

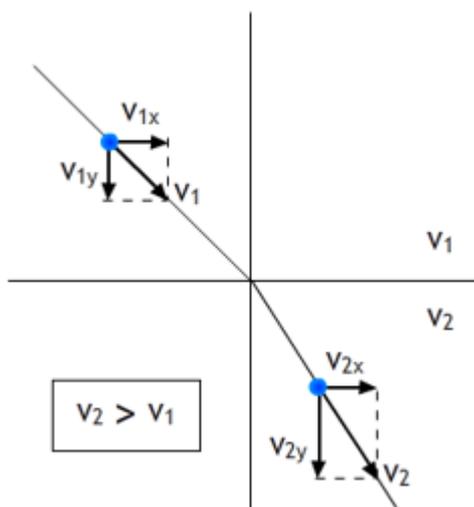
A finales del siglo XVII dos teorías pugnaban por explicar la naturaleza de la luz.

La teoría corpuscular mantenía que la luz se compone de pequeñas partículas que son emitidas por los focos luminosos. Dichas partículas se propagan en línea recta e inciden sobre los cuerpos, rebotando en ellos (reflexión) o propagándose en su seno (refracción) hasta que llegan a nuestros ojos haciendo posible de esta manera la visión de esos objetos.

Isaac Newton fue el principal defensor de esta teoría, la cual era capaz de explicar los fenómenos hasta entonces conocidos como la reflexión o la refracción.



Isaac Newton (1642 - 1727)



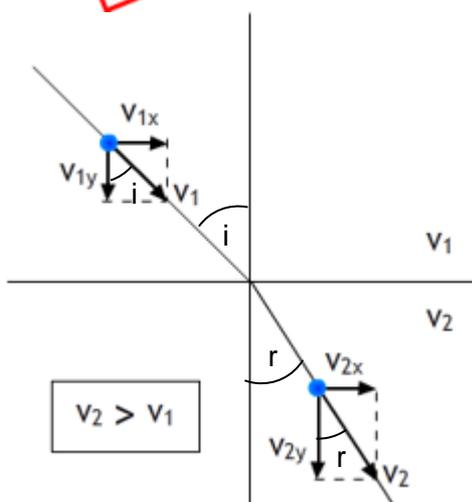
Para explicar la refracción Newton consideraba que cuando las partículas de la luz se propagan en un medio son atraídas por éste. Sucede que cuando la luz atraviesa medios distintos su velocidad varía como consecuencia de la distinta atracción ejercida por el medio sobre las partículas luminosas, siendo la diferente velocidad de propagación la causa que explica la flexión (refracción) de los rayos de luz cuando se propagan en medios distintos.

En la figura se puede ver el esquema de una partícula luminosa que pasa del aire al agua. Como consecuencia de la mayor atracción ejercida por el agua sobre las partículas luminosas la componente vertical de su velocidad aumenta, permaneciendo inalterada la componente horizontal. Como consecuencia de que **la velocidad de la luz es mayor en el agua** su trayectoria se altera produciéndose un acercamiento del rayo a la normal.

altera produciéndose un acercamiento del rayo a la normal.

La teoría corpuscular justificaba correctamente la ley enunciada por Snell hacia 1620 que establecía una relación entre el ángulo de incidencia y el de refracción:

Ampliación



$$\left. \begin{aligned} v_{1x} &= v_1 \text{ sen}(i) \\ v_{2x} &= v_2 \text{ sen}(r) \end{aligned} \right\} \text{ Como : } v_{1x} = v_{2x}$$

$$v_1 \text{ sen}(i) = v_2 \text{ sen}(r)$$

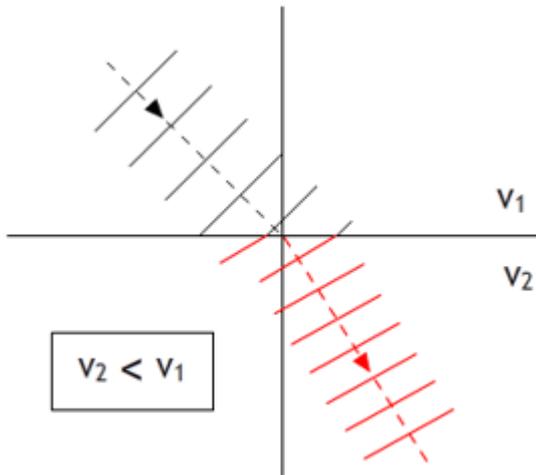
Tal y como se puede comprobar en la expresión deducida, **y suponiendo que $v_2 > v_1$** , el ángulo de refracción es inferior al de incidencia, tal y como se observa en la experiencia.

La teoría ondulatoria mantenía que la luz era una onda. Como tal onda necesitaba de un medio en el que propagarse. Según Huygens dicho medio (de naturaleza desconocida y al que denominó *éter luminífero*) debería llenar la totalidad del espacio y penetrar en todos los cuerpos materiales. Sus propiedades eran bastante desconcertantes: elevadísima elasticidad junto con una densidad muy baja.

La teoría ondulatoria justificaba la refracción de la luz suponiendo que **la velocidad de la luz en el agua es inferior a la velocidad en el aire.** Si admitimos esta suposición cuando un frente de onda comienza a propagarse en el agua lo hace más lentamente (ver figura). En consecuencia, se produce un cambio en la trayectoria del rayo que se acerca a la normal. Además, como se puede observar en la figura, la longitud de onda debería ser menor en el agua que en el aire.



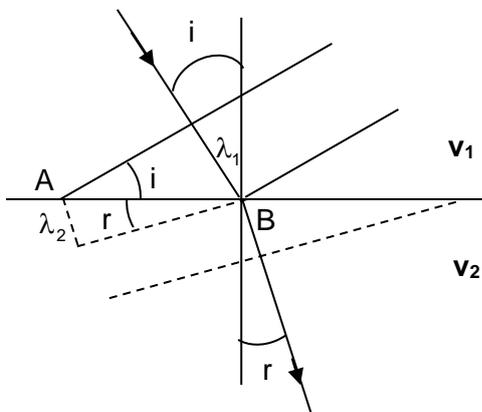
Christiaan Huygens (1629 - 1695)



La teoría ondulatoria contaba en su haber la posibilidad de explicar correctamente el fenómeno de la difracción de la luz, ya descrito en la época por Grimaldi. Newton, ante la imposibilidad de explicar el fenómeno desde el punto de vista corpuscular, abogó por la elaboración de una nueva teoría que fusionase ambas concepciones.

Curiosamente la teoría ondulatoria de la luz también lograba justificar la ley de Snell :

Ampliación



$$A B = \frac{\lambda_1}{\text{sen}(i)} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \\ \text{sen}(i) \end{array} \right. = \frac{\lambda_2}{\text{sen}(r)}$$

Como : $\lambda f = v$

$$\frac{v_1}{\text{sen}(i)} = \frac{v_2}{\text{sen}(r)} ; \boxed{v_1 \text{sen}(r) = v_2 \text{sen}(i)}$$

Si suponemos que $v_2 < v_1$, el ángulo de refracción es inferior al de incidencia y el rayo se acerca a la normal.

Considerando todo lo dicho, parecía que la prueba definitiva a favor de una u otra teoría sobre la naturaleza de la luz se tendría determinando la velocidad de propagación de la luz en el agua. Desafortunadamente , y en la época en la que Newton y Huygens pusieron sus teorías, esto aún no era posible.

La medida de la velocidad de la luz

1. Experiencia de Roemer

La luz, según René Descartes (Óptica, 1637), se propagaba de forma instantánea:

"... la luz alcanza nuestros ojos desde el objeto luminoso en un instante..."

Galileo en su obra *Las dos ciencias* (1638) intuye que, aunque las experiencias cotidianas nos inducen a pensar que la luz se propaga de forma instantánea, su velocidad podrá ser finita, aunque no pudo encontrar un método fiable para determinarla.

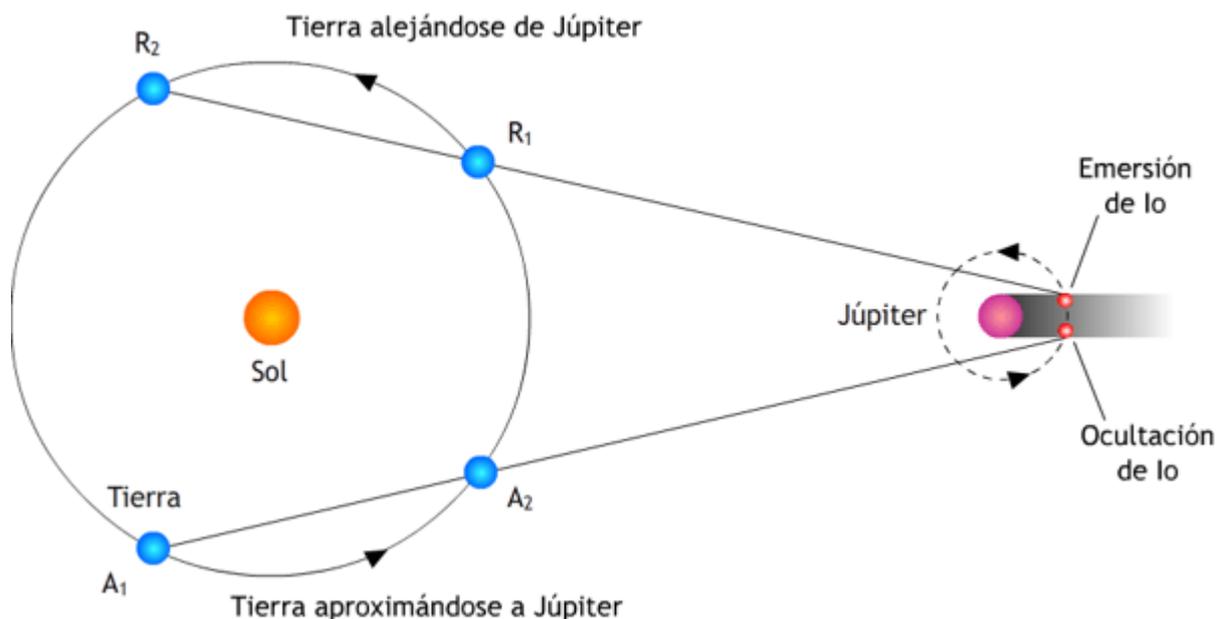
La primera determinación del valor de la velocidad de la luz se atribuye al astrónomo danés **Ole Roemer (1644 - 1710)**, quien en septiembre de 1676 sorprendió a la comunidad científica con la predicción de que el eclipse de Io (luna de Júpiter) previsto para las 6:10 h del 9 de noviembre tendría lugar 10 min más tarde de lo establecido, como efectivamente sucedió.

Roemer justificó su predicción en que la luz se propaga a una velocidad finita:

- Considerando que el tiempo que **Io** tarda en describir su órbita alrededor de Júpiter es constante (1,769 días), y teniendo en cuenta que la Tierra, debido a su movimiento alrededor del Sol, se aproxima a Júpiter (parte inferior de su órbita) o se aleja de él (recesión, parte superior de la órbita).
- Suponiendo que la luz se propaga con una velocidad finita, debería de observarse una variación en el periodo de ocultación o emersión debido a la diferencia de distancias entre el punto R_1 y R_2 , por ejemplo. Si se mide el periodo de emersión cuando la Tierra está en R_1 (más cerca) se obtendrá un valor menor que cuando está en R_2 (más lejos). Según los cálculos efectuados por Roemer la luz tardaría unos 22 min en recorrer una distancia igual al diámetro de la órbita terrestre.

Poco después Huygens combinó los datos de Roemer con el valor de la distancia entre la Tierra y el Sol que él había estimado, obteniendo un valor para la velocidad de la luz de $2 \cdot 10^8$ m/s.

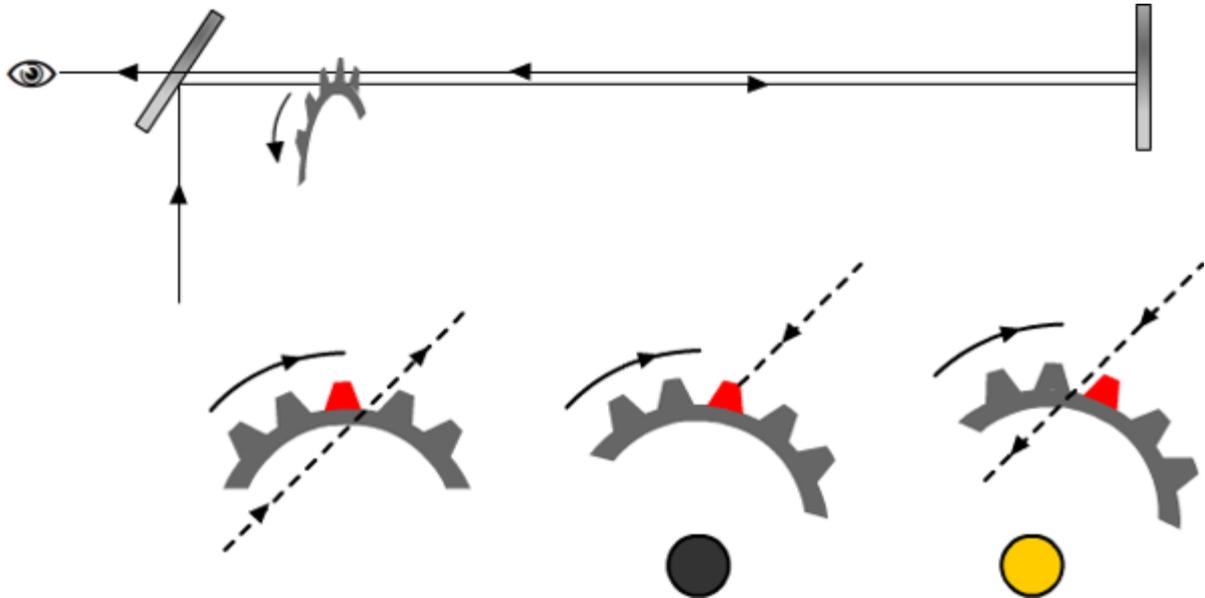
Aunque el valor obtenido para la velocidad de la luz se encuentra bastante alejado del admitido actualmente la experiencia de Roemer fue muy importante ya que demostró que **la luz se propagaba con una velocidad finita, aunque muy grande**.



2. Experiencia de Fizeau - Foucalut

Hyppolyte Fizeau (1819-1896) logró medir en 1849 la velocidad de la luz mediante un ingenioso experimento esquematizado en la figura.

Un rayo de luz procedente de una fuente de luz intensa se hace incidir sobre un espejo semiplatedado que la desvía haciéndola pasar a través de los dientes de una rueda, cuya velocidad de giro se puede variar a voluntad. El rayo se refleja en un segundo espejo volviendo a pasar, en su camino de regreso, a través de la misma rueda. Dependiendo de la velocidad a la que gire la rueda, el rayo, en su camino de regreso, puede encontrarse con un diente, con lo que no se observaría luz alguna de retorno, o con un hueco, lo que provocaría la observación de luz.



Esquema del experimento de Fizeau (1849)

En su experimento original Fizeau situó el primer espejo en una colina de Suresnes (Francia) y el segundo en la colina de Montmartre, distante 8 633 m.

La rueda dentada usada en la experiencia constaba de 720 dientes y se observaba la extinción de la luz del rayo reflejado cuando giraba a 12,6 rev/s (79,2 rad/s). Por tanto, cuando no se observa luz es debido a que la rueda ha girado un ángulo:

$$\varphi = \frac{2\pi}{1440} = \frac{\pi}{720} \text{ rad}$$

El tiempo que tarda la luz en regresar vendría dada por :

$$c = \frac{e}{t} = \frac{2L}{t}; \quad t = \frac{2L}{c}$$

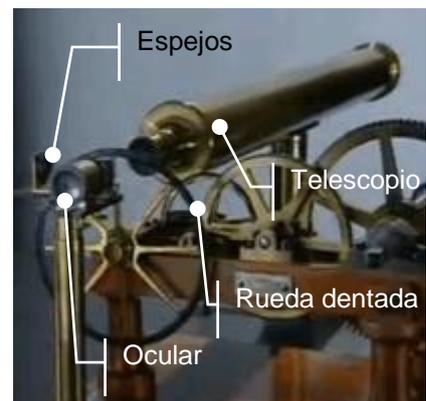
Y la velocidad angular de giro de la rueda :

$$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{\frac{\pi}{720} \text{ rad}}{\frac{2L}{c}} = \frac{\pi c}{1440 L}$$

Por tanto :

$$c = \frac{1440 L \omega}{\pi} = \frac{1440 \cdot 8633 \text{ m} \cdot 79,2 \text{ s}^{-1}}{\pi} = 3,13 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ampliación



Máquina utilizada por Fizeau para medir la velocidad de la luz

Experiencia de Fizeau en: <http://www.youtube.com/watch?v=7CUE1Bpz4hM&feature=related>

Con el método desarrollado por Fizeau no sólo se obtuvo un valor para la velocidad de la luz mucho más cercano a la cifra verdadera, además se tuvo la posibilidad de medir la velocidad de la luz en el agua.

León Foucault (1819 - 1868) perfeccionó el método de Fizeau sustituyendo la rueda dentada por un espejo giratorio (1862). El valor de la velocidad de la luz obtenido fue de 299 810 km/s.

