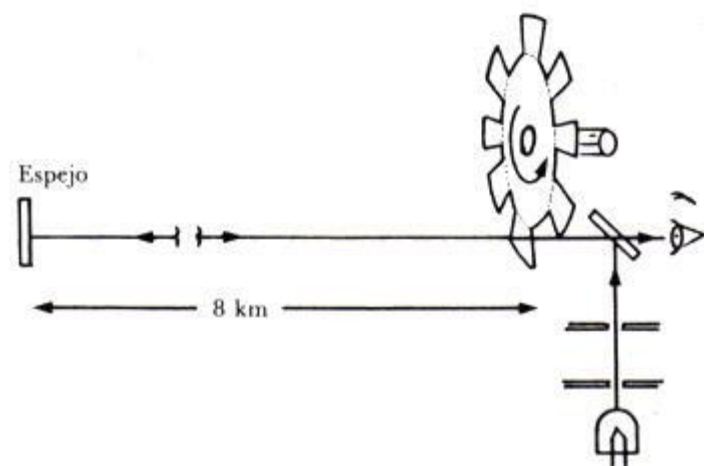
A medida que la Tierra se va desplazando de A a B, a donde llegará tras 6 meses, los sucesivos eclipses de Io se van retrasando, acumulando un retraso estimado por Römer de unos 1000 s (unos 16 minutos) cuando la Tierra se encuentra en B. En medio año, Júpiter apenas se ha movido mientras que la Tierra ocupa una posición diametralmente opuesta. Como bien sugirió Römer los mil segundos de retraso es el tiempo que tarda la luz en atravesar el diámetro de la órbita de la Tierra que es de trescientos millones de kilómetros. Así que $c=300 \cdot 10^6 \text{ km}/10^3 \text{ s}=300.000 \text{ km/s}$. El valor obtenido por Römer, con las tablas astronómica de entonces, no fue tan perfecto. Estimo c en 215 000 km/s.

Se puede ver esto con muchísimo más detalle en <https://goo.gl/zg5yBv>.

6.2 Métodos terrestres (aparatos)

El primero en intentarlo fue anterior al de Römer, **Galileo**, que intentó medir la velocidad de la luz usando 2 personas, provistas de antorchas y separadas a una gran distancia una de otra. La idea era que cuando uno de ellos levantara su antorcha, el otro, al verla, levantase la suya y entonces el primero contará el tiempo tardaba en ver esa segunda antorcha. La velocidad de la luz sería 2 veces su separación entre el tiempo de observación. El problema es que la luz va a tal velocidad que el método es impracticable. Le permitió estimar que la luz era por lo menos 10 veces más rápida que el sonido, o sea, como mínimo 3,4 km/s, muy lejos del valor real.

El francés **Hypolyte Fizeau**, en 1849, probó con un dispositivo como el de la figura. Por medio de un soplete de hidrógeno y oxígeno produce una luz muy brillante que dirige a un espejo semitransparente, de tal forma que el rayo reflejado pasará a través de uno de los espacios que existe entre dos dientes de la rueda. El rayo de luz sale de su aparato, situado en Montmartre (conocido barrio de París). Cuando la rueda se hace girar, el rayo de luz se interrumpe al ir interponiéndose en su camino los dientes de la rueda, que lo "corta en trozos". Este rayo de luz así cortado se dirige a un espejo situado a 8.633 metros de distancia, en el monte Valérien, que lo refleja de nuevo hacia la rueda dentada, haciéndolo pasar en su camino de vuelta por el mismo punto por el que ha pasado en el camino de ida.

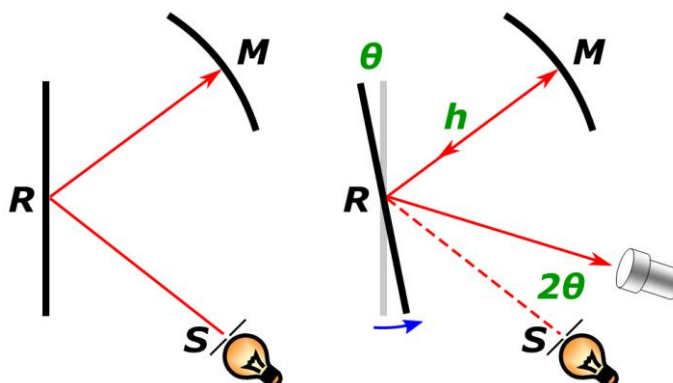


Si la rueda está parada, Fizeau ve perfectamente el rayo luminoso de vuelta. Obsérvese que el único rayo que puede verse es justamente el de vuelta, ya que el de ida nunca llega al ojo del observador.

En ese punto se hace girar la rueda con velocidad creciente. Al principio, cuando la rueda va despacio, el rayo de vuelta choca contra un diente de la rueda dentada y no lo vemos. Al pasar el siguiente hueco de la rueda sale un nuevo rayo de luz, que no veremos porque chocará con el siguiente diente y seguiremos sin ver nada, y así sucesivamente hasta que la velocidad de la rueda sea tal que el

rayo de vuelta coincida con el siguiente hueco, momento en que veremos luz. Con este procedimiento estimó c en 313 000 km/s.

León Foucault, francés también y amigo de Fizeau, modificó el aparato cambiando la rueda dentada por un espejo giratorio. El aparato hace que la luz que sale de una rendija S se refleje en un espejo giratorio R , formando una imagen de la rendija en el espejo distante M , que está en reposo. El rayo se refleja en dicho espejo y vuelve por el camino original, pero ahora el espejo R ha girado un ángulo θ y el rayo, al reflejarse en este espejo, se desvía 2θ y veremos la imagen de la rendija original en el anteojo.



Conociendo la velocidad de giro del espejo

cuando vemos la luz por el anteojo se puede hallar su velocidad. Foucault determinó que la c valía 300000 km/s, prácticamente el valor actual.

Pero el experimento de Foucault tenía una ventaja enorme: el recorrido de la luz, de tan sólo 5 metros, podía hacerse por un tubo lleno de agua y medir, por primera vez en la historia, la velocidad en un medio transparente. Halló que la velocidad de la luz en el agua era menor, unos 216 000 km/s, por lo que el modelo corpuscular de Newton debía estar equivocado.

En 1905, **Albert Einstein** postuló, en su Teoría de la Relatividad Especial, que la velocidad de la luz en el vacío es constante e independiente de que el foco luminoso y el observador estén en reposo o en movimiento; siendo su valor en el vacío una constante universal.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299\,792\,457 \frac{m}{s}$$

7 Índice de refracción

La luz viaja siempre más despacio en cualquier otro medio que no sea el vacío. Para referir a qué velocidad viaja la luz en un medio no se suele usar su valor directamente, sino la relación entre esa velocidad, v , y c , la velocidad de la luz en el vacío.

El índice de refracción, n , de un medio transparente es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío, c , y la velocidad, v , que tiene la luz en dicho medio material.

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

El índice de refracción de un medio es una **magnitud escalar** y un **número adimensional** y como $v \leq c$ (el igual es para el propio vacío o para el aire, en el que la velocidad de la luz es casi c) su valor será **siempre mayor que 1**.

La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todas las longitudes de onda, pero su velocidad en los medios materiales depende de las propiedades del medio.

Como $v = \lambda \cdot f$, resulta que el índice de refracción de un medio depende de la longitud de onda de la luz, ya que la frecuencia permanece constante por ser característica del foco emisor. Por eso, los índices de refracción de un medio se miden para una determinada longitud de onda, siempre la misma, y la referencia es la luz amarilla del sodio, cuya longitud de onda en el vacío es $\lambda_{Na} = 589 \text{ nm}$.

Tabla de índices de refracción (para $\lambda = 589 \text{ nm}$)

Al no cambiar la frecuencia, el índice de refracción coincide también con la relación entre la longitud de la onda en el vacío λ_0 y en ese medio λ :

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

Sustancia	n
Vacío	1 (exacto)
Aire (0 °C, 1 bar)	1,0002926
Hielo	1,309
Metacrilato	1,491
Agua (20 °C)	1,333
Cuarzo	1,544
Diamante	2,417
Alcohol etílico (etanol)	1,361
Glicerina (glicerol)	1,4729
Vidrio Pirex®	1,470
Tetracloruro de carbono	1,460

8 Reflexión y refracción de la luz

Cuando un rayo luminoso incide en la superficie de separación de dos medios distintos según el principio de Huygens, los puntos de esa interfase se convierten en focos emisores de ondas secundarias, que salen en todas direcciones. Una parte vuelve al medio originario (reflexión) y otra cambia de medio y pasa a propagarse a una velocidad distinta (refracción).

Se denomina rayo incidente a aquel que representa la luz que incide sobre la superficie, rayo reflejado al que representa la fracción de energía luminosa reflejada y rayo refractado al que representa la fracción de energía que se propaga por el nuevo medio. Recuerda que los rayos son perpendiculares a los frentes de onda.

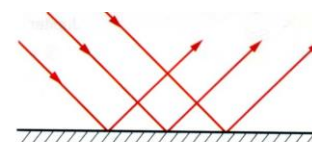
8.1 Reflexión:

Se puede demostrar experimentalmente que:

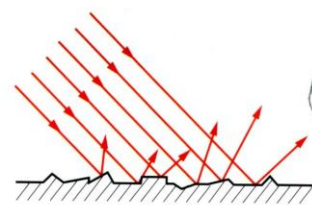
- El rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano llamado plano de incidencia.
- El ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales. Esto es lo que se conoce como ley de la reflexión.