El perfeccionamiento del método logró, además, reducir la distancia entre ambos espejos a menos de 10 m lo que permitió situar entre ambos un tubo lleno de agua, determinando así la velocidad a la que se propaga la luz en este medio. El valor obtenido fue inferior al determinado para el aire: $2,26 \cdot 10^8$ m/s.

La confirmación de que la velocidad de la luz en el agua era menor que en el aire dio argumentos a los partidarios de la naturaleza ondulatoria de la luz, que acumuló nuevas pruebas en su favor a partir de las experiencias sobre interferencias y difracción efectuadas en el primer cuarto del siglo XIX.

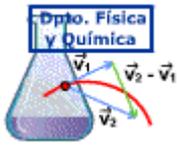
La teoría electromagnética de Maxwell (1865), la producción de ondas electromagnéticas por Hertz y la determinación de su velocidad de propagación en 1887, llevaron al convencimiento de que **la luz misma no era más que una onda electromagnética**.

En los primeros años del siglo XX, con el enunciado la teoría cuántica de Planck y su aplicación para explicar el efecto fotoeléctrico por A. Einstein en 1905, se produce una vuelta a la concepción corpuscular **de la luz**.

Actualmente se considera que la luz posee una naturaleza dual. Esto es, es a la vez onda y partícula.

Su velocidad para el aire o el vacío es una de las constantes fundamentales de la naturaleza, y su valor es:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



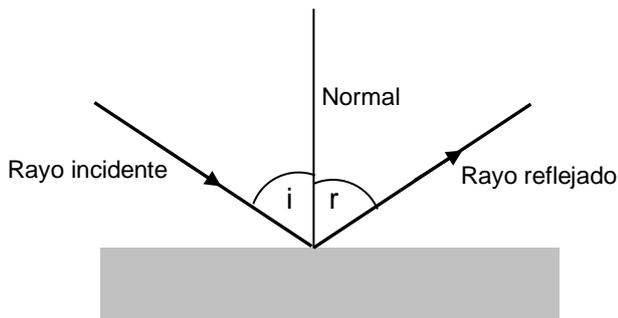
OPTICA

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

La reflexión se produce cuando una onda encuentra una superficie contra la cual rebota. **En la reflexión el rayo incidente y el reflejado se propagan en el mismo medio. La velocidad del rayo incidente y el reflejado es, por tanto, idéntica.**

En este tema se va a tratar la llamada **reflexión especular** que tiene lugar cuando la superficie reflectante está pulida (espejo) dando lugar a una reflexión dirigida. Si la superficie reflectante es irregular (una pared, por ejemplo) la luz incidente se refleja en todas direcciones, dando lugar a la llamada **reflexión difusa**

La reflexión nos permite ver los objetos ya que la luz que se refleja en ellos llega a nuestros ojos. Así, por ejemplo, si un objeto absorbe todos los colores de la luz blanca excepto el rojo, que es reflejado, aparecerá ante nosotros de ese color.



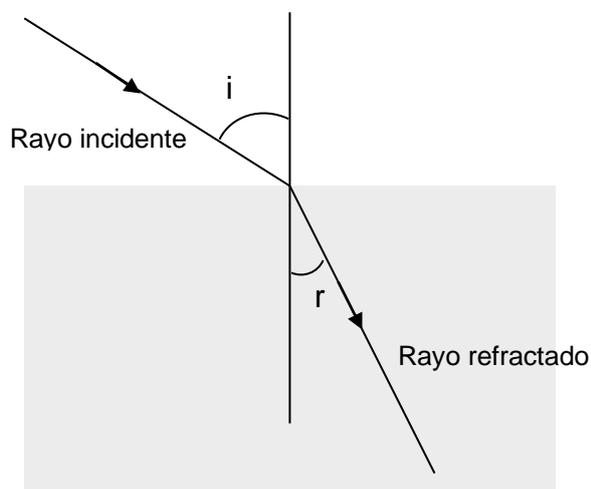
Se denomina **ángulo de incidencia (i)** al formado por el rayo incidente y la normal a la superficie y **ángulo de reflexión (r)** al formado por el rayo reflejado y la normal.

Leyes de la reflexión

- **El rayo incidente, el reflejado y la normal están en un mismo plano.**
- **Los ángulos de incidencia y reflexión son iguales: $i = r$**

La refracción tiene lugar cuando una onda que se propaga en un medio pasa a otro **en el cual su velocidad de propagación es distinta**. Como consecuencia de esa distinta velocidad de propagación se produce una especie de "flexión" de la onda, que modifica su dirección de propagación.

Al pasar de un medio a otro en el cual la velocidad es distinta, **la longitud de onda va a variar**, mientras que la frecuencia permanece inalterada.



Se denomina **ángulo de incidencia (i)** el formado por el rayo incidente y la normal a la superficie y **ángulo de refracción (r)** el formado por el rayo refractado y la normal.

Para las ondas luminosas se define el **índice de refracción del medio, n**, como el cociente entre la velocidad de la luz en el aire, **c**, y la velocidad de la luz en el medio, **v**:

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

Leyes de la refracción

1. El rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano.
2. La relación entre el ángulo de incidencia y el de refracción viene dado por la siguiente expresión (**Ley de Snell**)

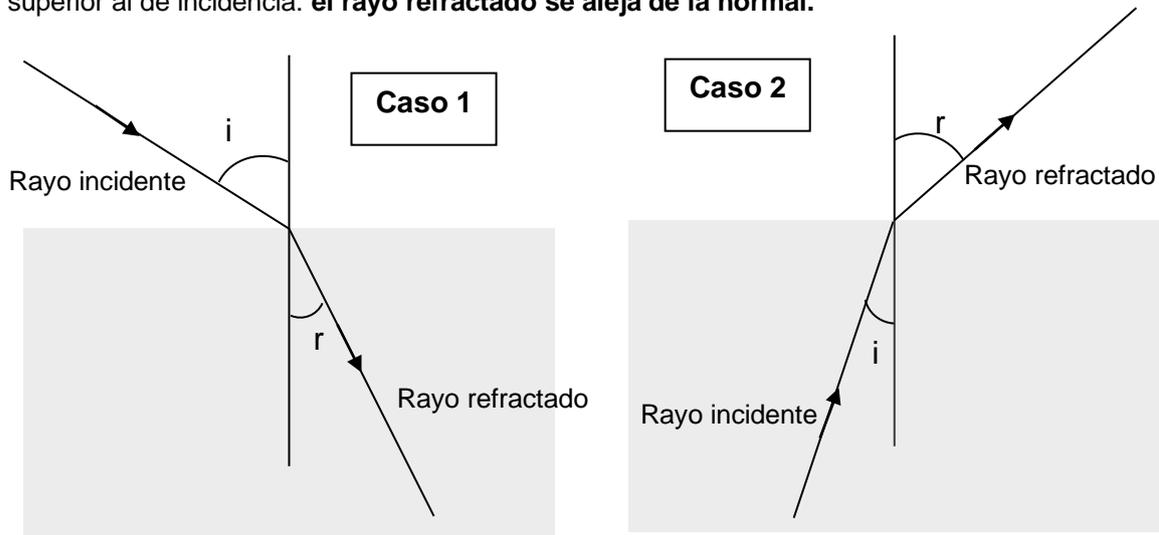
$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$$

donde n_1 es el índice de refracción del primer medio, o medio en el que se propaga el rayo incidente, y n_2 es el índice de refracción del segundo medio o medio en el que se propaga el rayo refractado.

En la refracción se pueden distinguir dos casos:

Caso 1: cuando la luz pasa de un medio en el que se propaga con mayor velocidad (como el aire) a otro en el que se propaga más lentamente (como el vidrio o el agua). Dicho con otras palabras, **cuando pasa de un medio con menor índice de refracción a otro con mayor índice de refracción**. Si aplicamos la Ley de Snell observaremos que en este caso el ángulo de refracción es inferior al de incidencia: **el rayo refractado se acerca a la normal**.

Caso 2: cuando la luz pasa de un medio en el que se propaga con menor velocidad (como el agua o el vidrio) a otro en el que se propaga más rápidamente (como el aire). Dicho con otras palabras, **cuando pasa de un medio con mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción**. Si aplicamos la Ley de Snell observaremos que en este caso el ángulo de refracción es superior al de incidencia: **el rayo refractado se aleja de la normal**.



En el segundo de los casos si se aumenta el ángulo de incidencia, el rayo refractado se va acercando a la superficie de separación de los medios. Existirá cierto ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado sale rasante a dicha superficie ($r = 90^\circ$). El ángulo de incidencia para el que sucede esto se denomina **ángulo límite (L) o ángulo crítico**. Cuando el rayo incida con un ángulo igual al límite:

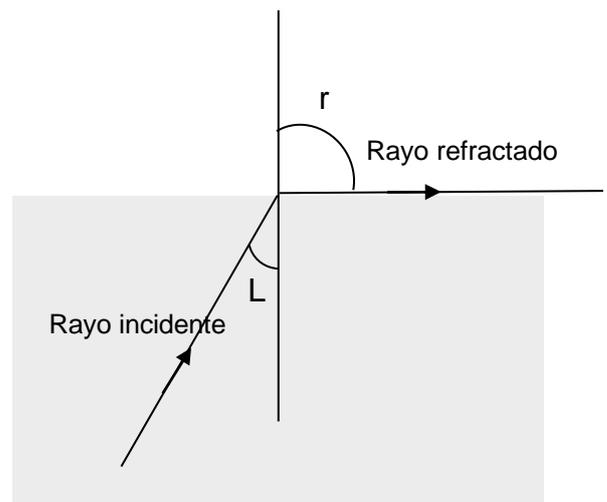
$$n_1 \text{ sen}(i) = n_2 \text{ sen}(r)$$

$$n_1 \text{ sen}(L) = n_2 \text{ sen}(90^\circ) = n_2$$

$$\text{sen}(L) = \frac{n_2}{n_1}$$

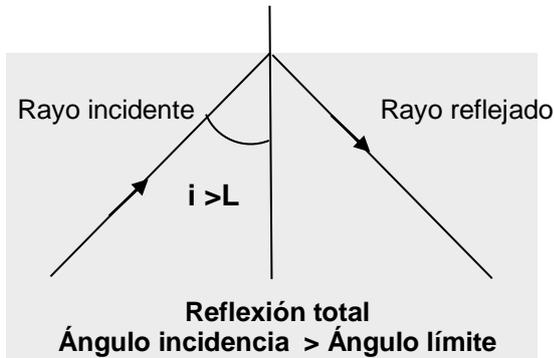
Para el sistema vidrio-aire, considerando un vidrio que tenga un índice de refracción de 1,50:

$$\text{sen}(L) = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,00}{1,50} = 0,667 ; \quad L = 41,8^\circ$$

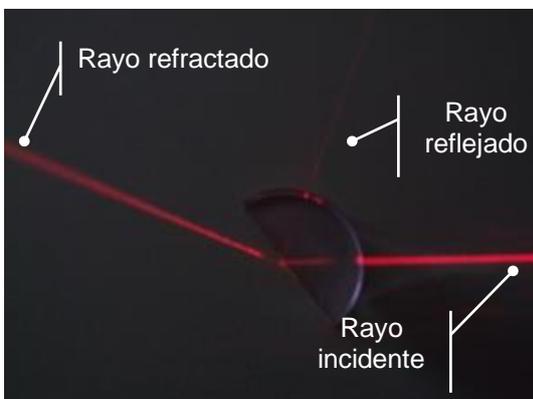


Si seguimos aumentando el ángulo de incidencia de forma que **su valor sea superior al ángulo límite se produce el fenómeno de la reflexión total**. Esto es, no existe refracción. La luz se refleja en la superficie de separación de ambos medios.

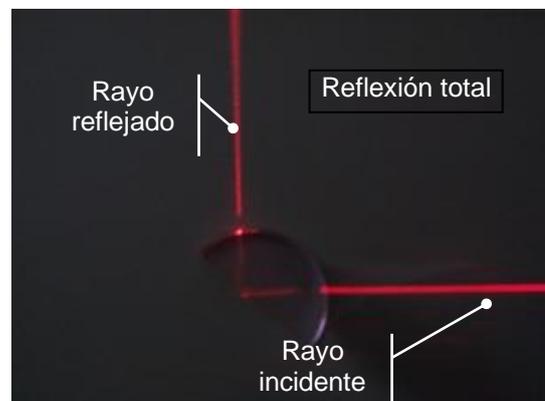
El fenómeno de la reflexión total se produce si el rayo luminoso pasa de un medio en el que se propaga más lentamente (mayor índice de refracción, medio más refringente) a otro en el que su velocidad es mayor (menor índice de refracción, medio menos refringente)



La luz se puede guiar a través de un filamento de vidrio o plástico, ya que si incide sobre las paredes con un ángulo superior al límite se produce el fenómeno de la reflexión total quedando confinada en su interior. Este es el fundamento de la fibra óptica.



Cuando un rayo incide sobre la superficie de separación de dos medios (vidrio-aire en la figura) el rayo se refleja y refracta.



Reflexión total de un rayo que se propaga en el vidrio.

Ejemplo 1

Un rayo de luz incide sobre la superficie de un cristal con un ángulo de 60° . Sabiendo que el vidrio tiene un índice de refracción de 1,53. Calcular:

- Velocidad de propagación de la luz en el vidrio.
- Ángulo con el que se refracta el rayo.

Solución

- Para calcular la velocidad de propagación en el vidrio hacemos uso del concepto de índice de refracción:

$$n = \frac{c}{v} \quad ; \quad v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{1,53} = 1,96 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

- Aplicamos la Ley de Snell: $n_1 = n_{\text{aire}} ; n_2 = n_{\text{vidrio}}$

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r \quad ; \quad \text{sen } r = \frac{n_1 \text{ sen } i}{n_2} = \frac{1,00 \text{ sen } (60^\circ)}{1,53} = 0,5660$$

$$r = \text{inv sen}(0,5660) = 34,5^\circ$$

Como la luz pasa del aire ($n_{\text{aire}} = 1,00$) al vidrio ($n_{\text{vidrio}} = 1,53$), el ángulo de refracción es inferior al de incidencia. El rayo refractado se acerca a la normal.

Ejemplo 2

Un rayo de luz sale del agua al aire. Sabiendo que el ángulo de incidencia es de 30° y que el agua tiene un índice de refracción de 1,33, calcular el ángulo de refracción.

Solución

Aplicamos la Ley de Snell: $n_1 = n_{\text{agua}}$; $n_2 = n_{\text{aire}}$

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r \quad ; \quad \text{sen } r = \frac{n_1 \text{ sen } i}{n_2} = \frac{1,33 \text{ sen } (30^\circ)}{1,00} = 0,6650$$

$$r = \text{inv sen}(0,665) = 41,7^\circ$$

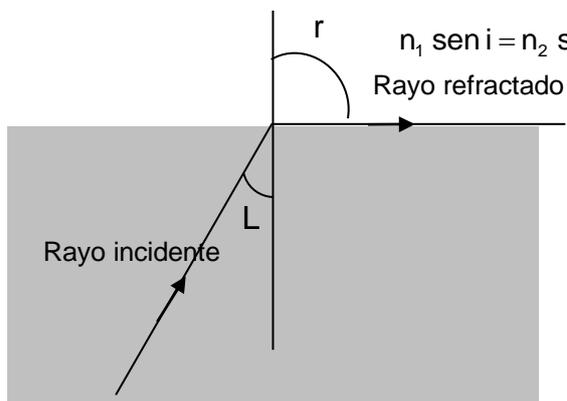
Como la luz pasa del agua ($n_{\text{agua}} = 1,33$) al aire ($n_{\text{aire}} = 1,00$), el ángulo de refracción es superior al de incidencia: el rayo refractado se aleja de la normal.

Ejemplo 3

Determinar el valor del ángulo límite para un vidrio cuyo índice de refracción es 1,70

Solución

Se define el ángulo límite como el ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción es de 90° ($\text{sen } 90^\circ = 1$). Aplicando la ley de Snell con $n_1 = n_{\text{vidrio}}$; $n_2 = n_{\text{aire}}$



$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r \quad ; \quad \text{sen } i = \frac{n_2 \text{ sen } r}{n_1} \quad ; \quad \text{sen } L = \frac{n_2 \cdot 1}{n_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{sen } L = \frac{n_2 \cdot 1}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,00}{1,70} = 0,5882$$

$$L = \text{inv sen}(0,5882) = 36,0^\circ$$

Ejemplo 4 (Oviedo, 2010 - 2011)

En un experimento para determinar el índice de refracción de un vidrio se hacen llegar rayos incidentes a una superficie plana desde el aire al vidrio. Para un ángulo de incidencia de $25,0^\circ$ varias alumnas han determinado los siguientes ángulos de refracción:

| Alumna | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ang. refracción | 17,2 | 17,1 | 16,7 | 17,2 | 16,9 | 16,9 | 17,1 |

Determine el valor más probable para el índice de refracción del vidrio y una estimación de su error.

Solución:

Para calcular el índice de refracción del vidrio utilizaremos la Ley de Snell: $n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$. Ahora $n_1 = n_{\text{aire}} = 1,00$; $n_2 = n_{\text{vidrio}}$. Despejando n_2 :

$$n_2 = \frac{n_1 \text{ sen } i}{\text{sen } r} = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r}$$

Como tenemos un conjunto de valores de ángulos de incidencia y refracción realizamos el cálculo anterior para cada par de valores, obtenemos el valor de n y como valor final damos la media de los valores obtenidos. A continuación se hace el cálculo para los dos primeros valores de la tabla anterior:

$$n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{\text{sen}(25^\circ)}{\text{sen}(17,5^\circ)} = 1,41 \quad ; \quad n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{\text{sen}(25,0^\circ)}{\text{sen}(17,1^\circ)} = 1,44$$

Realizando el cálculo anterior para todos los valores de la tabla obtendríamos los siguientes valores para el índice de refracción del vidrio (n)

| Experiencia | i (grados) | r (grados) | n |
|-------------|------------|------------|------|
| 1 | 25,0 | 17,5 | 1,41 |
| 2 | 25,0 | 17,1 | 1,44 |
| 3 | 25,0 | 16,7 | 1,47 |
| 4 | 25,0 | 17,2 | 1,43 |
| 5 | 25,0 | 16,9 | 1,45 |
| 6 | 25,0 | 16,9 | 1,45 |
| 7 | 25,0 | 17,1 | 1,44 |

$$n_{\text{vidrio}} = \frac{1,41 + 1,44 + 1,47 + 1,43 + 1,45 + 1,45 + 1,44}{7} = 1,44$$

Para el cálculo del error hay varias opciones:

- **Calcular la desviación típica** (medida de la incertidumbre media de cada medida):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad \sigma = 0,0186 = 0,02 \quad n = 1,44 \pm 0,02$$

- Para el caso de varias medidas la mejor opción es usar **la incertidumbre de la media**, que se define como (fórmula de Gauss):

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \sigma_m = 0,0070 = 0,01 \quad n = 1,44 \pm 0,01$$

- Una opción mas sencilla podría consistir en obtener el **error relativo máximo**.

Dado que la máxima desviación de la media está en la medida de 1,47:

$$E_r = \frac{|E_A|}{V_v} = \frac{|1,47 - 1,44|}{1,44} \cdot 100 = 2,0\%$$

$$n = 1,44 \pm 2\% = 1,44 \pm 0,03$$

Ejemplo 5 (Oviedo, 2009 - 2010)

Razonando la respuesta, diga si es cierto que al aumentar de 10° a 20° el ángulo de incidencia de un rayo en una superficie plana el ángulo de refracción también se duplica.

Solución:

Aplicando la ley de Snell, y suponiendo que pasa del aire al vidrio: $\text{sen } i = n \text{ sen } r_1$.

Como: $\text{sen } (2\alpha) = 2 \text{ sen } (\alpha) \cos(\alpha)$. Para pequeños ángulos (como en este caso): $\cos \alpha \approx 1$

Por tanto: $\text{sen } (2\alpha) \approx 2 \text{ sen } (\alpha)$

$$\frac{\text{sen } (i)}{\text{sen } (2i)} = \frac{\cancel{n} \text{ sen } r_1}{\cancel{n} \text{ sen } r_2}$$

$$\frac{\text{sen } r_2}{\text{sen } r_1} = \frac{\text{sen } (2i)}{\text{sen } (i)} \approx \frac{2 \text{ sen } (i)}{\text{sen } (i)} = 2$$

$$\text{sen } r_2 \approx 2 \text{ sen } r_1$$

Como r_1 será también pequeño:

$$\text{sen } r_2 \approx 2 \text{ sen } r_1 \approx \text{sen } (2r_1)$$

$$\text{sen } r_2 \approx \text{sen } (2r_1) \Rightarrow \boxed{r_2 = 2r_1}$$

Si suponemos un vidrio de $n = 1,50$ se puede comprobar lo anterior realizando los cálculos correspondientes:

$$\text{sen } (i) = 1,50 \text{ sen } (r) ; \text{sen } (r) = \frac{\text{sen } (i)}{1,50}$$

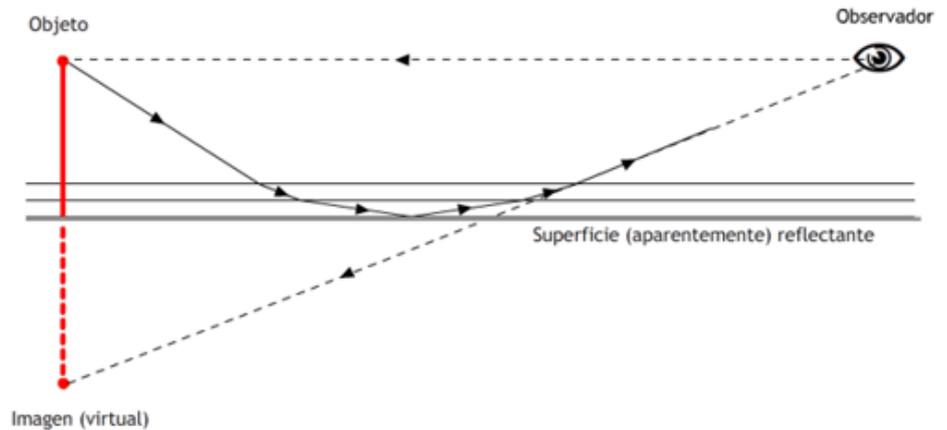
$$\text{sen } (r_1) = \frac{\text{sen } (10^\circ)}{1,50} = 0,1156 ; r_1 = 6,6^\circ$$

$$\text{sen } (r_2) = \frac{\text{sen } (20^\circ)}{1,50} = 0,2280 ; r_2 = 13,2^\circ$$

Los espejismos son debidos a la refracción de la luz en las capas de aire cercano al suelo.

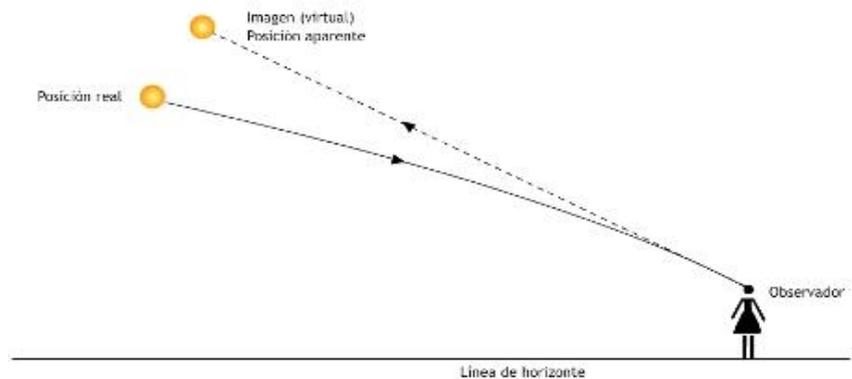
Las capas en contacto con el suelo están más calientes lo que provoca que su índice de refracción sea menor que el de las capas superiores. Así, un rayo que se propaga de arriba abajo se desvía alejándose de la normal hasta que sufre refracción total. En la trayecto de ascenso pasa de zonas en las que el índice de refracción es menor a otras (más frías) en las que el índice de refracción es mayor, por lo que se refracta acercándose a la normal. El observador ve la imagen del objeto en la prolongación del rayo. La imagen formada es virtual e invertida dando la impresión que se produce por reflexión en las capas inferiores que toman el aspecto de espejo (agua).

El mismo efecto es el responsable del aspecto de "carretera mojada" que se puede observar en los días soleados (ver imagen).

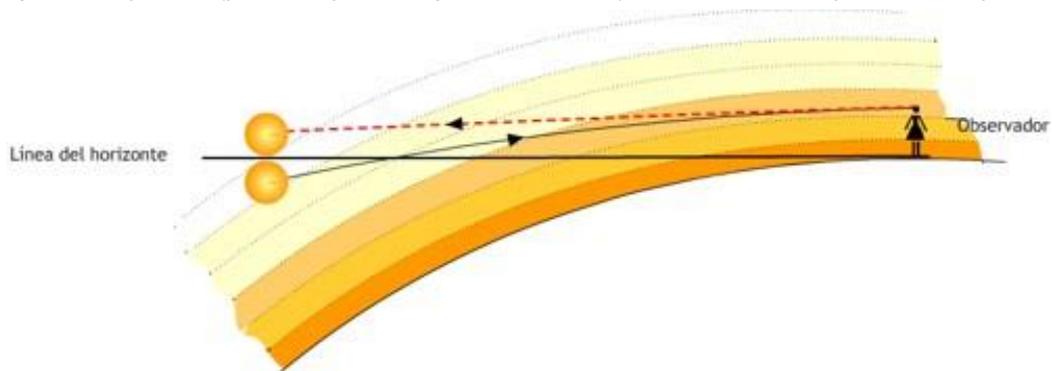


La variación del índice de refracción del medio que atraviesa la luz explica también por qué que la posición en la que vemos las estrellas no es la verdadera.

Las capas de aire más cercanas a la superficie terrestre son más densas, esto condiciona que la luz viaje más lentamente (mayor índice de refracción) produciéndose una refracción que acerca el rayo a la normal. Como resultado obtenemos una imagen (virtual) que no coincide con la posición real de la estrella.



En la puesta de sol (y en la salida) la refracción de los rayos en las capas de la atmósfera (capas inferiores, mayor índice de refracción, superiores, menor) hace que el observador perciba el sol más alto de lo que en realidad está. Dado que la desviación de los rayos es de unos 30' (más o menos el tamaño del disco solar) cuando el sol ya se ha puesto (posición por debajo del horizonte) el observador lo percibe aún por encima del mismo.



La variación de la velocidad de propagación de las ondas al cambiar de medio tiene algunas consecuencias (además de la refracción). Una de ellas es la modificación de su longitud de onda.

Supongamos una onda que se propaga en un medio con una velocidad v_1 , que pasa a otro en el que la velocidad de propagación es v_2 . Como la frecuencia de la onda permanece inalterada **su longitud de onda variará:**

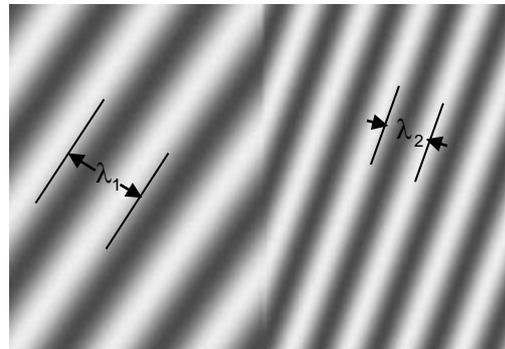
$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \lambda_1 f \\ v_2 &= \lambda_2 f \end{aligned} \right\} \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Como :

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{c}{v_1} \\ n_2 &= \frac{c}{v_2} \end{aligned} \right\} \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

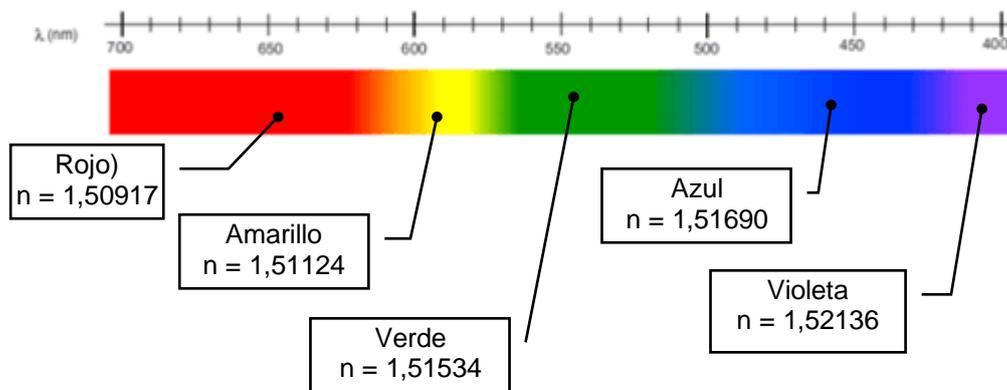
Por tanto :

$$\boxed{\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}}$$



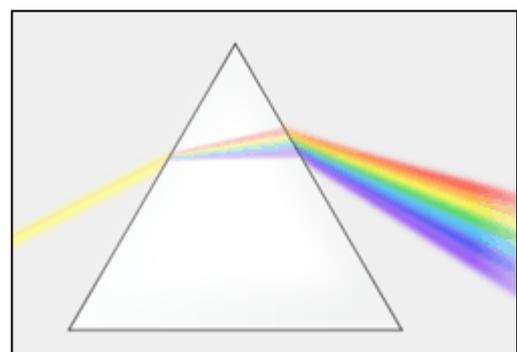
Disminución de la longitud de onda al pasar de un medio con mayor velocidad de propagación (izquierda) a otro con menos velocidad de propagación (derecha)

En el aire (y en el vacío) la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia (o longitud de onda) de la luz. De esta manera todos los colores tienen la misma velocidad de propagación. Esto no ocurre en todos los materiales. El vidrio, por ejemplo, es un material en el que la velocidad de propagación no es independiente de la frecuencia de la luz. En él el color rojo viaja más rápido que el violeta. La consecuencia es que **el índice de refracción varía con la frecuencia. Los materiales en los cuales el índice de refracción varía con la frecuencia (o con la longitud de onda) se denominan dispersivos**



Debido a que (en un medio dispersivo) el índice de refracción varía con la frecuencia, luces de distintos colores sufrirán una mayor o menor refracción al atravesar estos medios. La luz roja, por ejemplo, sufre una menor desviación que la violeta produciéndose la separación de los distintos colores.

La luz blanca al incidir en un prisma emerge descompuesta en los colores que la forman. **Se obtiene el espectro de la luz incidente.**

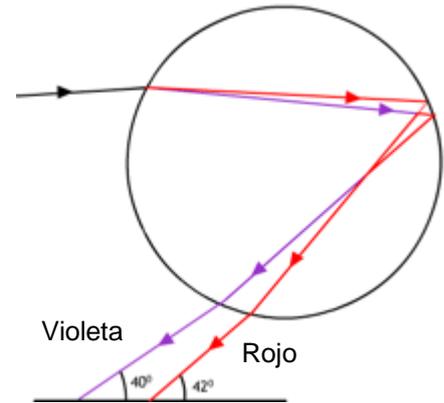


La dispersión de la luz del sol por las gotas de lluvia da lugar al **arco iris**.

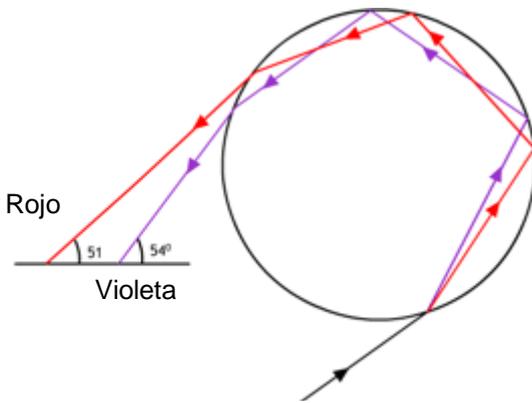
Cuando tenemos el sol situado a nuestra espalda, en las gotas de lluvia se produce la refracción y reflexión de la luz de forma similar a lo que ocurre con un prisma, de forma tal que la luz blanca emerge nuevamente descompuesta en sus colores como consecuencia de la dispersión que se produce en el interior de la gota.

El arco iris primario se forma debido a la reflexión que tiene lugar en el interior de las gotas (ver figura). Descartes demostró que cada color es más intensamente refractado en la dirección de desviación máxima para ese color. Esta dirección se corresponde con 42° para el color rojo y 40° para el violeta. Los demás colores muestran desviaciones máximas comprendidas entre estos valores.

Todas las gotas colocadas en un semicírculo que forme 42° con el observador refractarán fuertemente la luz roja. Lo mismo sucederá con los demás colores. El observador verá semicírculos coloreados con el color rojo situado en el arco superior y el violeta en el inferior



Arco iris primario. Una única reflexión en el interior de la gota



Arco iris secundario. Se produce una doble reflexión en el interior de la gota.

El arco iris secundario aparece como consecuencia de una doble reflexión en el interior de las gotas. Como consecuencia el color violeta emerge con una mayor inclinación (54°) que el rojo (51°).

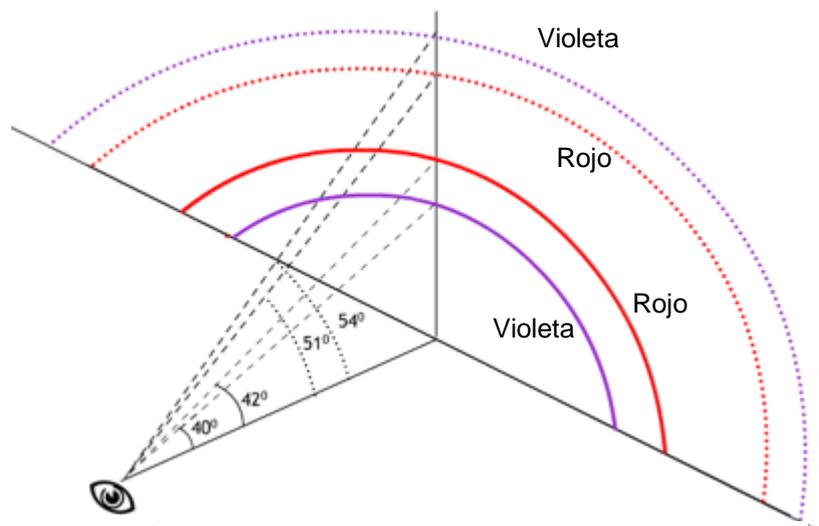
El arco iris secundario aparece sobre el primario, es más débil y los colores están invertidos. El arco superior es de color violeta y el inferior rojo.

Si la posición del observador se eleva se puede observar una porción mayor de arco. Si la altura es suficiente se puede observar el arco iris como un círculo completo.