Cuando un rayo de luz consta de varios rayos e incide sobre una superficie lisa, similar a un espejo, se refleja, como indica la figura, y todos los rayos reflejados son paralelos. La reflexión de la luz desde ese objeto liso se llama **especular**. Si la superficie reflectora es rugosa, la superficie reflejará los rayos en diferentes direcciones. Se conoce como reflexión **difusa**. Esto nos permite ver las superficies de objetos que no emiten luz propia y que de otra manera no percibiríamos. Una superficie se comportará como una superficie pulida si las variaciones superficiales son pequeñas en comparación con la longitud de onda incidente.

Consideremos los dos tipos de reflexión que pueden observarse desde una superficie de la carretera mientras se conduce un coche en la noche. Cuando está seca y rugosa la luz que proviene de otros vehículos que se aproximan se dispersa fuera de la carretera en diferentes direcciones, haciendo el camino claramente visible. En una noche lluviosa, las irregularidades del camino se llenan de agua, haciendo la superficie pulida. La reflexión resultante es especular y dificulta la visión del camino. En nuestros ejemplos hablaremos siempre de reflexión especular.



Una superficie se comportará como pulida si las variaciones superficiales son pequeñas en comparación con la longitud de onda de la onda incidente.



En una superficie rugosa, la reflexión es difusa.

8.2 Refracción

Cuando la luz pasa de un medio con índice de refracción n_1 a otro con índice n_2 sufre una desviación en su trayectoria, debido al cambio de velocidad de la luz en ese medio. Según lo que vimos en ondas la ley de la refracción (ley de Snell) es:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}}; v_1 \cdot \text{sen } \hat{r} = v_2 \cdot \text{sen } \hat{i}$$

El rayo refractado se acercará a la normal si la velocidad del segundo medio es menor, mientras que se alejará de la normal si la velocidad del segundo medio es mayor. Podemos escribir la ley anterior en función de los índices de refracción, que será más útil para nosotros:

$$\frac{c}{n_1} \cdot \text{sen } \hat{r} = \frac{c}{n_2} \cdot \text{sen } \hat{i}; n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$$

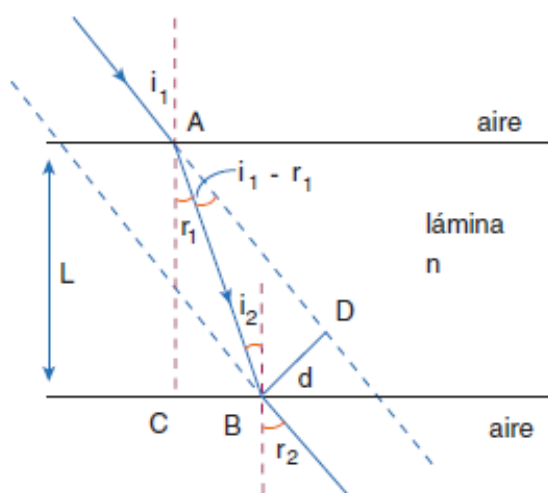
Expresión que usaremos a partir de ahora para la luz y que se recuerda muy bien, pues cada índice multiplica a su ángulo con la normal. Según esa expresión, si al pasar de 1 a 2 aumenta el índice de refracción (como en el caso aire-agua), para que se cumpla la igualdad, debe disminuir el ángulo (si $n_1 < n_2$, $i > r$, el rayo se acerca a la normal, como ya sabíamos).

8.3 Ejemplo de refracción: Paso de la luz a través de una lámina de caras planas y paralelas

Supongamos un haz de luz que incide oblicuamente sobre una plancha de metacrilato de cierto grosor, de caras planas y paralelas. Calculemos el desplazamiento que sufre el haz al salir de la lámina. Se producen dos refracciones, una al entrar en la lámina y otra al salir de ella. Aquí se hace un tratamiento teórico, pero es más sencillo hacer un ejercicio, **el 14.- del tema de editex, por ejemplo**:

Un rayo de luz atraviesa una lámina, de 5 cm de espesor, de un material transparente de índice refracción $n=1,4$. Deduce que el rayo que emerge de la lámina es paralelo al rayo incidente. Calcula el desplazamiento que ha experimentado el rayo emergente respecto del rayo incidente cuando el ángulo de incidencia es de 30° .

S: 0,84 cm



CASO GENERAL: Un rayo de luz atraviesa una lámina transparente de un material de índice de refracción n que tiene una anchura L con un ángulo de incidencia con la normal i_1 . A consecuencia de la refracción, el rayo que emerge por la lámina se ha desplazado una distancia paralela a la dirección de incidencia d . Demuestra que el ángulo de salida es idéntico al de entrada, r_2 , y halla el desplazamiento del rayo final con respecto al inicial, d .

Solución: El haz de luz para atravesar la lámina debe experimentar dos refracciones:

1ª refracción: $1 \cdot \text{sen } i_1 = n \cdot \text{sen } r_1$

2ª refracción: $n \cdot \text{sen } i_2 = 1 \cdot \text{sen } r_2$

Pero si observamos la figura r_1 y i_2 son ángulos opuestos y por tanto iguales. $r_1 = i_2$. Entonces el

segundo miembro de la primera ecuación y el primer miembro de la segunda ecuación son iguales y podemos igualarlas.

$1 \cdot \text{sen } i_1 = 1 \cdot \text{sen } r_2$, donde queda demostrado que $i_1 = r_2$

Para hallar el desplazamiento de la dirección de la luz incidente (d) tenemos 2 triángulos rectángulos que comparten hipotenusa, el triángulo ACB y el ADB. La hipotenusa común la podemos calcular del triángulo ACB:

$$AB \cdot \cos r_1 = L; AB = \frac{L}{\cos r_1}$$

Con ese valor de la hipotenusa podemos calcular d en el otro triángulo ADB, si observamos que el ángulo superior, el A, es $i_1 - r_1$, con lo que d será:

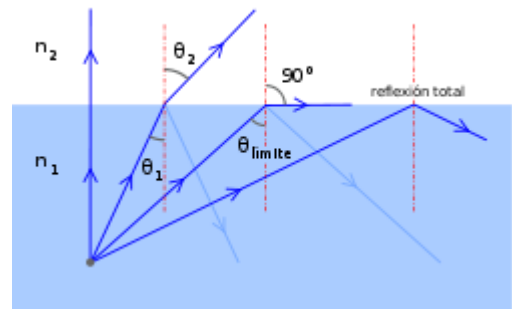
$$d = AB \cdot \cos(i_1 - r_1) = \frac{L}{\cos r_1} \cdot \cos(i_1 - r_1)$$

El valor de r_1 puede ser calculado con la 1ª refracción: $\text{sen } r_1 = \frac{\text{sen } i_1}{n}$

9 Ángulo límite y reflexión total

Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro con menor índice de refracción (como en la figura, siendo $n_1 > n_2$), se refracta alejándose de la normal ($n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$. Si $n_1 > n_2$, $\text{sen} \theta_1 < \text{sen} \theta_2$ y como el seno es una función creciente en el primer cuadrante, $\theta_1 < \theta_2$, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia).

Si vamos aumentando el valor de θ_1 como se ve en la figura lateral, θ_2 irá aumentando pudiendo llegar a los 90° , momento en el cual volvería a entrar en el medio incidente (ya no habría refracción, **cambio de medio**, sólo se produciría **reflexión**). Cuando esa situación ocurre decimos que se ha producido la **reflexión total**.



El efecto de la reflexión total consiste en que a partir de un determinado ángulo incidente (denominado ángulo límite), cuando la luz pasa de un medio con mayor n a otro con menor n , no se produce refracción, sólo reflexión, porque el ángulo de refracción sería mayor de 90° y eso sería imposible, ya no sería refracción (vuelve al medio original).

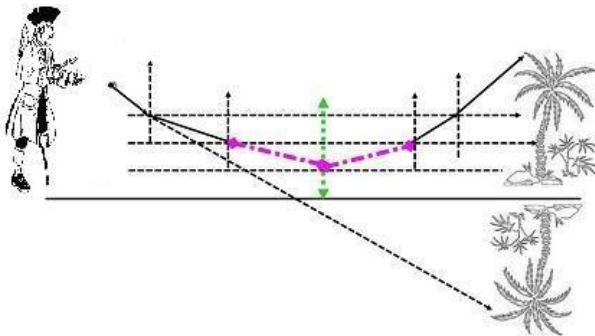
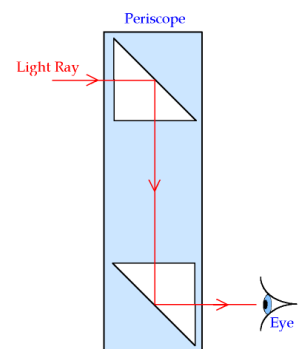
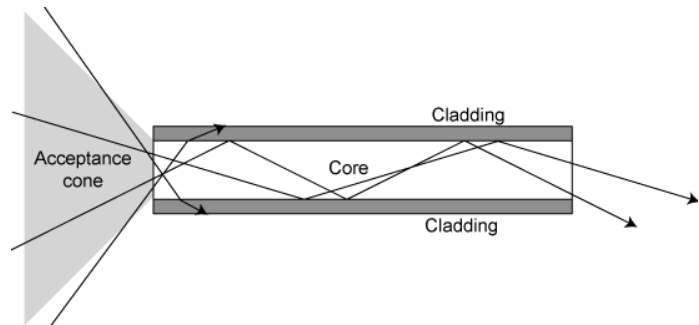
El ángulo de incidencia a partir del cual ocurre la reflexión total se denomina **ángulo límite o crítico**. Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo límite, la luz se refleja totalmente, sólo se produce reflexión. El **ángulo límite** se puede calcular hallando para que ángulo de incidencia se corresponde un ángulo de refracción de 90° .

$$n_1 \text{sen} \theta_{\text{limite}} = n_2 \text{sen} 90^\circ; \text{sen} \theta_{\text{limite}} = \frac{n_2}{n_1}$$

IMPORTANTE: La reflexión total solo puede ocurrir cuando la luz pasa de un medio de mayor índice de refracción a otro de menor índice de refracción.