Fotografía en la que se observan el arco iris primario (inferior) y el secundario (superior)

Fuente: Wikipedia



Esquema que muestra como percibe un observador los rayos refractados que forman el arco iris.

Ejemplo 6 (Oviedo, 2010 - 2011)

El cuarzo fundido tiene un índice de refracción que decrece con la longitud de onda de la luz. Para el extremo violeta es $n_V = 1,472$, mientras que para el extremo rojo es $n_R = 1,455$. Cuando la luz blanca (con todas las longitudes de onda desde el rojo al violeta) incide desde el aire sobre una superficie de cuarzo fundido con un ángulo de incidencia de 20° se forma un espectro.

- ¿Qué se refracta más el rojo o el violeta? (explíquese incluyendo un dibujo).
- Determine la separación angular en minutos de arco sexagesimal de los rayos refractados para los extremos rojo y violeta.

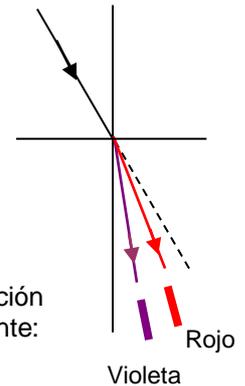
Solución:

$$\left. \begin{aligned} \text{sen}(i) &= n_V \text{sen}(r_V) \\ \text{sen}(i) &= n_R \text{sen}(r_R) \end{aligned} \right\} 1 = \frac{n_V \text{sen}(r_V)}{n_R \text{sen}(r_R)} \quad ; \quad n_R \text{sen}(r_R) = n_V \text{sen}(r_V)$$

$$\text{sen}(r_R) = \frac{n_V}{n_R} \text{sen}(r_V)$$

$$\text{Como : } n_V > n_R \Rightarrow \text{sen}(r_R) > \text{sen}(r_V) \Rightarrow \boxed{r_R > r_V}$$

Teniendo en cuenta que un menor ángulo de refracción significa una mayor refracción (el rayo se acerca más a la normal), **el color violeta se refracta más**. Efectivamente:



$$\text{sen}(i) = n_V \text{sen}(r_V) \quad ; \quad \text{sen}(r_V) = \frac{\text{sen}(i)}{n_V} = \frac{\text{sen}(20^\circ)}{1,472} = 0,23235 \Rightarrow \boxed{r_V = 13,435^\circ}$$

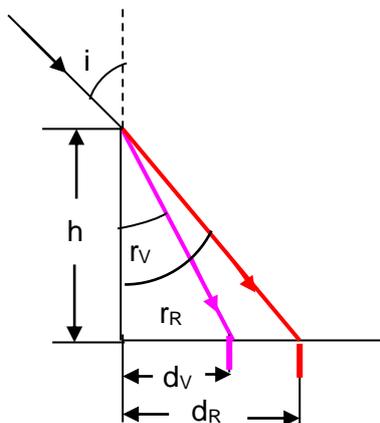
$$\text{sen}(i) = n_R \text{sen}(r_R) \quad ; \quad \text{sen}(r_R) = \frac{\text{sen}(i)}{n_R} = \frac{\text{sen}(20^\circ)}{1,455} = 0,23507 \Rightarrow \boxed{r_R = 13,595^\circ}$$

$$r_R - r_V = 13,595^\circ - 13,435^\circ = 0,160^\circ = \boxed{9,60'} = \boxed{9' 36''}$$

Ejemplo 7 (Oviedo, 2010 - 2011)

En un recipiente de fondo plano y 25 cm de profundidad se tiene un líquido de índice de refracción 1,32 para el rojo y 1,35 para el violeta. El fondo del recipiente es totalmente blanco. Al incidir luz blanca en la superficie con un ángulo de incidencia de 27° , la luz se refracta en el interior del líquido. Realice un esquema de los rayos refractados y determine la separación en milímetros entre la luz roja y la violeta en el fondo del recipiente.

Solución:



$$\text{sen}(i) = n_V \text{sen}(r_V) \quad ; \quad \text{sen}(i) = n_R \text{sen}(r_R)$$

$$\text{sen}(r_V) = \frac{\text{sen}(i)}{n_V} = \frac{\text{sen}(27^\circ)}{1,35} = 0,33629 \Rightarrow \boxed{r_V = 19,65^\circ}$$

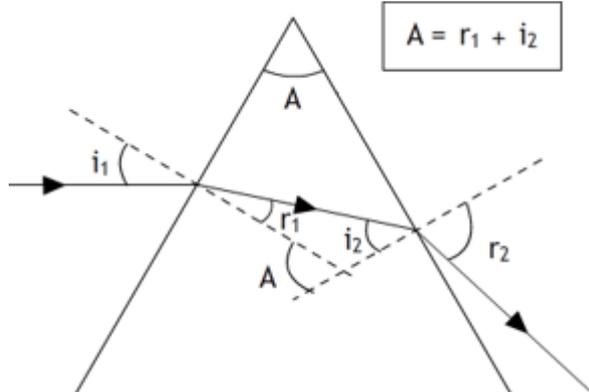
$$\text{sen}(r_R) = \frac{\text{sen}(i)}{n_R} = \frac{\text{sen}(27^\circ)}{1,32} = 0,34393 \Rightarrow \boxed{r_R = 20,12^\circ}$$

$$\text{tg}(r_V) = \frac{d_V}{h} \quad ; \quad d_V = h \text{tg}(r_V) = 25 \text{ cm } \text{tg}(19,65^\circ) = 8,93 \text{ cm}$$

$$\text{tg}(r_R) = \frac{d_R}{h} \quad ; \quad d_R = h \text{tg}(r_R) = 25 \text{ cm } \text{tg}(20,12^\circ) = 9,16 \text{ cm}$$

$$d_R - d_V = (9,16 - 8,93) \text{ cm} = 0,23 \text{ cm} = 2,3 \text{ mm}$$

Refracción en prismas y lentes



Si un rayo de luz incide sobre una de las caras de un prisma de vidrio con el ángulo adecuado, después de refractarse en la primera cara sufrirá una segunda refracción en la segunda saliendo desviado hacia su base (ver figura).

Aplicando la ley de Snell a cada refracción, y suponiendo que el medio es el aire, tendremos:

$$\text{sen}(i_1) = n \text{sen}(r_1)$$

$$n \text{sen}(i_2) = \text{sen}(r_2)$$

Los ángulos r_1 e i_2 se relacionan con el ángulo del prisma (generalmente 60°) según: $A = r_1 + i_2$

Si el rayo incide con un ángulo nulo (esto es, perpendicularmente a la cara del prisma), atraviesa el vidrio sin sufrir refracción e incide en la otra cara con un ángulo igual al ángulo del prisma (60°). Como este ángulo es mayor que el ángulo límite para el vidrio (unos 40°) el rayo se reflejará totalmente saliendo perpendicular a la base del prisma sin refractarse. Para este caso particular el rayo atraviesa el prisma sin sufrir refracción alguna.

Si aumentamos el ángulo de incidencia en la primera cara, aumenta r_1 y disminuye i_2 . Por tanto llegará un momento en que i_2 sea igual al ángulo límite y el rayo se refracta en la segunda cara saliendo rasante a la misma.

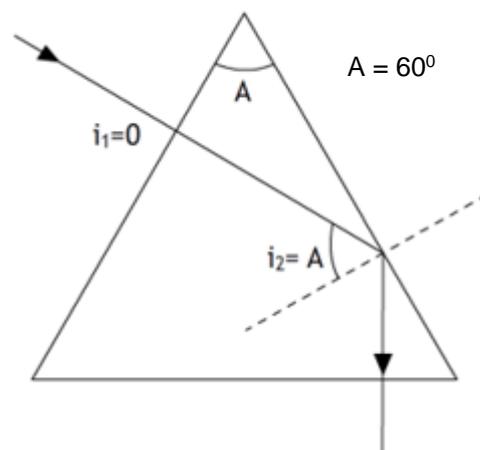
Se puede calcular el ángulo de incidencia en la primera cara para el cual el rayo se refracta rasante en la segunda.

Suponiendo $n = 1,60$ para el prisma:

$$n \text{sen}(i_2) = \text{sen}(90^\circ) = 1; \text{sen}(i_2) = \frac{1}{n} = \frac{1}{1,60} = 0,6250 \Rightarrow i_2 = 38,7^\circ$$

$$A = r_1 + i_2; r_1 = A - i_2 = 60,0^\circ - 38,7^\circ = 21,3^\circ$$

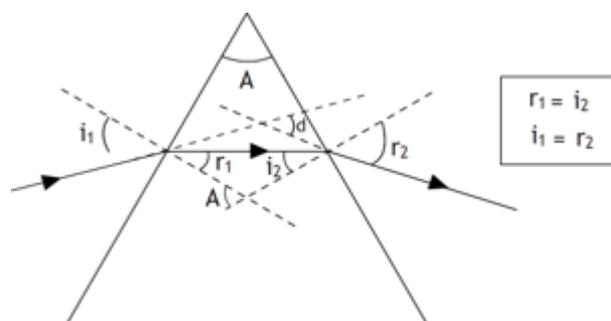
$$\text{sen}(i_1) = n \text{sen}(r_1); \text{sen}(i_1) = 1,60 \text{sen}(21,3^\circ) = 0,5812 \Rightarrow i_1 = 35,5^\circ$$



Ampliación

A partir de este ángulo de incidencia en la primera cara, se produce la refracción en la segunda. Luego:

- Para un ángulo de incidencia comprendido entre 0° y $35,5^\circ$, no hay refracción en la segunda cara. Se produce la reflexión total.
- Para un ángulo de incidencia mayor de $35,5^\circ$, hay refracción en la segunda cara. El rayo emerge por la segunda cara del prisma acercándose cada vez más a la normal (ángulo de la segunda refracción cada vez más pequeño).



El ángulo d que forman el rayo incidente y el refractado mide la desviación sufrida por la luz en el prisma.

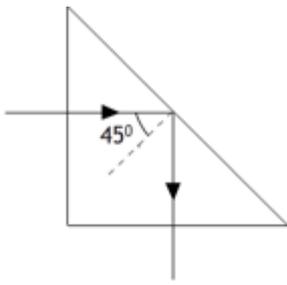
$$d = (i_1 - r_1) + (r_2 - i_2) = (i_1 + r_2) - (r_1 + i_2)$$

$$d = (i_1 + r_2) - A$$

A medida que aumenta el ángulo de incidencia (en la primera cara) el ángulo de desviación disminuye hasta llegar a un valor mínimo y después vuelve a aumentar.

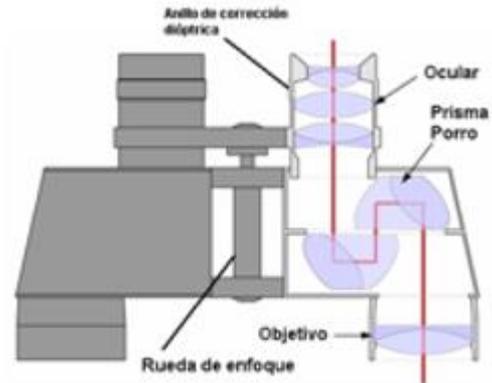
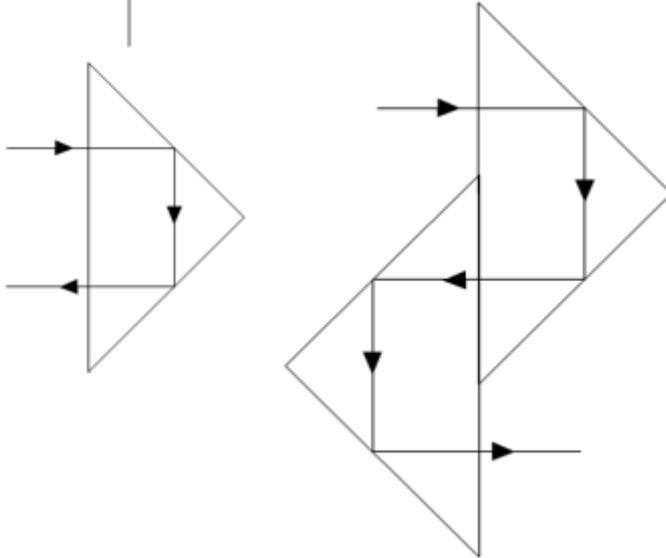
La desviación es mínima cuando el rayo que atraviesa el prisma lo hace paralelamente a la base (ver figura). Entonces se cumple:

$$r_1 = i_2 \Rightarrow (\text{aplicar ley de Snell}) i_1 = r_2$$



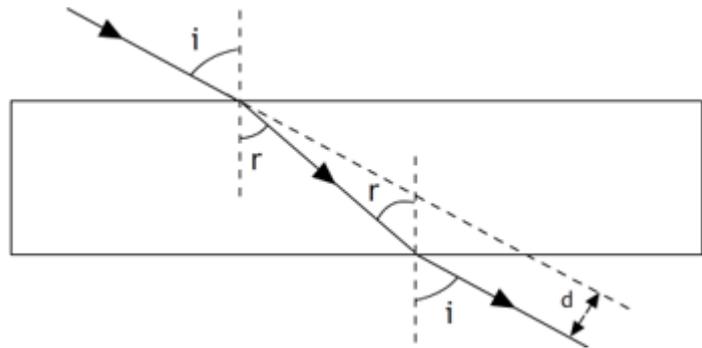
El prisma de Porro (en honor de su inventor el italiano Ignazio Porro) es un triángulo isósceles con un ángulo recto. Debido a que el ángulo límite en el vidrio es de unos 40° la geometría del prisma lo hace especialmente adecuado para lograr reflexiones totales de los rayos incidentes.

Frecuentemente se combinan dos prismas de Porro, tal y como se muestra más abajo. Esta combinación se utiliza en algunos modelos de prismáticos.



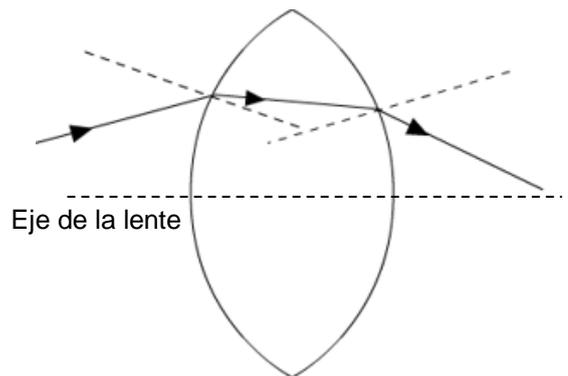
Sistema óptico de unos prismáticos. Se puede observar el prisma de Porro
Fuente: Wikipedia

Cuando un rayo se refracta en una **lámina de caras paralelas** el rayo que emerge lo hace paralelo al incidente (ver figura).



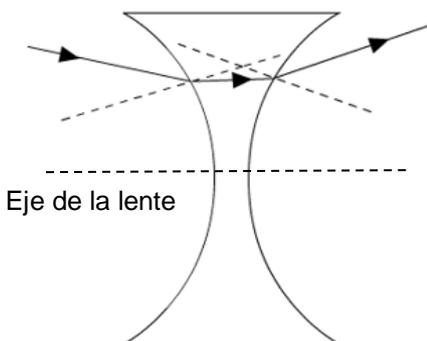
La refracción en una **lente biconvexa** produce una convergencia del rayo emergente que se desvía hacia el eje de la lente (ver figura).

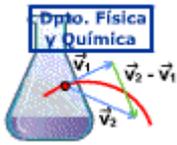
Las lentes biconvexas son lentes convergentes.



La refracción en una **lente bicóncava**, por el contrario, produce una divergencia del rayo incidente que se desvía alejándose del eje de la lente.

Las lentes bicóncavas son lentes divergentes.

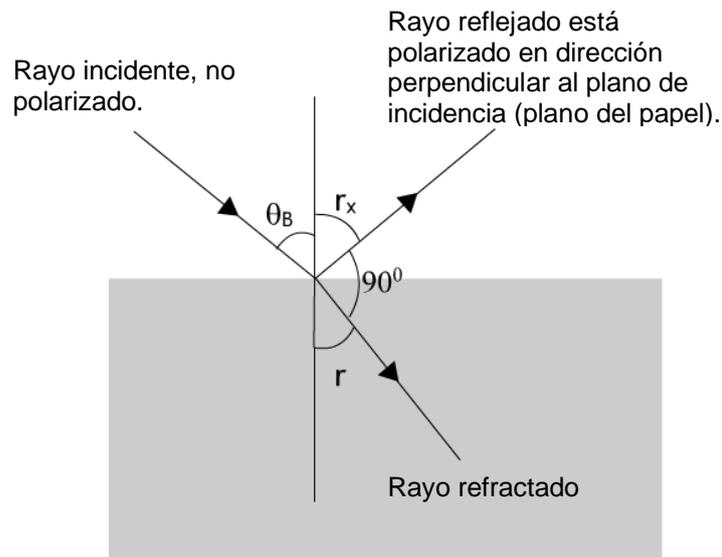




ÁNGULO DE BREWSTER

El ángulo de Brewster (θ_B) es el ángulo de incidencia de un rayo para el cual el rayo refractado y el reflejado son perpendiculares (ver figura).

Cuando la luz incide con un ángulo igual al de Brewster el rayo reflejado está polarizado en una dirección perpendicular al plano de incidencia (plano del papel).



Podemos escribir:

$$\text{Reflexión: } \hat{\theta}_B = \hat{r}_x$$

$$\text{Refracción: } n_1 \text{ sen } \hat{\theta}_B = n_2 \text{ sen } \hat{r}$$

$$\frac{\text{sen } \hat{\theta}_B}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta la relación entre los ángulos:

$$\hat{r}_x + 90 + \hat{r} = 180$$

$$\hat{r}_x = 90 - \hat{r}$$

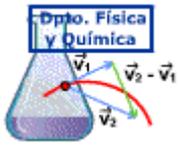
$$\theta_B = 90 - \hat{r}$$

Y como $\text{sen } \hat{r} = \text{cos } (90 - \hat{r}) = \text{cos } \theta_B$

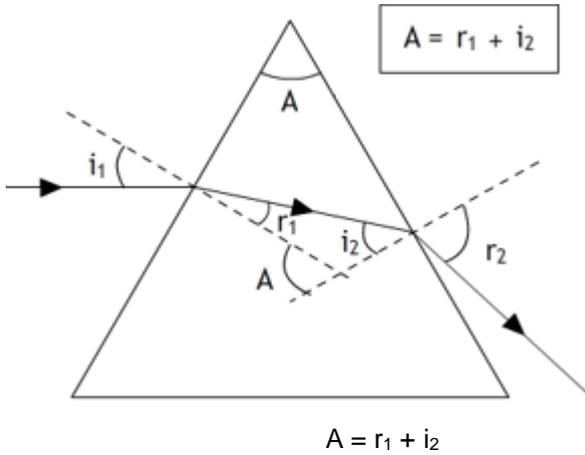
Podemos escribir la expresión (1) como:

$$\text{tg } \theta_B = \frac{\text{sen } \hat{\theta}_B}{\text{cos } \hat{\theta}_B} = \frac{n_2}{n_1}$$

Si $n_1 = 1$ (aire) la tangente del ángulo de Brewster nos da el índice de refracción del medio.



Refracción (Ampliación)



Si un rayo de luz incide sobre una de las caras de un prisma de vidrio con el ángulo adecuado, después de refractarse en la primera cara sufrirá una segunda refracción en la segunda saliendo desviado hacia su base (ver figura).

Aplicando la ley de Snell a cada refracción, y suponiendo que el medio es el aire, tendremos:

$$\text{sen}(i_1) = n \text{sen}(r_1)$$

$$n \text{sen}(i_2) = \text{sen}(r_2)$$

Los ángulos r_1 e i_2 se relacionan con el ángulo del prisma (generalmente 60°) según:

$$A = r_1 + i_2$$

Si el rayo incide con un ángulo nulo (esto es, perpendicularmente a la cara del prisma), atraviesa el vidrio sin sufrir refracción e incide en la otra cara con un ángulo igual al ángulo del prisma (60°). Como este ángulo es mayor que el ángulo límite para el vidrio (unos 40°) el rayo se reflejará totalmente saliendo perpendicular a la base del prisma sin refractarse. Para este caso particular el rayo atraviesa el prisma sin sufrir refracción alguna.

Si aumentamos el ángulo de incidencia en la primera cara, aumenta r_1 y disminuye i_2 . Por tanto llegará un momento en que i_2 sea igual al ángulo límite y el rayo se refracta en la segunda cara saliendo rasante a la misma.

Se puede calcular el ángulo de incidencia en la primera cara para el cual el rayo se refracta rasante en la segunda. Suponiendo $n = 1,60$ para el prisma:

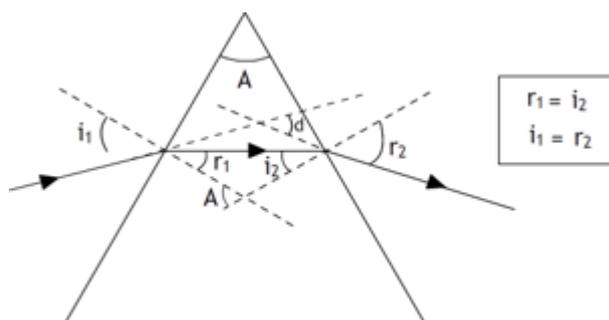
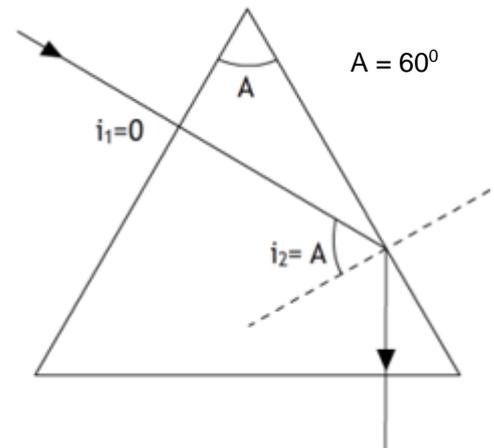
$$n \text{sen}(i_2) = \text{sen}(90^\circ) = 1; \text{sen}(i_2) = \frac{1}{n} = \frac{1}{1,60} = 0,6250 \Rightarrow i_2 = 38,7^\circ$$

$$A = r_1 + i_2; r_1 = A - i_2 = 60,0^\circ - 38,7^\circ = 21,3^\circ$$

$$\text{sen}(i_1) = n \text{sen}(r_1); \text{sen}(i_1) = 1,60 \text{sen}(21,3^\circ) = 0,5812 \Rightarrow i_1 = 35,5^\circ$$

A partir de este ángulo de incidencia se produce la refracción en la segunda cara. Luego:

- Para un ángulo de incidencia comprendido entre 0° y $35,5^\circ$, no hay refracción en la segunda cara. Se produce la reflexión total.
- Para un ángulo de incidencia mayor de $35,5^\circ$ y 90° , hay refracción en la segunda cara. El rayo emerge por la segunda cara del prisma acercándose cada vez más a la normal (ángulo de la segunda refracción cada vez más pequeño).



El ángulo d que forman el rayo incidente y el refractado mide la desviación sufrida por la luz en el prisma.

$$d = (i_1 - r_1) + (r_2 - i_2) = (i_1 + r_2) - (r_1 + i_2)$$

$$d = (i_1 + r_2) - A$$

A medida que aumenta el ángulo de incidencia (en la primera cara) el ángulo de desviación disminuye hasta llegar a un valor mínimo y después vuelve a aumentar

La desviación es mínima cuando el rayo que atraviesa el prisma lo hace paralelamente a la base (ver figura). Entonces se cumple:

$$r_1 = i_2 \Rightarrow (\text{aplicar ley de Snell}) i_1 = r_2$$

Por tanto para la desviación mínima tendrá lugar para un ángulo de incidencia:

$$\left. \begin{array}{l} A = r_1 + i_2 \\ r_1 = i_2 \end{array} \right\} A = 2 r_1 ; r_1 = \frac{A}{2}$$

$$\text{sen}(i_1) = n \text{sen}\left(\frac{A}{2}\right)$$

El ángulo de desviación mínima se puede obtener entonces a partir de la expresión:

$$r_1 = i_2 \Rightarrow (\text{aplicar ley de Snell}) i_1 = r_2 \quad \boxed{dm = 2(i_1) - A}$$

Teniendo en cuenta lo anterior y aplicando la ley de Snell tendremos:

$$\text{sen}(i_1) = n \text{sen}(r_1) ; \text{sen}\left(\frac{dm + A}{2}\right) = n \text{sen}\left(\frac{A}{2}\right)$$

$$\boxed{n = \frac{\text{sen}\left(\frac{dm + A}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{A}{2}\right)}}$$

La expresión anterior se usa para calcular el índice de refracción de un prisma. El procedimiento es el siguiente:

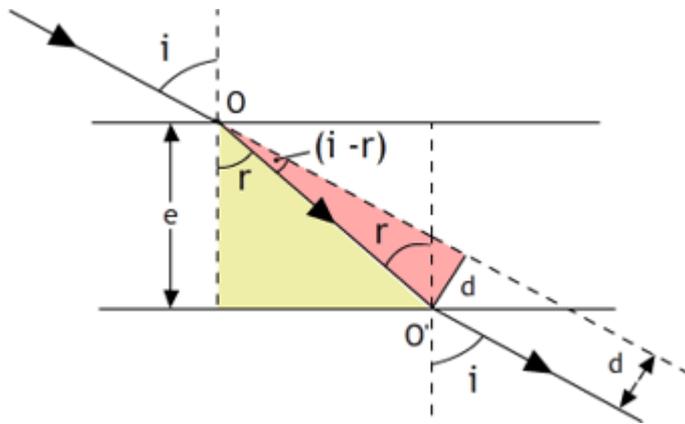
- Medir el ángulo del prisma (A) si no se conoce (generalmente $A = 60^\circ$).
- Girar el prisma hasta lograr que el rayo interior sea paralelo a la base. Posición de desviación mínima.
- Medir el ángulo de incidencia.
- Calcular el ángulo de desviación mínima a partir de: $dm = 2(i_1) - A$
- calcular n a partir de la expresión anterior.

Experiencias con el prisma:

1. Calcular el índice de refracción del prisma según el procedimiento explicado más arriba
2. Colocar el prisma sobre una superficie que pueda girar. Rotar la superficie hasta conseguir que el rayo incida perpendicularmente a la arista (no debe observarse refracción). Observar que existe reflexión total y que el rayo reflejado sale perpendicular a la base del prisma.
3. Girar la plataforma lentamente aumentando el ángulo de incidencia. Cuando el rayo reflejado salga rasante a la arista medir el ángulo de incidencia. Comparar el ángulo obtenido con el calculado teóricamente (ver página anterior)
4. Seguir aumentando el ángulo de incidencia. Aparece la refracción en la segunda cara. El rayo refractado se aproxima a la normal. Cuando el rayo que se propaga en el interior del prisma es paralelo a la base nos encontramos en la posición de desviación mínima del rayo incidente.
5. Observar que cuando la incidencia es rasante a la arista ($i_1 = 90^\circ$) el ángulo de refracción es igual al de incidencia calculado en el punto 3.

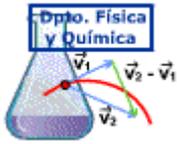
Un rayo que se refracta en una lámina de caras planas y paralelas sale paralelo a la dirección de incidencia, pero desplazado una cierta distancia (d) respecto del rayo incidente. El desplazamiento depende del espesor de la lámina, así como del ángulo de incidencia.

La desviación sufrida en una **lámina de caras paralelas** puede calcularse en la forma siguiente:



$$\left. \begin{aligned} \cos(r) &= \frac{e}{OO'} \\ \text{sen}(i - r) &= \frac{d}{OO'} \end{aligned} \right\} \frac{e}{\cos(r)} = \frac{d}{\text{sen}(i - r)}$$

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



INTERFERENCIA Y DIFRACCIÓN

La interferencia entre dos ondas (la luz es una onda electromagnética) tiene lugar cuando ambas coinciden en una región del espacio al mismo tiempo. Cuando esto sucede se suman (principio de superposición) produciendo una onda resultante (ver apuntes de ondas). **El fenómeno de la interferencia es algo característico del movimiento ondulatorio.**

Si consideramos dos luces idénticas que interfieren se puede producir:

- **Interferencia constructiva.**

Las amplitudes de ambas ondas se suman: $A_{RES} = A + A = 2A$

Como la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud, **la intensidad de la luz resultante (I_{RES}) de la interferencia tendrá una intensidad cuádruple que las luces que interfieren.** El resultado de la interferencia constructiva es, por tanto, luz mucho más intensa.

$$I_{RES} = (A_{RES})^2 = (2A)^2 = 4A^2 = 4I$$

Esto sucederá cuando la diferencia en fase valga:

$$\Delta\varphi = 2n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

Como:

$$\Delta\varphi = k \Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = 2n\pi$$

$$\boxed{\Delta x = n\lambda}$$

Dos luces idénticas interferirán constructivamente si llegan a un punto con una "diferencia en marcha" (diferencia en el espacio recorrido) igual a un múltiplo entero de longitudes de onda.

- **Interferencia destructiva.**

Las amplitudes de ambas ondas se restan: $A_{RES} = A - A = 0$

El resultado de la interferencia destructiva es la extinción de la luz, observándose una zona oscura.

Esto sucederá cuando la diferencia en fase valga:

$$\Delta\varphi = (2n + 1)\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\Delta\varphi = k \Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = (2n + 1)\pi$$

$$\boxed{\Delta x = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}}$$

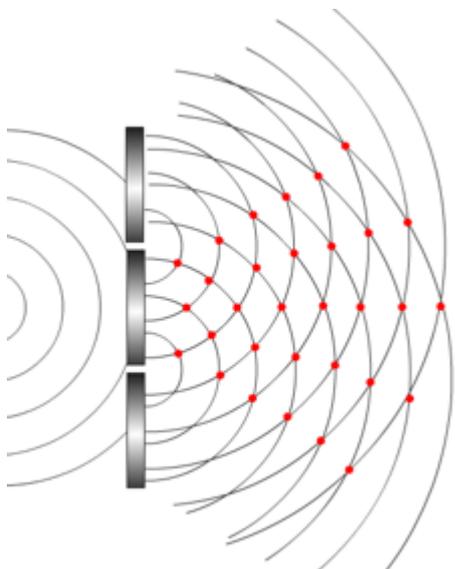
Dos luces idénticas interferirán destructivamente si llegan a un punto con una "diferencia en marcha" (diferencia en el espacio recorrido) igual a un número impar de semilongitudes de onda.

De lo dicho anteriormente se deduce que la interferencia de dos luces idénticas (igual longitud de onda y amplitud) debería de producir zonas de elevada intensidad y zonas oscuras.

En 1801 **Thomas Young** (1773-1829) diseñó una experiencia mediante la cual se pudo comprobar el desarrollo teórico expuesto. La experiencia, conocida con el nombre de **experimento de la doble rendija**, permitió obtener el patrón de interferencia de dos focos de luz idénticos. La luz, por tanto, se comportaba como una onda.

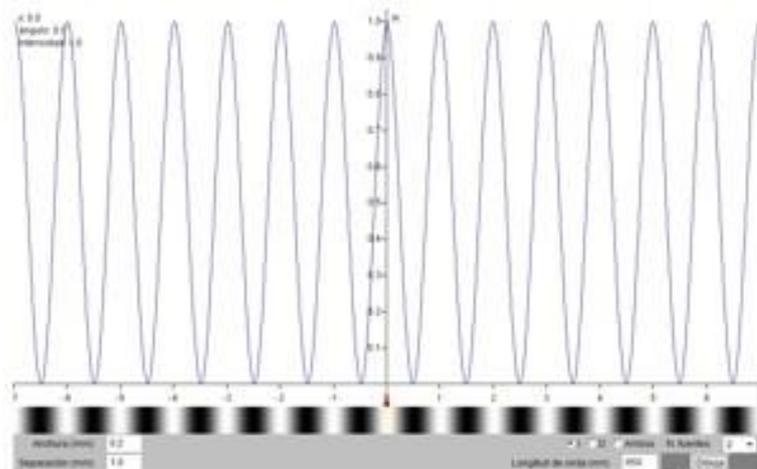
Debajo, y a la izquierda, se muestra un esquema del experimento de la doble rendija de Young.

La luz llega a dos rendijas muy estrechas y próximas y cada rendija se convierte en un foco secundario de ondas idénticas que interfieren formando un patrón de luz - oscuridad. Con puntos se señalan en el dibujo las zonas en las que existe interferencia constructiva (luz intensa). Entre ellas se sitúan las zonas en las que tiene lugar una interferencia destructiva (oscuridad). A la derecha se muestra una captura de pantalla en la que se muestra la distribución de los máximos y mínimos de intensidad debidos a la interferencia. En la parte inferior de esa figura se puede ver la distribución de zonas iluminadas (color gris) y oscuras (color negro) resultado de la interferencia de ambas ondas.



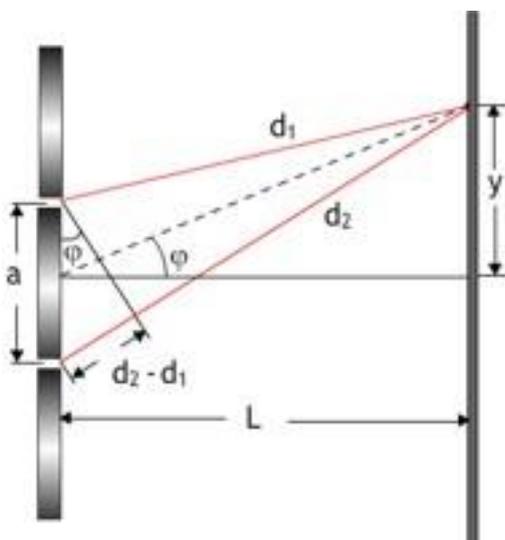
Esquema del experimento de la doble rendija de Young

Las dos rendijas se convierten en focos secundarios de ondas idénticas que interfieren.



Distribución de los máximos y mínimos de intensidad debidos a la interferencia en el experimento de la doble rendija.

(De la web **Física con ordenador** de **Ángel Franco**
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/redes/redes.htm>)



La interferencia se produce debido a la diferente distancia recorrida por las ondas procedentes de ambas rendijas.