Este efecto tiene muchas **aplicaciones prácticas**:

- se utiliza en **fibra óptica** para conducir la luz a través de la fibra sin pérdidas de energía. En una fibra óptica el material interno tiene un índice de refracción más grande que el material que lo rodea. Si el ángulo de incidencia de la luz está dentro del "acceptance cone" se produce una reflexión interna total que preserva la energía transportada por la fibra.
- El **periscopio** o los prismáticos. Cuando un rayo de luz incide entra perpendicularmente por la cara menor de un prisma con forma de triángulo rectángulo, como los de la figura, no sufre refracción (al ser 0° su ángulo incidente) y al llegar a la cara mayor, a la hipotenusa, su ángulo de incidencia con la normal será 45° . Si suponemos que al otro lado de la cara hay aire ($n=1$) y el n típico del vidrio es $1,5$, su ángulo límite será $\text{sen} \theta_{\text{limite}} = 1/1,5$, $\theta_{\text{limite}} = 42^\circ$. 45° producirán reflexión total y si colocamos otro en la parte superior podremos usarlo como periscopio. Se suelen emplear prismas en lugar de espejos porque los espejos se deslustran y se oxida su parte metálica, la cara trasera que lo hace reflejarse, mientras que en el prisma no hay ese problema.



- **Los espejismos** ¿Por qué puede verse mojada la carretera al mirar al horizonte? Cuando hace calor, la temperatura del asfalto es muy alta y eso hace que las capas de aire en contacto con la carretera tengan menor densidad, al estar más calientes. Su índice de refracción será menor, más parecido al del vacío, por lo que el rayo de luz, en su camino hacia la carretera, pasa de una capa de aire con mayor n a otra con menor n , aumentando su ángulo de refracción hasta llegar a reflexión total, momento en el

que el rayo empieza a subir aumentando cada vez el ángulo hasta llegar al que lo ve. El cerebro cree que como el rayo viene de abajo habrá algún objeto en la carretera que hará que la imagen se refleje, y se puede imaginar el agua. Este es el mismo fenómeno que en los espejismos. Los rayos de luz son refractados al entrar en contacto con el tórrido suelo y lo que se está viendo es una proyección del cielo y no una laguna con agua.

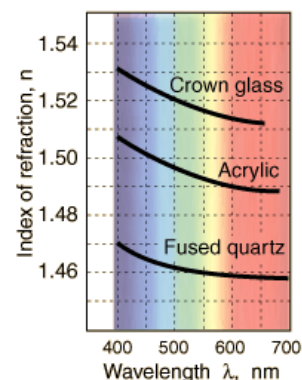
10 Dispersión de la luz

En 1666, Newton observó que cuando se hacía pasar un rayo de luz solar a través de un prisma triangular de vidrio, aquel se descomponía en un conjunto de valores que denominamos **espectro de la luz blanca** (o **espectro continuo**, a diferencia de los **espectros atómicos**). De esta manera demostró que la luz solar (luz blanca) es una composición de ondas de distinta frecuencia. El efecto que provocan en la retina las distintas frecuencias origina la sensación de color.

La explicación es la siguiente: en el vacío todas las radiaciones se propagan con la misma velocidad, pero cuando un rayo de luz, formado por radiaciones de distinta longitud de onda, accede a un medio material, cada radiación simple se propaga con distinta velocidad y por tanto con un índice de refracción n distinto. Por ello, cada luz elemental se difracta un ángulo diferente y como consecuencia se separan unas de otras.

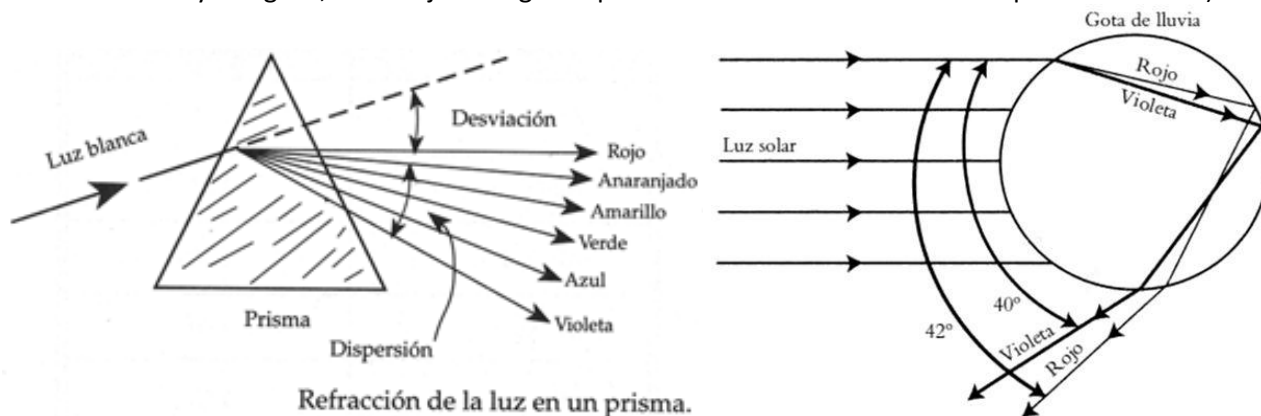
Llamaremos dispersión de la luz a la separación de un rayo de luz en sus componentes monocromáticas debido a su diferente índice de refracción cuando atraviesan un medio (como un prisma).

La longitud de onda y la velocidad de propagación en un medio material es mayor para la luz roja que para la luz violeta. Por ello, el índice de refracción del prisma es menor para la luz roja que para la luz violeta



$$n_{\text{rojo}} < n_{\text{violeta}}$$

y por tanto el rayo violeta se refracta menos que el rojo (el rojo sale más lejos de la normal y por tanto más cerca del rayo original, la luz roja emerge del prisma con una desviación menor que la luz violeta).

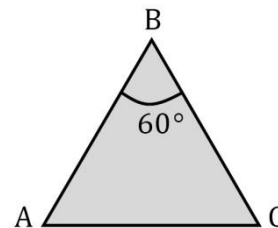


Refracción de la luz en un prisma.

Este fenómeno ya había aparecido indirectamente cuando indicábamos que el índice de refracción $n=c/v$, dependía de la longitud de λ . Cada longitud de onda tiene una velocidad distinta en el medio y por tanto una n distinta, que hace que se refracte con distinto ángulo. Como a mayor n , menor ángulo de refracción ($1 \cdot \sin \theta_i = n \cdot \sin \theta_{\text{refractado}}$) y el menor ángulo se alcanza con menor λ , podemos relacionar que a menor λ mayor n (o a mayor λ menor n). También podemos relación λ con su velocidad en el medio, observando que a menor λ menor velocidad.

Veamos 2 ejemplos de dispersión de la luz:

- El **arco iris**, que se forma por la dispersión de luz solar debida a la refracción de esta dentro de las gotas de agua suspendidas en el aire tras la lluvia. Para poder observarlo es necesario tener el Sol a nuestras espaldas, como se muestra en la figura superior derecha.
- El **prisma óptico**. Un prisma óptico es un dispositivo formado por dos superficies planas que forman entre sí un ángulo α (un prisma triangular).



11 Absorción selectiva. El color

Cuando la luz llega a un material obliga a los electrones de los átomos a oscilar. Las frecuencias naturales de los electrones dependen de la naturaleza de los distintos átomos; hay átomos cuyos electrones están

más ligados y otros en los que por el contrario están más libres. Al incidir la luz sobre un material, los electrones de sus átomos empiezan a oscilar. Están en “estado excitado”. En este estado solo pueden estar nanosegundos. Pueden ocurrir dos cosas: que transfieran su energía por colisiones con átomos vecinos o que la reemitan en forma de fotón y vuelva a su estado original. Parte de la energía incidente se transforma en interna por las colisiones de unos átomos con otros (por eso la luz calienta los objetos) y parte vuelve a ser emitida (y por eso vemos el objeto), con lo que la energía reemitida que emerge siempre será menor que la incidente. Este fenómeno se conoce como **absorción**. (Lo veíamos en ondas).

Los colores de los objetos: Los mecanismos de observación del color pueden ser de dos tipos: por reflexión (materiales opacos) y por transmisión (materiales transparentes).

Cuando un material iluminado con luz blanca presenta un determinado color es porque ha absorbido todas las demás radiaciones, salvo la correspondiente a ese color, que, o bien es reflejada, si el material es opaco, o transmitida por el material hasta aparecer por el lado opuesto, si es transparente. A este proceso se le llama absorción selectiva.

Si un material refleja todas las radiaciones del espectro visible será percibido como blanco, mientras que si las absorbe todas se verá negro. (¿Cómo interesa que sea una camiseta en verano? ¿O cual es el mejor color para el coche en esa época del año?)

Pero esto no es tan sencillo. Debemos tener en cuenta lo que se llama mezcla aditiva de los colores de la luz. La luz blanca surge de combinar la luz roja, la azul y la verde. Un material que solo absorba el azul, reflejará el rojo y el verde, es decir, el amarillo. Si cogemos un papel celofán amarillo, absorberá el azul y dejará pasar el rojo y el verde (y por eso vemos el celofán amarillo). Si observamos a través de ese celofán un objeto azul lo veremos negro ya que el objeto absorbe todos los colores menos el azul, pero ese azul no nos llega a nosotros, porque habrá sido absorbido por el celo, y por eso veremos el objeto negro.