Se obtendrá **interferencia constructiva (luz intensa)** si la diferencia de caminos de la luz procedente de ambas rendijas es igual a un número entero de longitudes de onda:

$$d_2 - d_1 = a \sin \varphi = n \lambda$$

Si suponemos que el ángulo es pequeño (pantalla alejada de las rendijas) se puede considerar que el seno y la tangente son iguales, entonces:

$$d_2 - d_1 = a \sin \varphi = a \operatorname{tg} \varphi = a \frac{y}{L} = n \lambda$$

$$y_{\text{luz}} = n \frac{\lambda L}{a}$$

Ampliación

Procediendo de forma análoga se obtiene la situación de las zonas de **interferencia destructiva (zonas oscuras)** :

$$d_2 - d_1 = a \sin \varphi = a \operatorname{tg} \varphi = a \frac{y}{L} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$y_{\text{osc}} = (2n + 1) \frac{\lambda L}{2a}$$

Difracción

La difracción de las ondas luminosas tiene lugar cuando se encuentran en su camino un obstáculo, por ejemplo un orificio, cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda de la luz que se propaga. La difracción de la luz, por tanto, solamente es apreciable para pequeños objetos.

El estudio matemático del fenómeno de la difracción fue llevado a cabo por **Agustín Fresnel** (1788-1827)

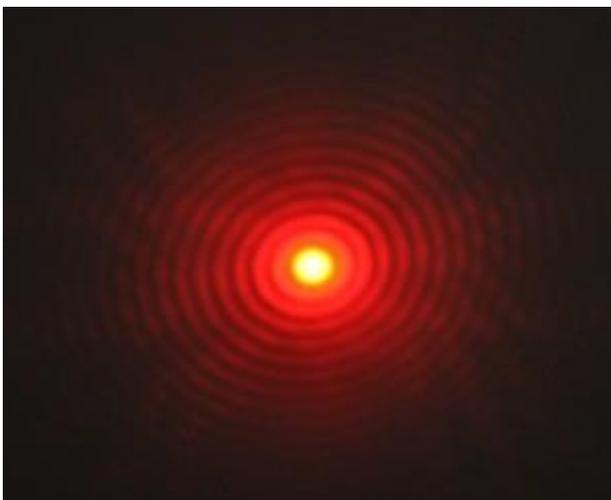


Figura de difracción producida por un agujero de pequeño tamaño al incidir sobre él un láser de He-Ne (luz roja de 633 nm).

Se observa claramente una gran intensidad en el centro y círculos brillantes y oscuros dispuestos de forma alternativa.

Consideremos una orificio de pequeñas dimensiones (como el que resulta de pinchar un cartón con un alfiler). Si hacemos incidir sobre él un láser, según el principio de Huygens todos los puntos del orificio se convierten en fuentes secundarias de ondas que interferirán entre ellas dando zonas de elevada intensidad (interferencia constructiva) y zonas oscuras (interferencia destructiva). **La difracción, por tanto, es debida a la interferencia producida por un número muy elevado de fuentes.**

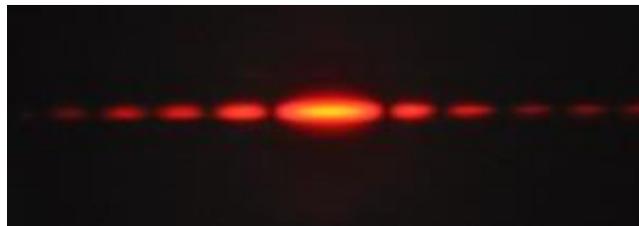


Figura de difracción obtenida haciendo incidir un punto de láser rojo sobre **una rendija** estrecha.

Se pueden observar las zonas de interferencia constructiva y destructiva y el máximo central, mucho más ancho y brillante.

Las zonas de interferencia constructiva tienen una intensidad decreciente a medida que nos alejamos del punto central, que presenta una anchura máxima.

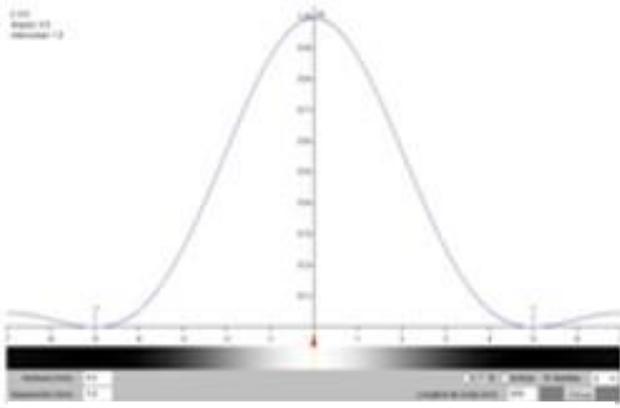
En el experimento de la doble rendija se superpone la interferencia con la difracción, de forma que la figura de interferencia se dice que queda *modulada* por la difracción. En lugar de obtenerse la distribución teórica de máximos y mínimos igualmente espaciados y con idéntica intensidad, se obtiene un máximo central muy brillante y a continuación zonas de sombra y luz que disminuyen su intensidad de acuerdo con el patrón de difracción correspondiente.



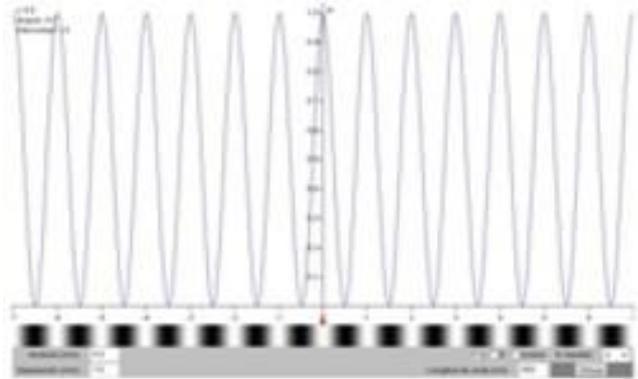
Difracción obtenida haciendo incidir un punto de láser sobre una **doble rendija**

La figura de interferencia queda modulada por la difracción.

En las zonas brillantes (difracción) pueden observarse líneas verticales luminosas y oscuras de forma alternada debido a la interferencia.

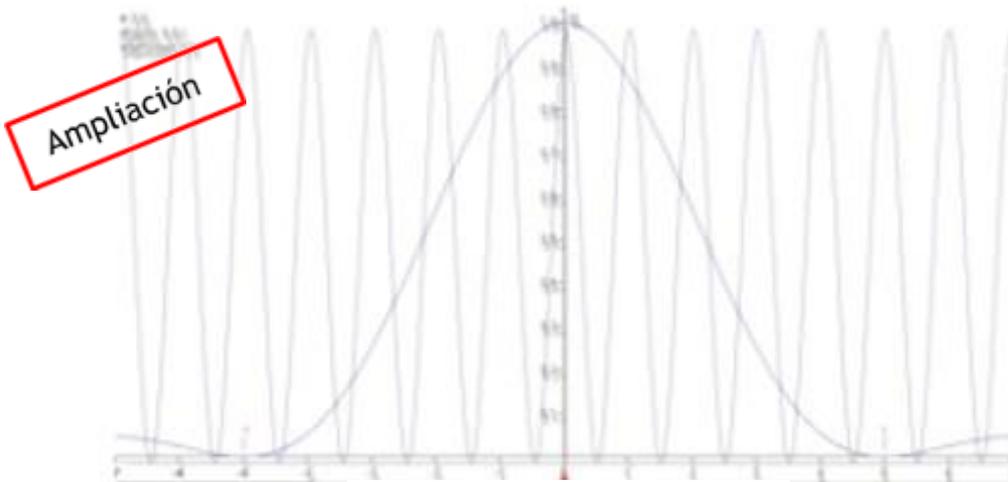


Distribución de los máximos y mínimos de intensidad debidos a la **difracción** en el experimento de la doble rendija.

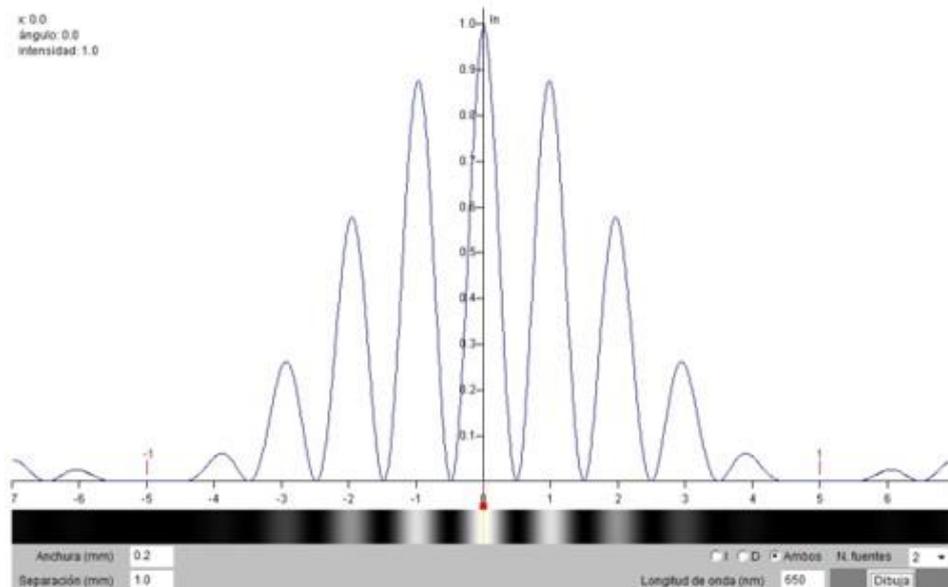


Distribución de los máximos y mínimos de intensidad debidos a la **interferencia** en el experimento de la doble rendija.

Distribución de los máximos y mínimos de intensidad de la doble



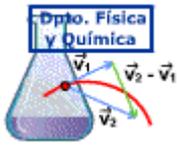
Superposición de ambas gráficas



Resultado final

Los máximos y mínimos de la interferencia resultan modulados por la difracción

Capturas de pantalla de la web **Física con ordenador** de **Ángel Franco**
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/redes/redes.htm>



ÓPTICA ÓPTICA GEOMÉTRICA

En la óptica geométrica se estudian los cambios de dirección experimentados por los rayos de luz cuando son reflejados o refractados mediante representaciones geométricas. Para trazar el camino de los rayos se tiene en cuenta lo siguiente:

- La luz cuando se propaga en un medio homogéneo lo hace en línea recta.
- Se supone que el tamaño de los obstáculos que la luz encuentra en su camino son muy grandes en comparación con su longitud de onda. Por tanto, no tienen lugar procesos de difracción.
- El trazado de los rayos se realiza siguiendo las leyes estudiadas para la reflexión y la refracción.
- Los rayos luminosos son reversibles.
- **La imagen de un punto se forma en la intersección de los rayos.** Si divergen después de la reflexión o la refracción, la imagen se forma en la intersección de su prolongación (en sentido opuesto al de propagación)

Reflexión en espejos planos

- Los rayos que llegan a un espejo se reflejan siguiendo las leyes de la reflexión.
- Un rayo que incida perpendicularmente al espejo se refleja sobre si mismo.
- La imagen se forma en la intersección de los rayos. Aparentemente está "en el interior del espejo", al otro lado de la superficie reflectante es derecha (no está invertida), del mismo tamaño, y a una distancia (s') igual a la que se sitúa el objeto del espejo (s). **Las imágenes que se forman al prolongar los rayos se denominan virtuales**, ya que no pueden ser recogidas por una pantalla

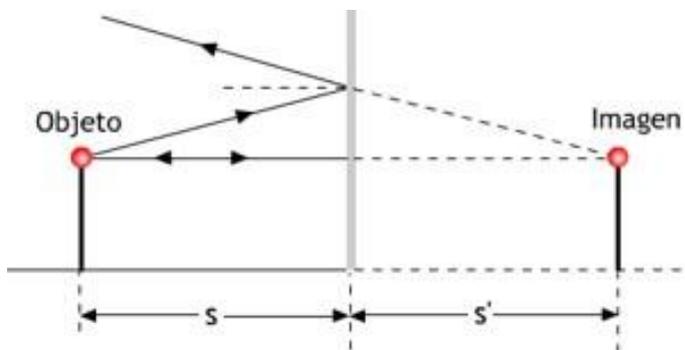
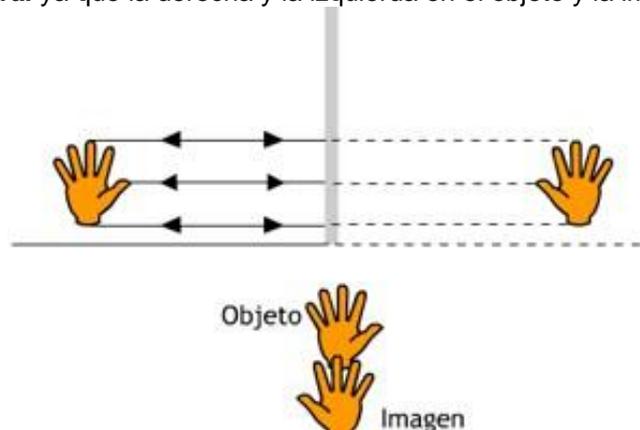


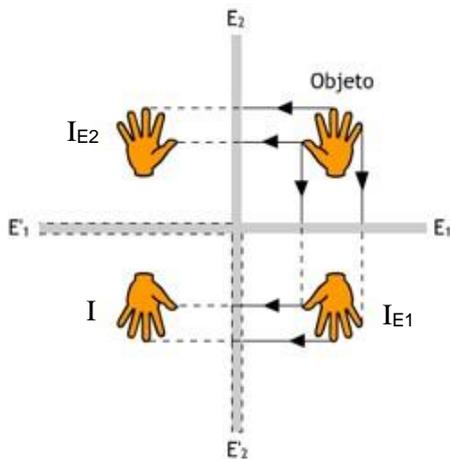
Imagen:

- Virtual
- Derecha
- Del mismo tamaño
- Distancia imagen=distancia objeto

- Las imágenes formadas por reflexión en un espejo plano presentan lo que se conoce con el nombre de **inversión lateral** ya que la derecha y la izquierda en el objeto y la imagen están invertidas.



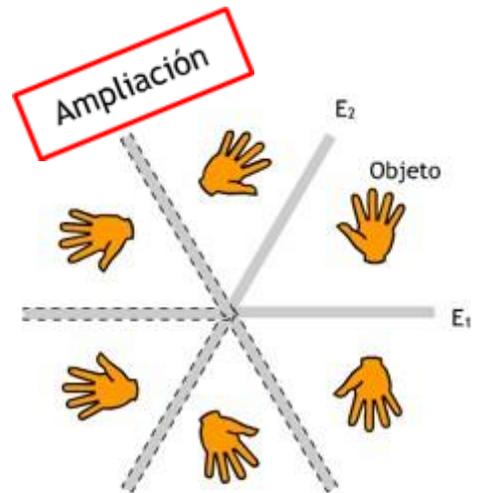
Si situamos dos espejos planos uno junto al otro, la imagen de uno se puede reflejar en el otro produciendo una repetición del objeto inicial. **El número de imágenes formadas dependerá del ángulo entre los espejos.**



En la imagen (izquierda) puede verse como dos espejos que forman un ángulo de 90° (E_1 y E_2) se reflejan mutuamente dando las correspondientes imágenes (E'_1 y E'_2). El objeto inicial situado entre ambos se refleja en E_1 obteniéndose la correspondiente imagen I_{E_1} , y en E_2 obteniéndose I_{E_2} . Tanto I_{E_1} como I_{E_2} sirven a su vez de objetos para la reflexión en los espejos E'_2 y E'_1 dando la imagen común I .

Como resultado de las reflexiones se **obtienen tres imágenes.**

Se muestra ahora (derecha) un esquema de la reflexión de un objeto en dos espejos que forman un ángulo de 60° (E_1 y E_2). Los espejos se reflejan dando imágenes



situadas en idéntica posición que los originales (ángulo de 60°). De manera similar al caso anterior las imágenes formadas sirven como objeto para el siguiente espejo. **Se obtienen cinco imágenes.**

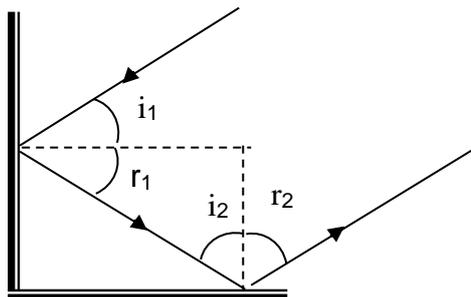
De forma general el número de imágenes formadas (N) depende del ángulo formado por los espejos :

$$N = \frac{360}{\alpha} - 1$$

Ejemplo 1

Dos espejos planos están colocados perpendicularmente entre sí. Un rayo que se desplaza en un plano perpendicular a ambos es reflejado primero en uno y luego en el otro. ¿Cuál es la dirección final del rayo respecto a su dirección original?

Solución:



Como se puede observar en la figura el rayo se refleja en dirección paralela al incidente, aunque en sentido contrario.

El ángulo de refracción final (segunda refracción) puede calcularse fácilmente considerando el triángulo rectángulo formado por la intersección de las normales a ambas caras (líneas discontinuas):

$$r_1 + i_2 = 90^\circ$$

$$\text{Como: } i_1 = r_1 \text{ e } i_2 = r_2$$

$$r_1 + r_2 = 90^\circ ; i_1 + r_2 = 90^\circ ; \boxed{r_2 = 90^\circ - i_1}$$

Por ejemplo para un ángulo de incidencia de 30° : $r_2 = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$

Refracción en lentes delgadas

En óptica recibe el nombre de **dioptrio** cualquier superficie que separe dos medios con distinto índice de refracción.