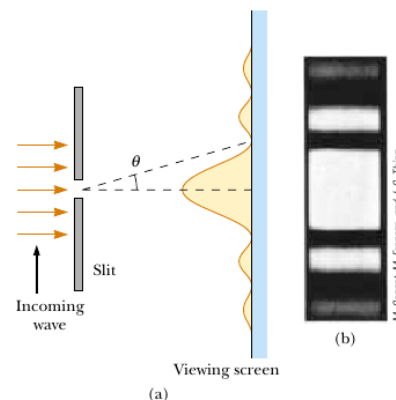
12 Difracción de la luz

La luz, como cualquier onda, sufre el fenómeno de la difracción cuando un rayo se encuentra un obstáculo o pasa por una rejilla de un tamaño cercano a su longitud de onda.

Supongamos un haz de rayos paralelos de luz que atraviesan una estrecha rendija paralela al frente de onda incidente. En la pantalla debería aparecer una zona iluminada semejante a la rendija. Sin embargo aparece una ancha franja central brillante y a los lados otras franjas más estrechas y no tan brillantes y alternadas con franjas oscuras.

Esto puede interpretarse a partir del principio de Huygens: cada punto de la rendija se convierte en emisor de ondas elementales en fase que interfieren entre sí. Como vemos, la difracción no es más que un caso particular de interferencias. Para que los efectos de difracción sean observables el tamaño de la abertura debe ser comparable a la longitud de onda.

Esto es lo que permite a movimientos ondulatorios con longitudes de onda grandes como el sonido (su longitud de onda puede coincidir con el tamaño de una puerta) sortear obstáculos y por eso podemos oír música al otro lado de una puerta. Sin embargo las ondas luminosas tienen poca longitud de onda (visible entre 380 y 780 nm) y las rendijas u obstáculos han de ser muy pequeños para que se produzca el fenómeno.



13 Polarización de la luz

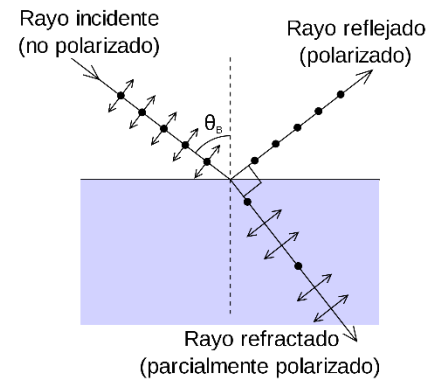
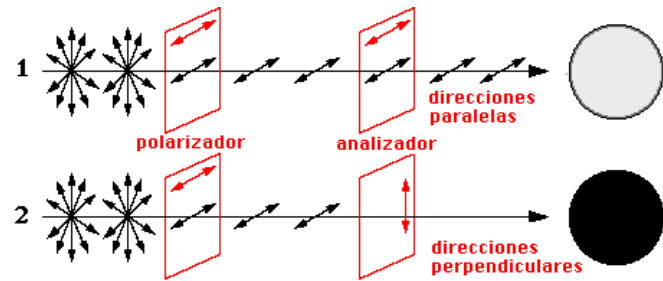
Los fenómenos de interferencia muestran la naturaleza ondulatoria de la luz. El fenómeno que veremos ahora, la polarización, nos indica que ésta es una onda transversal.

En general, las ondas electromagnéticas no están polarizadas, lo que quiere decir que el campo magnético y el campo eléctrico pueden vibrar en cualquiera de las infinitas direcciones que son perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas. Se produce el fenómeno de la polarización cuando se consigue que la vibración de las ondas se realice en una dirección determinada.

Un haz de luz está polarizado linealmente cuando las vibraciones del campo eléctrico se producen siempre en la misma dirección.

El **plano de polarización** de una onda electromagnética polarizada linealmente es el que determinan la dirección de propagación y la dirección de vibración del vector campo eléctrico.

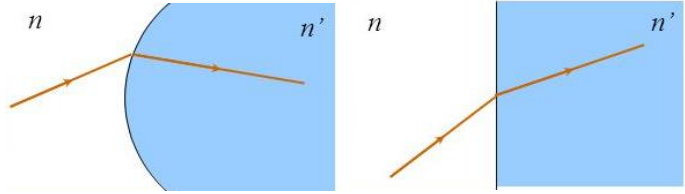
En 1938, el inventor americano Land descubrió un material formado por finas láminas que contienen moléculas de hidrocarburos alineadas en largas cadenas. Se llamó **polaroide o polarizador** y es capaz de absorber todas las radiaciones luminosas que le llegan salvo aquella cuyo plano campo eléctrico-dirección de propagación es perpendicular a la alineación de las moléculas. Esa luz es transmitida casi íntegramente y por tanto a la salida del polarizador la luz está polarizada. De ahí su nombre. A esta dirección se le denomina eje de transmisión del filtro. Podemos comprobar este fenómeno poniendo un segundo polarizador a la salida del primero, con el eje de transmisión colocado paralelamente al primero. Veremos luz, pero según vayamos girando este segundo polarizador poco a poco veremos cada vez menos intensidad de luz hasta llegar a la completa oscuridad debido a que el segundo polarizador no deja pasar nada de la luz polarizada que sale del primero cuando ambos están colocados con sus ejes de transmisión perpendiculares. También se produce **polarización por reflexión**. El escocés Brewster descubrió, en el siglo XIX, que al reflejarse la luz sobre la superficie pulimentada de un vidrio el rayo reflejado está polarizado linealmente cuando formaba un ángulo de 90° con el rayo refractado.



ÓPTICA GEOMÉTRICA. Unidad 8 de EDITEX**1 Definiciones:**

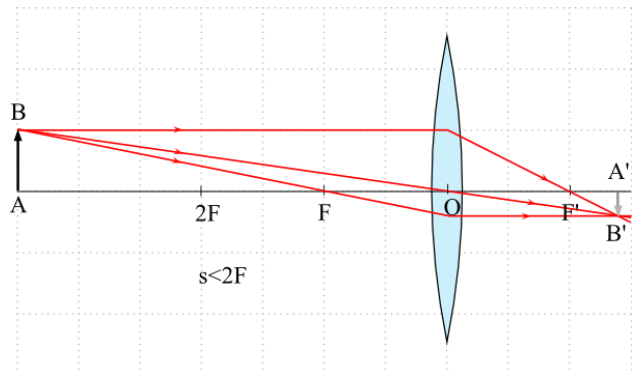
La **óptica geométrica** se basa en usar reiteradamente las leyes de la reflexión y la refracción de la luz para hallar el camino de los rayos al atravesar distintos medios ópticos y poder predecir cómo veremos los objetos a través de los distintos aparatos ópticos (espejos, lentes, etc).

Sólo usa las leyes anteriores y ninguna otra propiedad de la luz, por lo que sus conclusiones son generales e independientes de la naturaleza de la misma. En ella se usa como medio general para hacer la refracción de la luz el conocido como **dioptrio**, que es **toda** superficie que separa 2 medios transparentes y homogéneos con distinto índice de refracción. Si la superficie es plana, el dioptrio es plano, y si la superficie es esférica, el dioptrio es esférico. En los dioptrios esféricos, se denomina centro de curvatura al centro del casquete esférico, y radio de curvatura a cualquier radio del casquete esférico. Se usa para hacer las demostraciones de las ecuaciones de óptica. Nosotros no lo veremos.



Nosotros estudiaremos básicamente las lentes delgadas y usando sus propiedades definiremos las magnitudes principales empleadas en óptica geométrica.

Supongamos un objeto representado en nuestro esquema por el segmento AB. El objeto siempre se colocará verticalmente y su base está en una línea horizontal que pasa el centro de curvatura de la lente. A esa línea se le denomina **eje principal o eje óptico**. Llamaremos **vértice** al punto origen O del sistema, que es el punto de corte del elemento (espejo, dioptrio o lente) con el eje óptico.



A través del sistema óptico se mueven los rayos luminosos, que **son reversibles en su propagación** (se propagan igual en un sentido que en el opuesto) e **independientes entre sí** (su propagación no se altera al cruzarse con otro rayo).

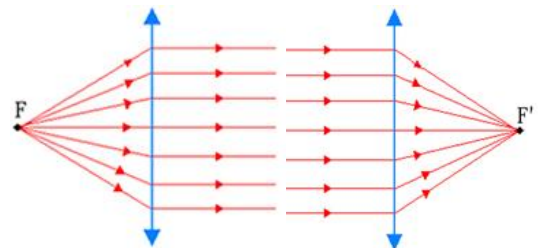
Para construir la **imagen** de un **objeto** podríamos trazar rayos de luz desde cualquiera de los puntos que lo forman, pero con acotar el recorrido de los rayos que salen de su extremo B nos valdrá.

Si todos los rayos que parten de un **punto objeto** confluyen en uno solo tras atravesar el sistema óptico el sistema es **estigmático** (que son los que estudiaremos nosotros). El punto donde confluyen es el **punto imagen**. Cuando no todos los rayos se cruzan en el mismo punto se produce una **aberración**, que impide observar la imagen con nitidez.

En nuestro ejemplo, los 3 rayos (representados por líneas rojas) que salen de B convergen en B'. Ese será el punto imagen de B. La imagen será A'B' (cualquier rayo que salga de A siguiendo el eje óptico atravesará sin desviarse y por tanto A' siempre estará en el mismo eje óptica, en la vertical de B').

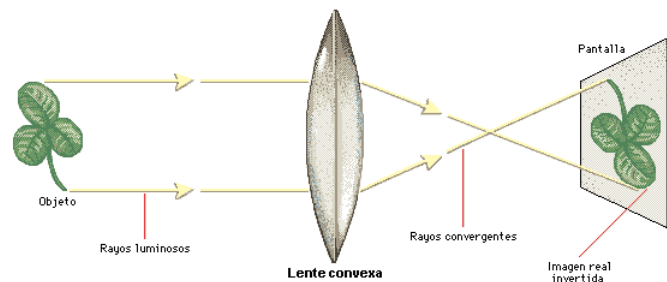
En nuestro ejemplo hemos empleado una lente convergente, que al igual que el resto de los elementos ópticos tienen 2 puntos muy singulares:

- **Foco imagen F'**: punto del eje donde confluyen los rayos que procedentes del infinito y propagándose paralelos al eje óptico han atravesado el sistema.
- **Foco objeto F**: punto del eje óptico del que parten rayos que al atravesar el sistema se propagan paralelos al eje óptico (formarían su imagen en el infinito).
- **Distancia focal objeto f**: la mínima distancia que hay desde el vértice del sistema al foco objeto.
- **Distancia focal imagen f'**: la mínima distancia que hay desde el vértice del sistema al foco imagen.



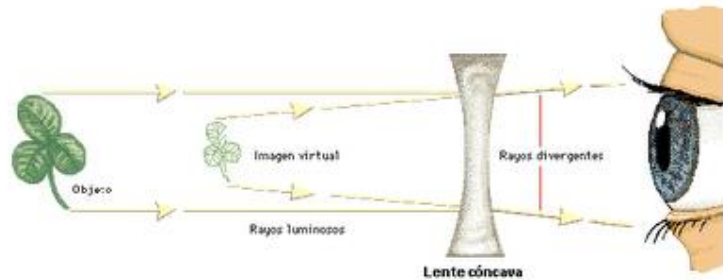
Por eso hemos trazado esos 3 rayos en nuestro ejemplo. El rayo que sale paralelo al eje óptico pasa por F', el rayo que pasa por el centro óptico no sufre desviación (como la lente es delgada se comporta en su centro como una lámina plano-paralela y no altera el ángulo de salida) y el tercero al pasar por el foco objeto F sale paralelo al eje óptico al atravesar la lente (también se podría justificar por la reversibilidad de los rayos. Si imaginamos un rayo que sale de B' hacia la lente iría paralelo al eje óptico y por tanto debe converger en un punto, el F).

Cuando todos los rayos luminosos que salen de un punto B convergen en un punto después de atravesar el elemento óptico, se dice que B' es la **imagen real** del punto B y a la imagen formada A'B' se le llama **imagen real**. Una imagen real se puede proyectar en una pantalla. Pero a veces ocurrirá que los todos los rayos que salen del punto B divergen después de atravesar el elemento óptico y sus prolongaciones son las convergen en el punto B', se dice que B' es la **imagen virtual** del punto B. A la imagen A'B' se le denomina virtual, porque no es real, no puede proyectarse. Sin embargo, nuestro ojo (nuestro cerebro) sólo sabe que la propagación de la luz es recta (tus dedos van en línea recta a los que ves que quieres tocar) y por tanto si recibe unos rayos de luz divergentes, él los prolongará en línea recta para ver el objeto. El ojo puede ver imágenes virtuales (de hecho, la imagen del espejo del baño es virtual)



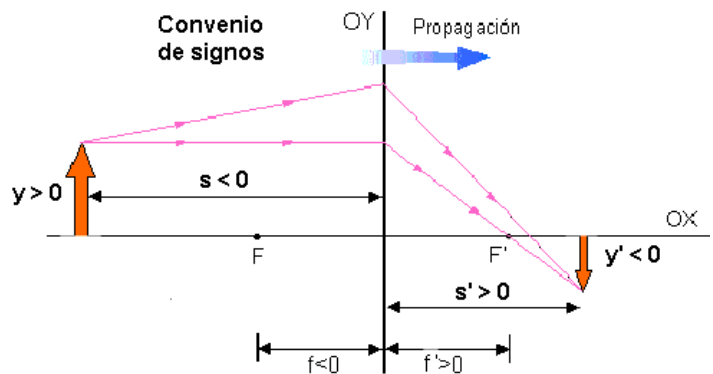
Características de una imagen:

- **Imagen real e imagen virtual:** Es real si se forma al hacer concurrir en un punto, rayos que convergen procedentes de un objeto. Es virtual si los rayos procedentes del objeto divergen y es su prolongación la que concurre en un punto.
- **Aumento lateral:** cociente entre el tamaño de la imagen partido por el tamaño del objeto. $M_l = y'/y$
- **Imagen derecha e imagen invertida:** Es derecha si está en la misma orientación del objeto, invertida si su orientación es la contraria.



Convenio de signos (norma DIN):

1. Tanto los objetos como sus imágenes se representan mediante flechas. Dichas flechas comienzan en el punto A (situado en el eje óptico y que no sufre ninguna desviación al pasar por el sistema óptico) y el punto B, la punta de la flecha.
2. Las magnitudes referidas a la imagen se identifican con el mismo signo que las del objeto añadiéndoles el signo "prima" '. Así, los puntos anteriores, tras pasar por el sistema óptico, serán A' y B'.
3. La luz incide desde la izquierda y se propaga hacia la derecha.
4. Las distancias medidas hacia la izquierda del vértice del sistema óptico (de la superficie o lente), en una dirección opuesta a la propagación de la luz, se consideran NEGATIVAS. Las distancias medidas hacia la derecha de ese vértice son POSITIVAS (como en un sistema de ejes cartesianos).
5. En la dirección vertical, las magnitudes por encima del eje son POSITIVAS, las magnitudes por debajo del eje son NEGATIVAS (igual que en ejes cartesianos).
6. Los rayos que se utilizan para construir las imágenes son rayos paraxiales, es decir, que el ángulo que forman con el eje óptico es tan pequeño que se pueden sustituir los valores de los senos y las tangentes por el valor del ángulo expresado en radianes.



2 Espejo plano:

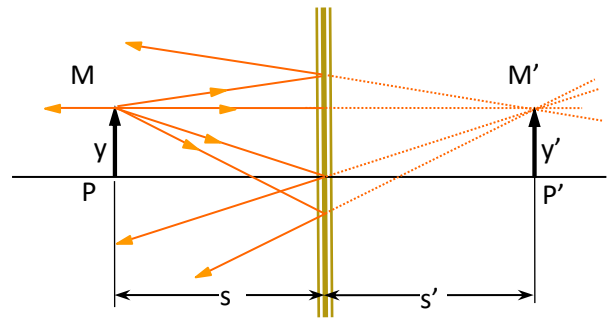
En un espejo plano, los rayos se reflejan y divergen tras incidir en su superficie. Un observador situado en P observa los rayos como procedentes de P', punto donde convergen las prolongaciones de los rayos divergentes. Por eso los espejos planos forman imágenes VIRTUALES.

$$s' = -s; M_L = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} = 1 \quad y' = y \text{ AUMENTO LATERAL}$$

Como no podemos dibujar el foco, por estar en ∞ , tomamos dos rayos cualesquiera: Uno a la altura de M que se refleja sobre sí mismo y otro que partiendo de M incide en el vértice del espejo, reflejándose con el mismo ángulo de incidencia.

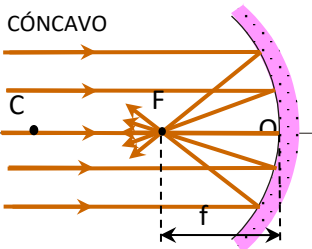
Las prolongaciones de ambos coinciden en M', dando la altura del objeto virtual.

Considerando el esquema geométricamente obtenemos que se forma una imagen a la misma distancia del espejo (al otro lado) y de igual tamaño.



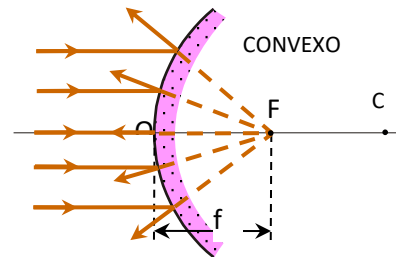
3 Espejo esférico:

3.1 Tipos de espejos esféricos



a) Espejo cóncavo: los rayos de luz inciden por la cara cóncava, el radio tiene signo negativo, puesto que el centro se sitúa a la izquierda del vértice. $r < 0$.

b) Espejo convexo: los rayos de luz inciden por la cara convexa y se reflejan divergiendo, el radio tiene signo positivo (centro situado a la derecha del vértice).



$r > 0$.