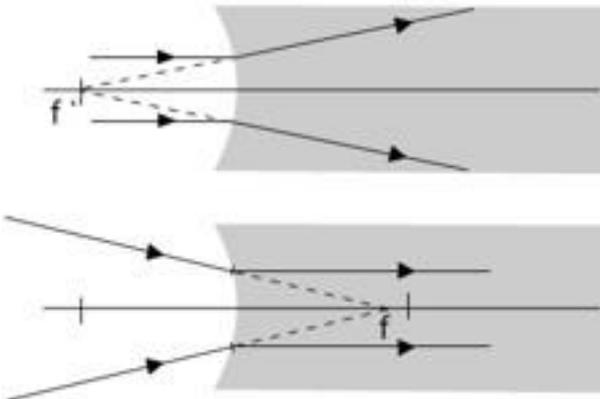
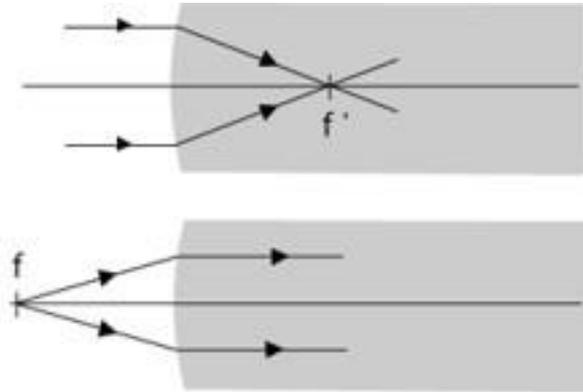
La superficie del agua o del vidrio es un dioptrio plano. Además del plano, el dioptrio más común (debido a su facilidad de fabricación) es el **dioptrio esférico**, la mayor parte de las lentes están limitadas por superficies esféricas.

Los dioptrios esféricos tienen dos focos:

El foco imagen es el punto en el que, tras refractarse, coinciden los rayos que llegan al dioptrio en dirección paralela al eje óptico. Es la imagen correspondiente a un punto situado en el infinito.

El foco objeto es el punto que tras pasar los rayos por él se refractan paralelos al eje óptico. La imagen del foco objeto está situada en el infinito.

En un **dioptrio convexo** el foco imagen está situado a la derecha y el foco objeto a la izquierda.



En un **dioptrio cóncavo** los focos objeto e imagen están situados al revés que en uno convexo: el foco imagen se sitúa a la izquierda y el foco objeto a la derecha.

Una lente es un sistema óptico limitado por dos dioptrios de los cuales uno, al menos, es esférico.

La desviación del rayo es consecuencia de la refracción en ambos dioptrios, aunque en las **lentes delgadas** se considera que la desviación del rayo tiene lugar en el centro de la lente.

En las lentes convergentes los rayos se refractan y emergen aproximándose al eje de la lente.

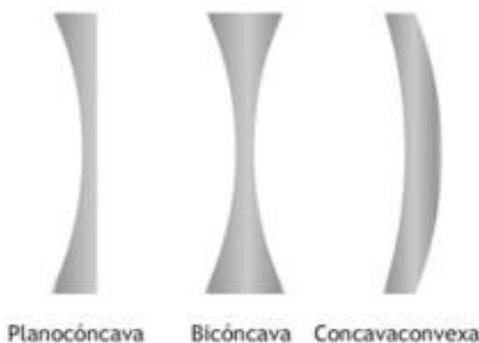
En las divergentes el rayo emerge alejándose del eje de la lente.

El que una lente sea convergente o divergente depende de su geometría.

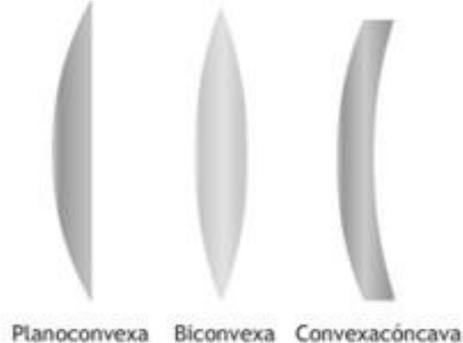


Izquierda: lente divergente (bicóncava)
Derecha: lente convergente (biconvexa)

Lentes divergentes



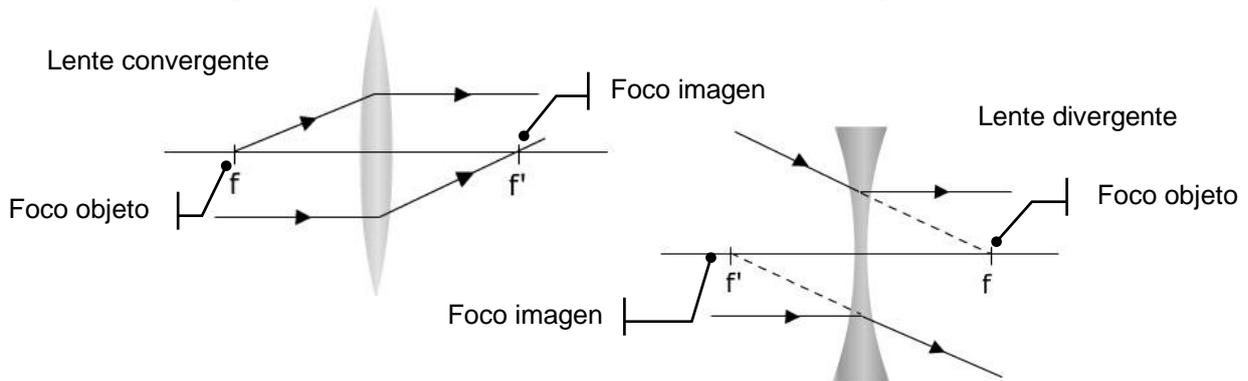
Lentes convergentes



Los focos de una lente son puntos característicos de las mismas, que están situados simétricamente respecto del centro de la lente.

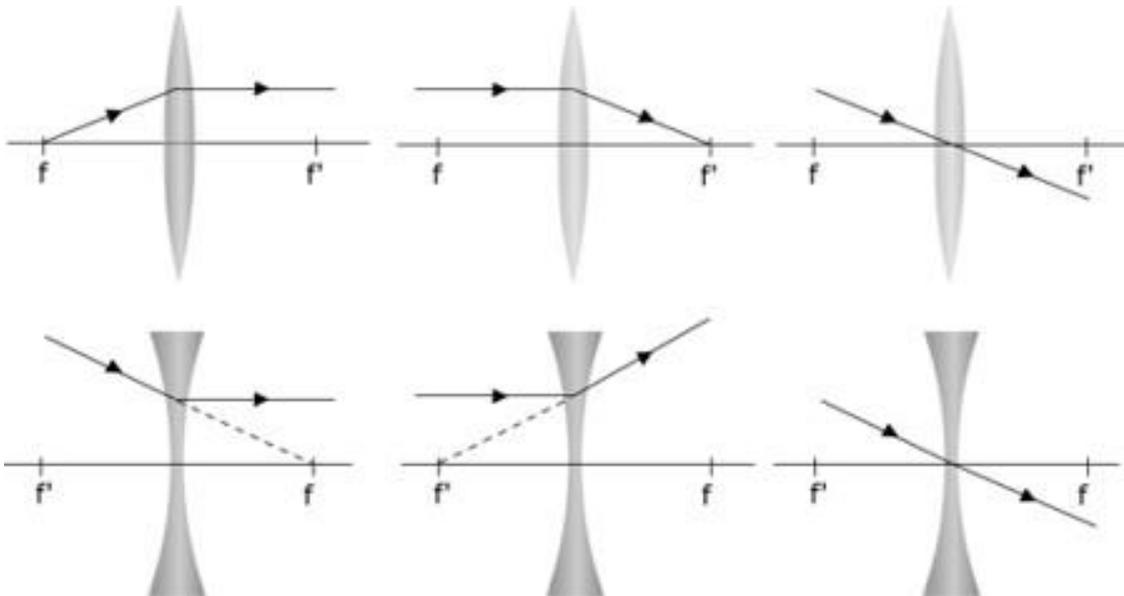
Una lente tiene dos focos: el **foco objeto** y el **foco imagen** (ver figura).

- **El foco objeto (f) es un punto del eje óptico tal que todo rayo que incide en la lente pasando por él se refracta paralelamente al eje de la lente (imagen en el infinito)**
- **El foco imagen (f') es el punto del eje óptico por el que pasa todo rayo refractado resultado de una incidencia paralela al eje de la lente.**
- En una lente convergente el foco objeto se sitúa a la izquierda y el foco imagen a la derecha.
- En una lente divergente el foco objeto se sitúa a la derecha y el foco imagen a la izquierda.



Si suponemos que el espesor de la lente es pequeño (lentes delgadas) se pueden considerar los siguientes rayos característicos:

- **Cualquier rayo paralelo al eje de la lente se refracta pasando por el foco imagen.**
- **Todo rayo que incida pasando por el foco objeto se refracta paralelamente al eje de la lente.**
- **Cualquier rayo que incida pasando por el centro de la lente no sufre refracción alguna.**



La distancia focal de una lente delgada situada en el aire depende del índice de refracción de la lente y de los radios de curvatura de sus superficies:

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

Ampliación

La ecuación que relaciona distancia objeto (s), distancia imagen (s') y distancia focal imagen (f'), para las lentes delgadas es:

Se define la imagen.

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

Los criterios de signos son análogos a los fijados para los espejos: **positivo** hacia la derecha y hacia arriba, **negativo** a la izquierda y hacia abajo
potencia de una lente como la inversa de su distancia focal

La potencia de una lente está relacionada con su capacidad para hacer converger o divergir los rayos de luz. A mayor potencia mayor capacidad de convergencia o divergencia de los rayos. Las lentes con mayor potencia tienen una distancia focal corta.

La unidad en el Sistema Internacional es la **dioptría (D) que se define como la potencia de una lente que tenga un metro de distancia focal**

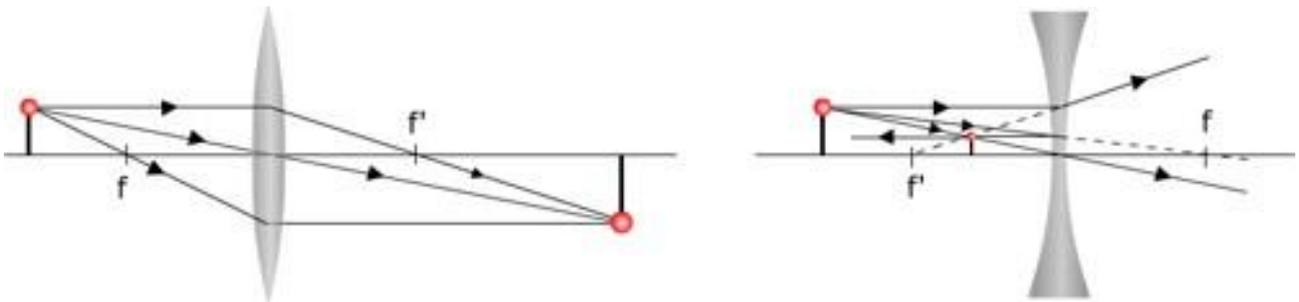
$$P = \frac{1}{f'}$$

Para sistemas formados por varias lentes la potencia se obtiene sumando la potencia de las lentes que integran el sistema.

Para calcular el **aumento lateral** de la imagen formada por una lente:

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

Las imágenes en las lentes delgadas se obtienen a partir del trazado de los rayos característicos. La imagen se formará en el punto en el que se corten los rayos (imagen real) o sus prolongaciones (imagen virtual)



Rayos característicos en lentes

- Rayo paralelo al eje se refracta pasando por el foco imagen (f').
- Rayo que pasa por el centro óptico de la lente, no se refracta.
- Rayo que pasa por el foco objeto (f) se refracta paralelo al eje.

Ejemplo 4 (Oviedo 2010 - 2011)

Usando una lente convergente con distancias focales $f = f' = 4,0$ cm, mediante un diagrama de rayos, determine la posición y el aumento lateral de la imagen que produce dicha lente de un objeto de 1,5 cm de altura situado perpendicularmente al eje óptico a 6,0 cm de la lente y expónganse las características de dicha imagen.

Solución:

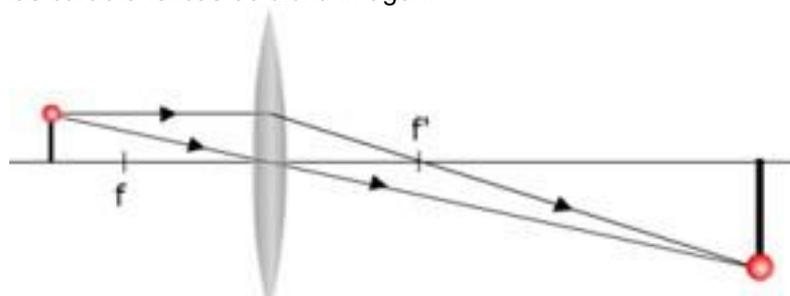


Imagen real, invertida y mayor que el objeto

Los datos cuantitativos solicitados pueden obtenerse a partir de un dibujo a escala. A continuación se obtienen de forma analítica:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} ; \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{4} + \frac{1}{(-6)} = \frac{1}{12} ; \boxed{s' = 12,0 \text{ cm}}$$

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = \frac{12}{(-6)} = -2 ; \boxed{y' = m y = -2 \cdot 1,5 \text{ cm} = -3,0 \text{ cm}}$$

Los datos obtenidos coinciden con los obtenidos a partir del diagrama de rayos:

Imagen situada a la derecha, real (s' positiva), invertida (y' negativa), mayor que el objeto.

Ejemplo 5 (Oviedo 2009 - 2010)

Usando una lente divergente con distancias focales $f = f' = 5,0 \text{ cm}$, mediante un diagrama de rayos, determine la posición y el aumento lateral de la imagen que produce dicha lente de un objeto de $1,5 \text{ cm}$ de altura situado perpendicularmente al eje óptico a $8,0 \text{ cm}$ de la lente y expónganse las características de dicha imagen.

Solución:

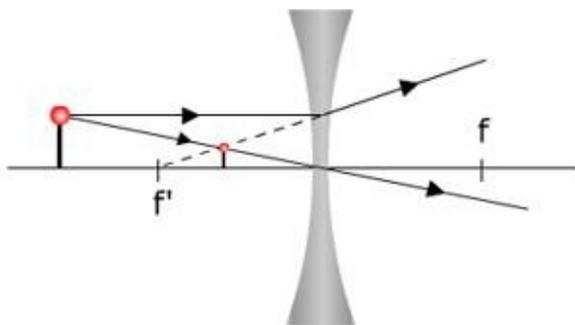


Imagen virtual, derecha y más pequeña que el objeto

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} ; \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{(-5)} + \frac{1}{(-8)} = -\frac{13}{40} ; \boxed{s' = -3,1 \text{ cm}}$$

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = \frac{(-3,1)}{(-8)} = 0,39 ; \boxed{y' = m y = 0,39 \cdot 1,5 \text{ cm} = 0,59 \text{ cm}}$$

Imagen situada a la izquierda, virtual (s' negativa), derecha (y' positiva), más pequeña que el objeto.

Ejemplo 6 (Oviedo 2009 - 2010)

¿Qué es la dioptría? Calcule el número de dioptrías de una lente de distancia focal 25 cm

Solución:

La dioptría (D) es la unidad (S.I.) de medida de la potencia de una lente, que se define como el inverso de la distancia focal. Una dioptría es la potencia de una lente que tenga una distancia focal de $1,0 \text{ m}$. Dimensionalmente:

$$P = \frac{1}{f} ; [P] = [L^{-1}]$$

$$1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Para una lente de distancia focal } 25 \text{ cm: } P = \frac{1}{f} ; P = \frac{1}{0,25 \text{ m}} = 4 \text{ m}^{-1} = 4 \text{ D}$$

Ejemplo 7 (Oviedo 2007 - 2008)

Encontrar mediante un diagrama de rayos la imagen creada por:

a) Una lente convergente de $2,0 \text{ cm}$ de distancia focal de un objeto situado a $4,0 \text{ cm}$.

b) Un espejo plano de un objeto situado a 2,0 cm.

Describir en ambos casos las características más importantes de la imagen

Solución:

a)

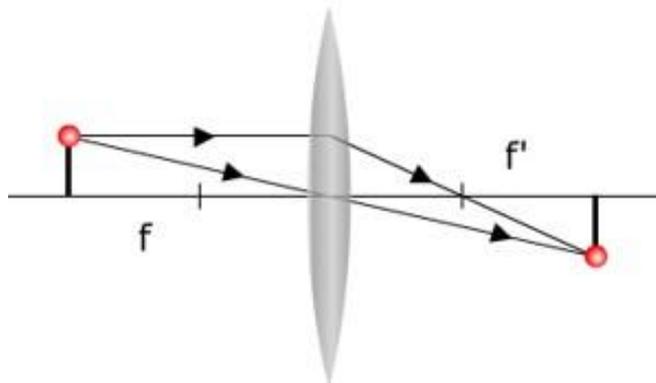


Imagen real, invertida e igual que el objeto

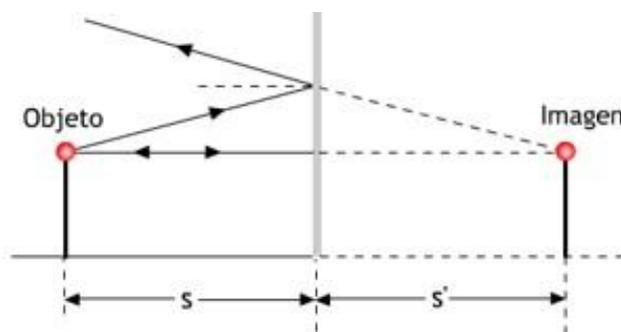
Analíticamente (como no se conoce el tamaño del objeto, el aumento se calcula para comprobar - únicamente que la imagen es invertida y del mismo tamaño que el objeto):

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} ; \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{2} + \frac{1}{(-4)} = \frac{1}{4} ; \boxed{s' = 4,0 \text{ cm}}$$

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = \frac{4}{(-4)} = -1 ; \boxed{y' = m y = -1 \cdot x \text{ cm} = -x \text{ cm}}$$

Imagen situada a la derecha, real (s' positiva), invertida (y' negativa), e igual que el objeto.

b) Un espejo plano forma siempre una **imagen virtual, derecha y del mismo tamaño que el objeto** que se encuentra situada a la misma distancia del espejo. La imagen presentará inversión lateral: la izquierda y la derecha está invertidas respecto del objeto.