3.2 Fórmulas del espejo esférico:

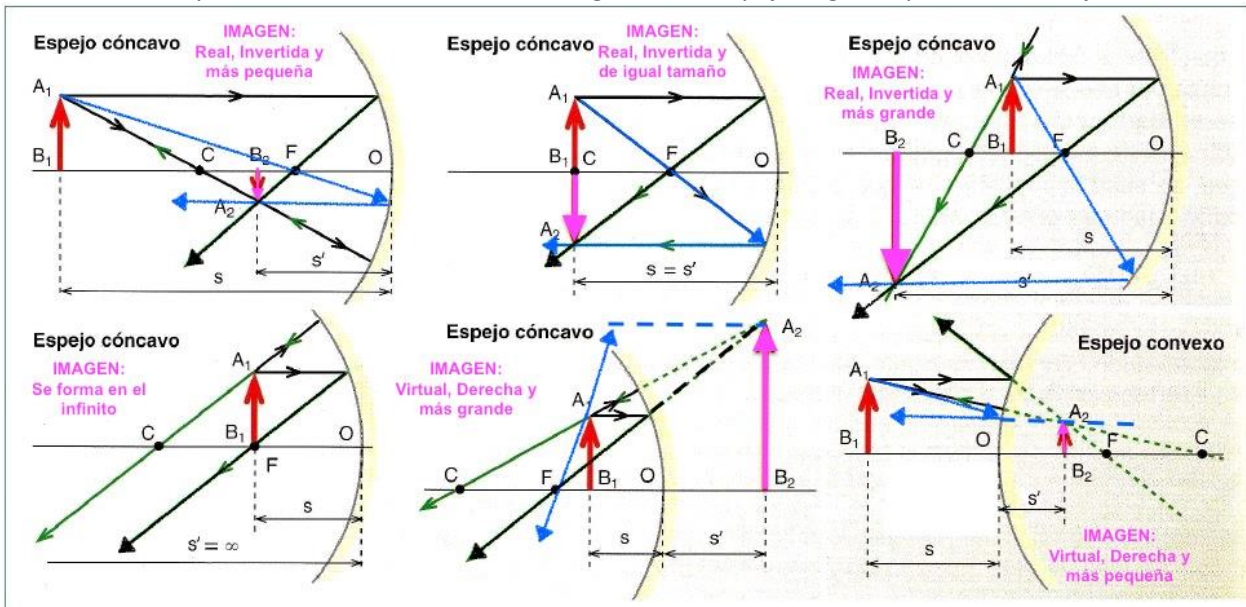
En el caso de los espejos esféricos ambos focos coinciden ($F=F'$, $f=f'$, FOCO OBJETO=FOCO IMAGEN) y se encuentran en la mitad del radio de curvatura del espejo.

Distancia focal imagen: $f' = \frac{r}{2}$ Distancia focal objeto: $f = \frac{r}{2}$

Fórmula principal: $\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}$; Aumento Lateral: $M_L = \frac{y'}{y} = -\frac{f \cdot s'}{f' \cdot s} = -\frac{s'}{s}$

3.3 Construcción de imágenes

Trazaremos 3 rayos: Casos de formación de la imagen en un espejo según la posición del objeto



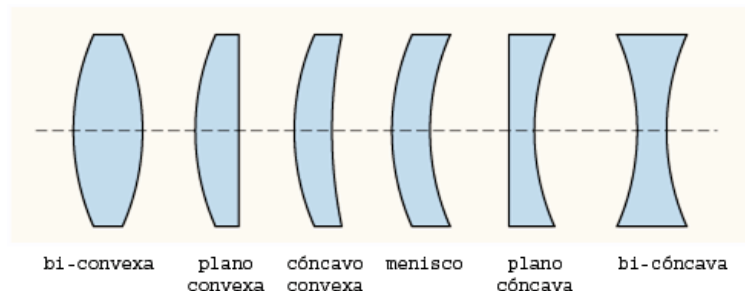
- Un rayo que discurra paralelo al eje óptico y tras reflejarse en el espejo pasará por el foco, en un espejo cóncavo, o se reflejará y su prolongación pasará por el foco, en uno convexo. Rayo de color negro en las figuras.
- Un rayo que se dirige al centro del sistema, C, no sufre desviación, en un espejo cóncavo, o se refleja en la misma dirección en uno convexo, debido a que incide en dirección normal. Es el rayo verde en las figuras.
- Un rayo que se dirige al foco y tras incidir sobre el sistema saldrá paralelo al eje. Es el rayo azul.

Como resumen vemos que:

- En los espejos cóncavos, la imagen es real e invertida (menor, igual o mayor que la posición del objeto con respecto al centro del espejo), no la hay si está en F y a partir de ahí la imagen es derecha, virtual y mayor. (los verás en los baños de los hoteles para el maquillaje o afeitado).
- En los espejos convexos, la imagen siempre es virtual, derecha y más pequeña (los verás en intersecciones para cubrir un ángulo muy grande).

4 Lentes Delgadas.

Entendemos por lente un sistema óptico formado por dos o más superficies refractoras, siendo al menos una de ellas curva. Llamaremos lente delgada a aquella cuyo espesor (separación entre los dioptrios) es despreciable (esto es, mucho menor que los radios de curvatura).



4.1 Clasificación de las lentes:

Convergentes: Las convergentes, convexas, o positivas son más gruesas en la parte central que en el borde, por lo que tienden a hacer que el rayo se acerque al eje tras atravesar la lente. Hacen converger los rayos incidentes paralelos en el FOCO imagen f' (signo +). **Son las 3 primeras de la figura lateral.**

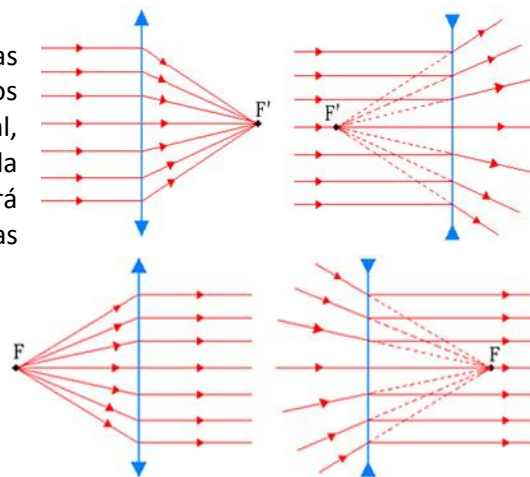
Divergentes: Las lentes divergentes, cóncavas, o negativas son más delgadas en el centro y tienden a hacer que el rayo se aleje del eje conforme pasa a través de la lente. Hacen diverger los rayos paralelos incidentes, siendo sus prolongaciones las que convergen en el punto focal imagen f' (situado a la izda. del centro, signo -). **Son las 3 últimas de la figura lateral.**

4.2 Elementos de una lente:

Centro óptico: Centro geométrico de la lente, situado en el origen de coordenadas. Todo rayo que pasa por él no sufre desviación

Foco imagen F' : Es el punto donde convergen, realmente en las lentes convergentes y sus prolongaciones en las divergentes, los rayos incidentes cuya dirección es paralela al eje principal, después de pasar por la lente. La distancia focal imagen f' es la distancia que hay entre el foco imagen y el centro óptico. Será $f' > 0$ (derecha) en las convergentes y $f' < 0$ (izquierda) en las divergentes.

Focos objeto F : Los rayos incidentes que pasar por él, realmente (en las convergentes) o sus prolongaciones (en las divergentes) salen de la lente paralelos al eje principal. La distancia focal objeto f es la que hay entre el foco objeto y el centro óptico. Será $f < 0$ (izquierda) en las convergentes y $f > 0$ (derecha) en las divergentes.



Potencia de una lente: Es la inversa de la distancia focal imagen. $P = \frac{1}{f'}$. se expresa en dioptrías si la distancia focal está en metros.

4.3 Casos de formación de la imagen en una lente según la posición del objeto

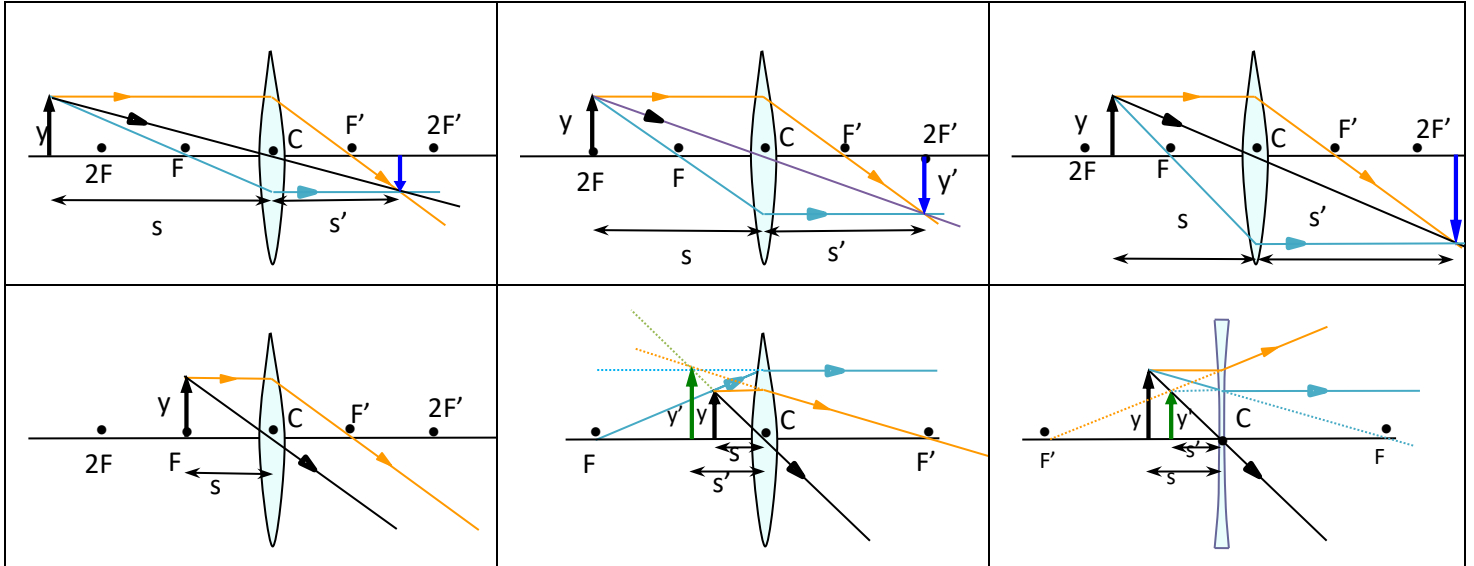
Para formar la imagen hallamos la intersección del rayo paralelo y el rayo radial. El rayo focal comprueba dicha intersección.

Rayo paralelo: Rayo paralelo al eje óptico que se refracta en la lente convergiendo a F' (convergentes) o divergiendo como si saliese de F' (divergente). **NARANJA.**

Rayo radial: Rayo que incide sobre el centro óptico y no sufre desviación. NEGRO.

Rayo focal: Rayo que pasa por el foco objeto F de la lente y se refracta saliendo paralelo al eje óptico (convergente) o apunta a F' y al pasar por la lente sale paralelo al eje y trazaremos su prolongación (divergente). AZUL.

Clase de lente	Situación del objeto	Características de la imagen
Convergente	$s > 2f$	Real, menor e invertida
	$s = 2f$	Real, igual e invertida
	$f < s < 2f$	Real, mayor e invertida
	$s = f$	No hay imagen
	$s < f$	Virtual, mayor y derecha
Divergente	En cualquier punto	Virtual, menor y derecha



4.4 Fórmulas para Lentes delgadas.:

Distancias focales: $f' = -f$

Ecuación de Gauss para lentes delgadas: $\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$

La potencia de la lente es la inversa de la distancia focal imagen, se mide en dioptrías si la distancia está en metros.

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

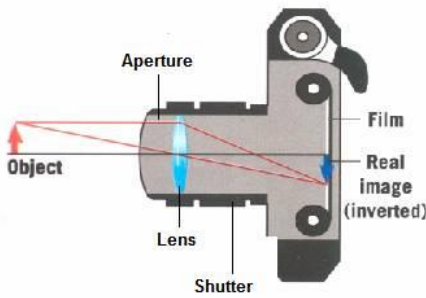
El aumento lateral: $M_L = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$ (Se puede comprobar fácilmente mediante el rayo que pasa por el centro óptico).

Resumen de las relaciones más importantes de dioptrios, espejos y lentes.

	Fórmula Fundamental	Foco objeto	Foco imagen	Aumento Lateral
Espejos esféricos	$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}$	$f = \frac{r}{2}$	$f' = \frac{r}{2}$	$M_L = -\frac{s'}{s}$
		$f = f'$		
Espejos planos	$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = 0$	$s' = -s$	$f' \rightarrow \infty$	$M_L = 1$
Lentes	$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}$	$f = -f'$		$M_L = \frac{s'}{s}$

5 Instrumentos ópticos

5.1 Cámara fotográfica:



Una cámara fotográfica es una cámara oscura con una lente convergente en el orificio y una placa fotográfica sensible a la luz en su interior. Al abrir brevemente el obturador (apertura circular que deja pasar la luz de tal forma que podemos regular la duración de su apertura, el llamado tiempo de exposición), la luz procedente de un **objeto situado en el infinito forma una imagen nítida, real e invertida en la película situada en el plano focal de la lente.**

Al aproximarse el objeto, para obtener una imagen nítida en la película debe aumentar la distancia entre el objetivo y la película, lo cual se

consigue con el acto de enfocar, que consiste en desplazar lentamente la lente del objetivo hacia delante.

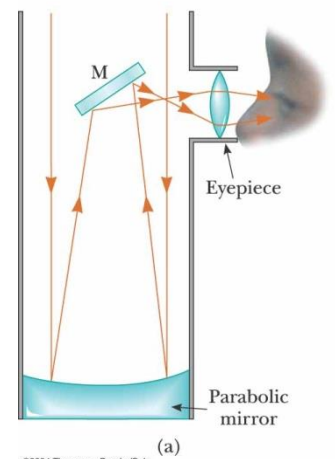
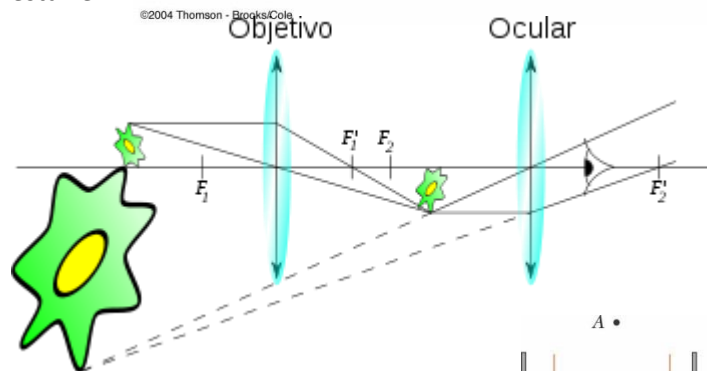
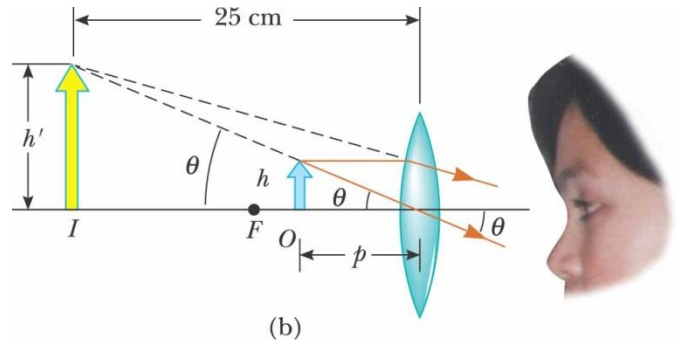
Lupa.

Es simplemente una lente convergente de pequeña distancia focal (entre 5 y 10 cm). Se emplea para ampliar la imagen de pequeños objetos colocados dentro de la distancia focal. El objeto debe estar entre F y O , haciendo que la imagen sea **virtual, derecha y mayor.**

Microscopio.

Para aumentos mayores a los que permite la lupa se recurre al microscopio. Su fundamento está en combinar sabiamente 2 lupas (2 lentes convergentes). Veamos en detalle cómo funcionan las 2 lentes convergentes:

- La más cercana al objeto se denomina **objetivo**, con una **distancia focal pequeña**, tal que el objeto estará entre F_1 y $2F_1$, para que esta lente produzca una imagen **real, invertida y mayor** (1^{er} aumento)
- La lente cercana al ojo se denomina **ocular**, con una **distancia focal grande**, de tal forma que la imagen real de la primera lente sirve como objeto a esta segunda. La imagen de esa primera lente debe situarse entre el foco objeto F_2 del ocular y el ocular, lo que producirá una imagen **virtual, "derecha"** (esta lente deja la imagen invertida porque la primera lente ya la invirtió) y **mayor** (2^o aumento). El ocular se puede regular con un mando para que esto ocurra y el objeto aparezca enfocado.



5.2 Telescopio.

Aunque muchos telescopios usan lentes, nosotros sólo estudiaremos uno muy particular, contruidos con espejos. Se denomina **telescopio reflector** o de **Newton** y el más simple consta de un espejo cóncavo situado en la base de un cilindro. Los rayos paralelos que penetran por el tubo convergen tienden a converger en el foco del espejo en donde se sitúa un espejo plano (espejo secundario) que dirige los rayos hacia el lateral del tubo, (ocular) en donde hay situado una lente (o conjunto de ellas). En este tipo de telescopios, se observa por uno de los laterales.

5.3 El ojo:

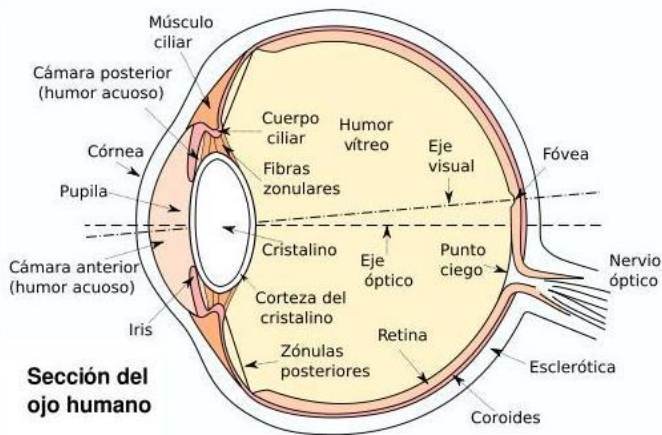
El comportamiento óptico del ojo es similar al de una cámara. En la figura se muestran las partes fundamentales del ojo humano considerado como sistema óptico.

El ojo es de forma esférica, con un diámetro de 2,5 cm. Está rodeado por una membrana exterior y resistente llamada **esclerótica**, que se hace transparente en su parte anterior y central formando la **córnea**, que da paso a una lente convergente, el **crystalino**.

El **cristalino divide el ojo en dos partes**: la anterior tiene un fluido, el **humor acuoso**; y la posterior, otro más gelatinoso, el **humor vítreo**.

La luz que llega al cristalino, a través de la pupila, forma una imagen real, menor e invertida del objeto sobre la **retina**. A la retina llegan las prolongaciones del **nervio óptico**, que transmite las señales ópticas al cerebro.

En el ojo normal, el músculo ciliar se encuentra relajado y el cristalino es alargado, por lo que tiene poco poder de refracción, lo cual nos permite ver con nitidez objetos lejanos. Un objeto situado en el infinito está enfocado nítidamente



Sección del ojo humano

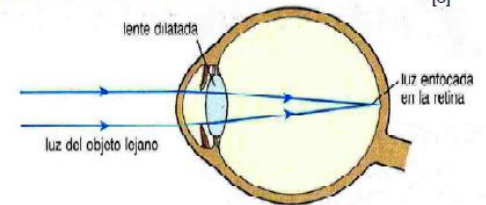
cuando el músculo ciliar se encuentra relajado.

Para ver de cerca (**acomodación**) el músculo ciliar se contrae, el cristalino se hace más esférico (se engrosa, disminuyen los radios de curvatura de sus superficies) y aumenta su poder de refracción, lo cual permite enfocar la luz procedente de objetos cercanos.

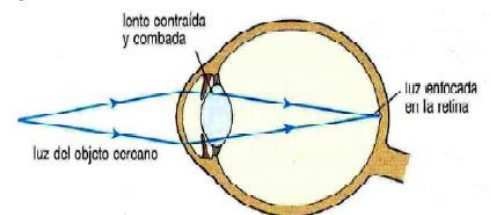
Para permitir la formación de imágenes nítidas de objetos más cercanos en la retina se contrae el músculo ciliar, que arquea el cristalino, y hace que; esto reduce la **distancia focal**. Este proceso se llama **acomodación**.

Un ojo normal puede enfocar con nitidez los objetos situados entre el infinito, **punto remoto**, y a 25 cm del ojo, **punto próximo**. Para que un objeto se vea con nitidez, la imagen se debe formar exactamente donde se encuentra la retina. El ojo se ajusta a las diferentes distancias de objetos modificando, como vimos antes, la distancia focal f de su lente (el cristalino); la distancia entre el cristalino y la retina, que corresponde a s' , no cambia.

Ojo relajado o "no acomodado":



Ojo "acomodado":



5.3.1 Trastornos de la visión

- **Miopía:** El punto remoto **no está en el infinito** y la imagen de objetos lejanos se forma delante de la retina (se ven borrosos). Se ven bien los objetos cercanos. Como vemos se trata de un exceso de convergencia del cristalino. Para corregirla se usa una lente divergente cuyo foco imagen F' esté en el punto remoto. Así, un rayo procedente del infinito es visto por el ojo como procedente de ese punto remoto.

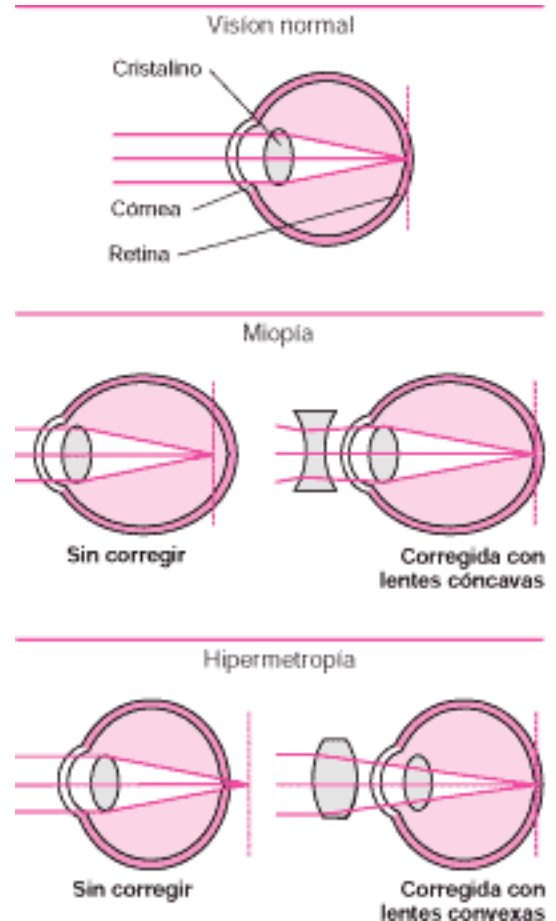
La **lente divergente**, como hace divergir levemente los rayos paralelos que le llegan, compensa el exceso de convergencia del cristalino. Ahora la imagen se formará del punto remoto se formará en la retina.

- **Hipermetropía:** El ojo de una persona hipermetrope es **menos convergente** que lo normal. Las imágenes de los objetos cercanos se forman detrás de la retina.

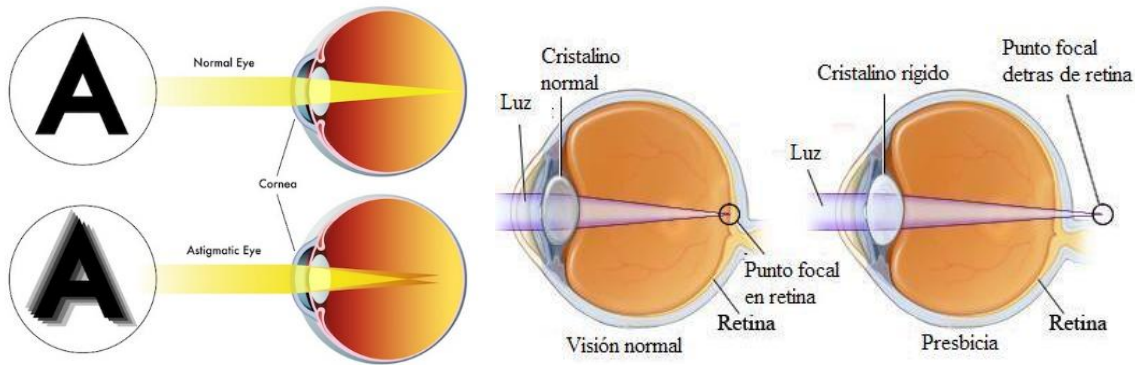
Los objetos lejanos se ven perfectamente. Para observar los objetos cercanos se precisan **lentes convergentes** que ayuden al cristalino a hacer converger los rayos paralelos que le llegan de forma que la imagen se forme en la retina.

- **Astigmatismo:** Es un defecto de la esfericidad de la córnea o del cristalino, lo que se traduce en que la imagen de un punto es un trazo. Es el único de los defectos aquí estudiados que no es esférico y por tanto requiere unas lentes especiales. Se corrige con lentes cilíndricas. Es hereditaria y permanece prácticamente sin cambio a lo largo de la vida.

- **Presbicia:** El ojo al envejecer pierde flexibilidad o poder de acomodación (se endurece el cristalino), por lo que ve mal los objetos cercanos (empeora el proceso de



acomodación, que es el que permite ver de cerca). Se corrige con el mismo tipo de lentes que la hipermetropía, **lentes convergentes**.

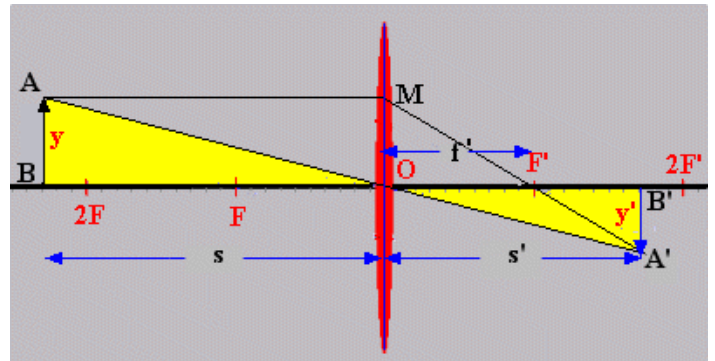


5.4 Demostración de la fórmula de las lentes delgadas.

La demostración más rigurosa para el estudio del dioptrio, pero es muy larga y para nuestro objetivo nos vale esta sencilla, sacada de <https://goo.gl/xGKXu8>.

Veamos la imagen que forma el objeto AB, colocado sobre el eje óptico a una distancia s de la lente delgada (de su centro óptico O). Para ello trazaremos 2 rayos y veremos donde se cortan:

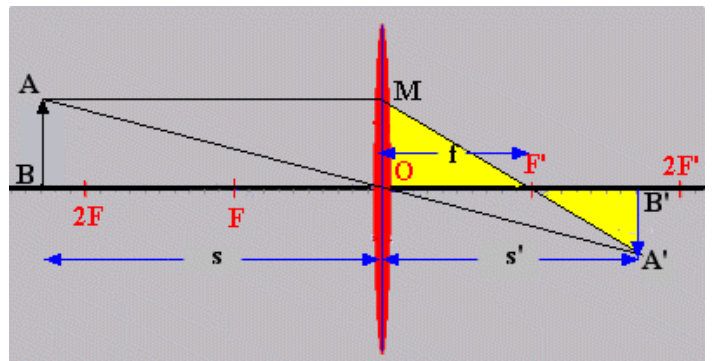
- El primer rayo es el que pasa por el centro óptico y admitiremos como buena aproximación que no sufre desviación. (en el centro de la lente delgada, las 2 superficies refractivas del cristal forman casi una lámina plano paralela y en estas el rayo sale con el mismo ángulo de incidencia, aunque levemente desplazado. Aquí el desplazamiento será despreciable al ser delgada la lente).
- El segundo rayo, que también sale del vértice A, se desplaza paralelo al eje óptico y cuando atraviesa la lente converge en el foco imagen F' (por la propia definición de foco imagen).



Como vemos, la intersección entre ambos rayos nos dará el punto imagen A' y la imagen que se verá, real e invertida, será la A'B'.

Usando la semejanza de los 2 triángulos amarillos:

$$\frac{AB}{s} = \frac{A'B'}{s'}, \text{ de donde } M_L = \text{aumento lateral} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{s'}{s}$$



Por otra parte, en la segunda figura, vemos 2 triángulos semejante también (con el mismo ángulo en común, la misma tangente):

$$\frac{OM}{OF'} = \frac{A'B'}{F'B'}, \text{ de donde (como } OM = AB) \frac{A'B'}{AB} = \frac{F'B'}{OF'} = \frac{s' - f'}{f'}$$

Igualando ambas expresiones llegamos a:

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

Si multiplicamos ambos miembros por $\frac{1}{s'}$ nos queda:

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

Reagrupando los términos s y s' en el primer término y recordando que según la norma DIN de signo s debe ser negativa:

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