Sistemas (instrumentos) ópticos

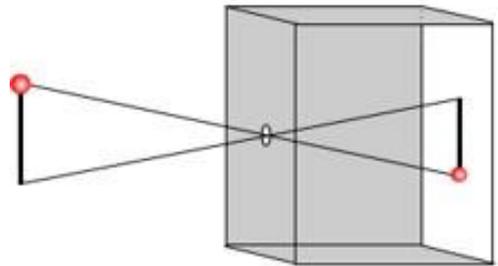
Combinando dos o más elementos ópticos (lentes, espejos... etc.) podemos construir **sistemas ópticos**. En estos sistemas, o instrumentos ópticos, en muchas ocasiones, la imagen formada por uno de los elementos sirve de objeto para el otro.

1. Cámara oscura. Cámara fotográfica.

El instrumento óptico más simple es la cámara oscura, donde no existe ningún elemento óptico, sólo un pequeño orificio que, debido a la propagación rectilínea de la luz, forma una imagen invertida de la imagen.

La primera cámara oscura de la que se tiene noticia fue construida por **Aristóteles** (384 a.C.- 322 a.C.). Esta es su propia descripción del invento:

"Se hace pasar la luz a través de un pequeño agujero hecho en un cuarto cerrado por todos sus lados. En la pared opuesta al agujero, se formará la imagen de lo que se encuentre enfrente".



Leonardo da Vinci (en la segunda mitad del s XV) redescubre la cámara oscura que fue muy utilizada posteriormente para dibujar objetos.

En el s. XVI **Giovanni Battista della Porta** dotó a la cámara oscura de una lente biconvexa que mejoraba notablemente la nitidez de la imagen.

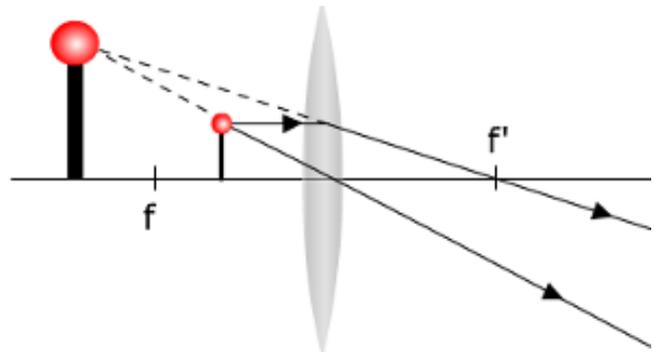
La cámara oscura evolucionó con el tiempo hacia la cámara fotográfica, en la que la imagen se forma sobre una película fotosensible.

2. Lupa

Un simple lente convergente nos permite ver los objetos aumentados si los situamos entre el foco y la lente.

Se obtiene una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño, situada detrás del objeto.

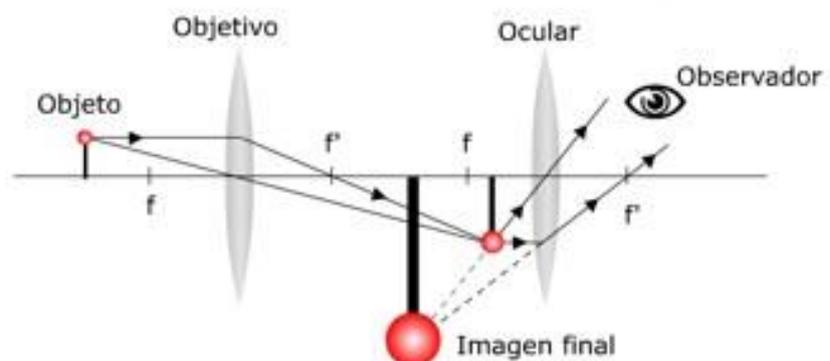
La potencia de la lupa depende de su distancia focal. Las lupas más potentes tienen una distancia focal corta, lo que se consigue dando un radio de curvatura pequeño a la lente (lente muy curvada).



3. Microscopio

El microscopio ya es un verdadero sistema óptico. Se utiliza para ver objetos muy próximos y de pequeño tamaño. Consta de dos lentes convergentes. La que se sitúa más próxima al ojo se denomina **ocular** y la que está próxima al objeto, **objetivo**.

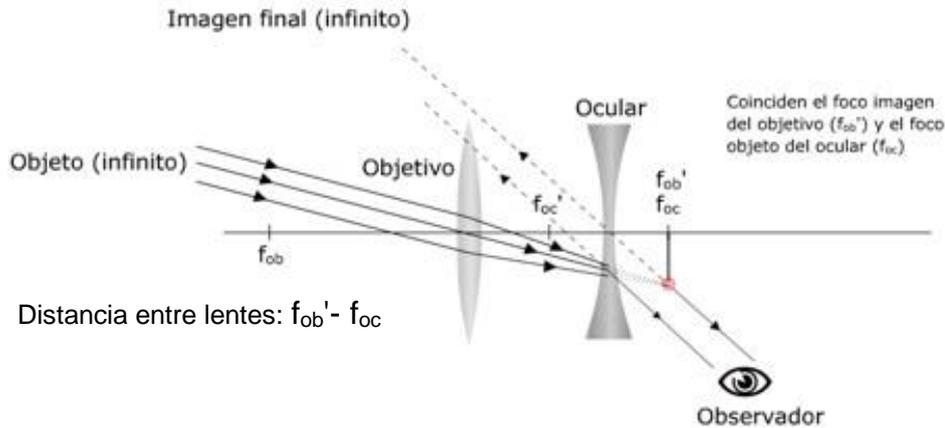
El objeto se coloca a una distancia mayor que la distancia focal del objetivo y su imagen (real) ampliada, sirve de objeto para la segunda lente. Si la imagen de la primera lente se coloca entre el foco y la segunda lente, ésta proporcionará una imagen nuevamente ampliada.



4. Anteojo de Galileo

El objetivo es una lente convergente con una gran distancia focal y el ocular una lente divergente.

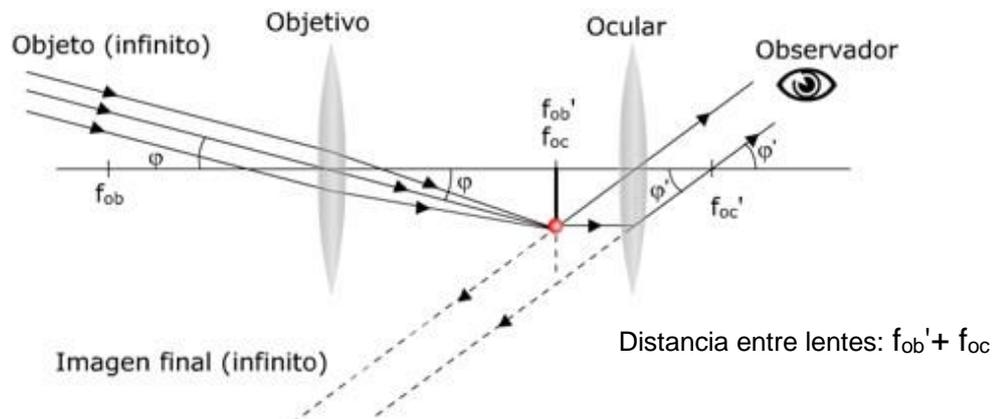
Los rayos, al proceder de un objeto lejano inciden prácticamente paralelos formando la imagen en el plano focal imagen del objetivo. Antes de formarse esta imagen se encuentran con el ocular (lente divergente), cuyo foco objeto coincide con el imagen del objetivo, de forma que los rayos se refractan paralelos, y la imagen final (virtual) se forma en el infinito (el ojo forma en la retina las imágenes situadas en el infinito sin acomodación alguna). La imagen formada en la retina es mayor y derecha.



5. Telescopio astronómico (o de Kepler)

Se utiliza para ver objetos grandes situados a mucha distancia. Consta de dos lentes convergentes, objetivo y ocular.

Como el objeto está a una distancia muy grande los rayos procedentes de él llegan paralelos, con lo que se refractan en el objetivo formando una imagen en el plano focal imagen (plano que contiene al foco imagen). El foco imagen del objetivo y el foco objeto del ocular coinciden, por tanto la imagen formada por el ocular (virtual) se encuentra en el infinito. Es invertida y mayor.



En los sistemas telescópicos (que forman la imagen en el infinito) se define el **aumento angular (M)** como el cociente entre el ángulo subtendido por la imagen final y el objeto:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}(\varphi') &\approx \varphi' = \frac{y}{f_{oc}'} \\ \operatorname{tg}(\varphi) &\approx -\operatorname{tg}(\varphi) \approx -\varphi = \frac{y}{f_{ob}'} \end{aligned} \right\} M = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{\frac{y}{f_{oc}'}}{-\frac{y}{f_{ob}'}} = -\frac{f_{ob}'}{f_{oc}'} ; \quad \boxed{M = -\frac{f_{ob}'}{f_{oc}'}}$$

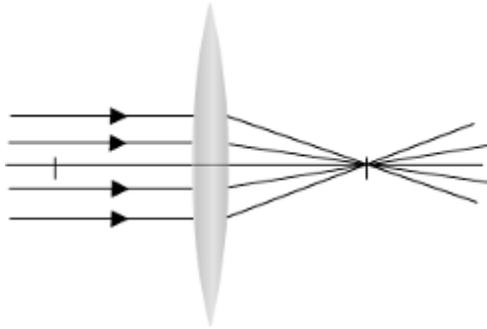
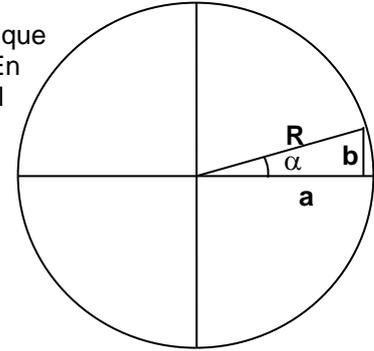
$$M = \frac{\varphi'}{\varphi}$$

La aproximación paraxial

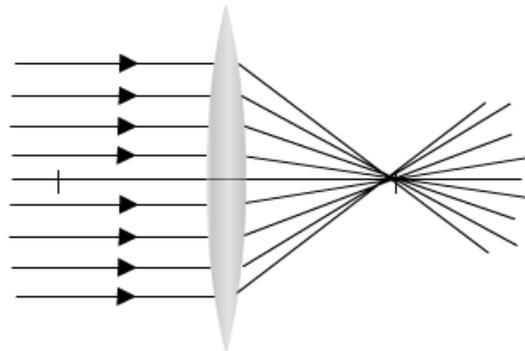
Las ecuaciones utilizadas son válidas en la llamada **“zona paraxial”**, que incluye rayos que inciden en la lente no **muy alejados del centro óptico**. En esta zona los ángulos que se consideran son pequeños y, si medimos el ángulo en radianes, podemos hacer las siguientes aproximaciones:

Ángulo en radianes: $\alpha \text{ (rad)} = \frac{\text{arco}}{R}$

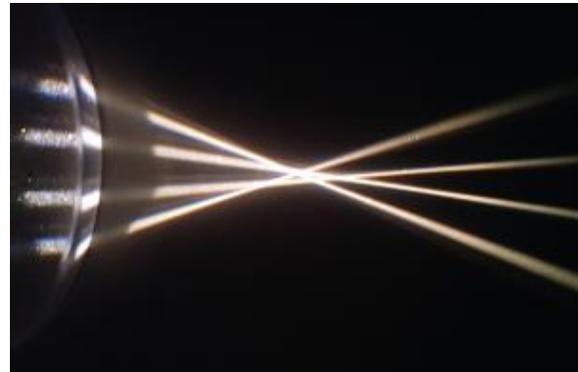
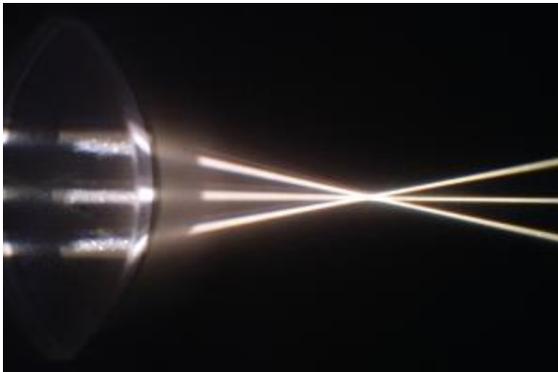
$$\sin \alpha = \frac{b}{R} \approx \frac{\text{arco}}{R} \approx \alpha \quad \cos \alpha = \frac{a}{R} \approx \frac{R}{R} \approx 1 \quad \text{tg } \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \approx \sin \alpha \approx \alpha$$



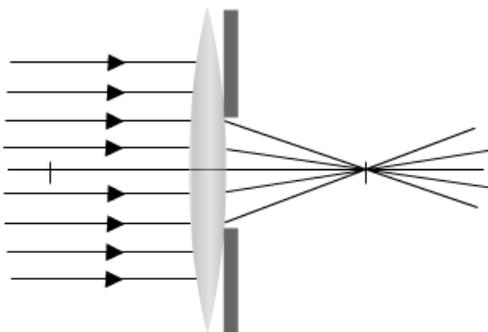
Rayos en la **zona paraxial** (rayos no muy alejados del eje óptico) los rayos refractados se cortan en un punto formando una imagen nítida.



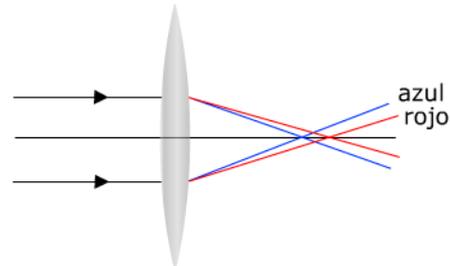
Rayos en la **zona no paraxial**, los rayos refractados no se cortan en un punto, la imagen no es nítida. El fenómeno recibe el nombre de **aberración esférica**.



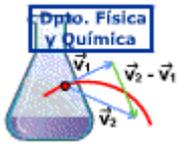
Izquierda: rayos refractados en una lente convergente que inciden en la zona paraxial. Los rayos refractados se cortan en un punto. Derecha: rayos que inciden más alejados del eje óptico (zona no paraxial).



La aberración esférica se evita diafragmando las partes más exteriores de la lente.



Debido a que los distintos colores tienen distinto índice de refracción en el vidrio, salen refractados con ángulos diferentes, y no se cortan en un punto. Las imágenes no aparecen nítidas y están coloreadas. Es el fenómeno de la **aberración cromática**.



ÓPTICA EL OJO HUMANO

El ojo humano es un órgano, aproximadamente esférico y de unos 25 mm de diámetro, cuya función consiste en transformar la luz visible en impulsos que son enviados al cerebro mediante el **nervio óptico**.

Las partes principales del ojo son:

- **Córnea.** Parte más externa y transparente. Sirve de protección a las partes más internas (iris y cristalino) y permite el paso de la luz, que sufre en ella una primera refracción.
- **Iris.** Es una membrana coloreada (la que da color al ojo) que tiene en su centro un orificio (**pupila**) cuyo tamaño se modifica para permitir la entrada de más o menos luz. Funciona como un diafragma.
- **Cristalino.** Lente convergente (biconvexa) cuya curvatura puede modificarse mediante los músculos ciliares, permitiendo de este modo que objetos situados a diferentes distancias resulten enfocados en la retina (acomodación). Su índice de refracción es considerable.
- **Humor acuoso.** Líquido transparente que llena la cámara anterior del ojo.
- **Humor vítreo.** Líquido transparente y gelatinoso que llena el espacio comprendido entre el cristalino y la retina.
- **Retina.** Tejido sensible a la luz que tapiza la parte posterior del ojo. Al incidir la luz se producen en la retina reacciones químicas que generan impulsos eléctricos que son enviados al cerebro mediante el nervio óptico. En su parte central está **la fovea** (superficie aproximada :1 cm²). Es el área en la que se enfocan los rayos y permite una visión detallada y precisa.
- **Las células fotorreceptoras** de la luz son **los bastones** y **los conos**. Son ellas las que transforman la energía luminosa en impulsos eléctricos.

Los bastones (120 millones) Son muy sensibles a la luz por lo que nos permiten ver cuando la luminosidad es escasa (visión nocturna). No detectan los colores (visión en blanco y negro). Se ubican, fundamentalmente, en la zona periférica de la retina.

Los conos (6,5 millones). Permiten la visión de los colores. Hay tres tipos de conos, sensibles cada uno de ellos, a los colores primarios: rojo, verde y azul. El cerebro interpreta los colores a partir de la intensidad de estimulación de los diferentes tipos de conos. Están situados en la parte central de la retina (fovea).

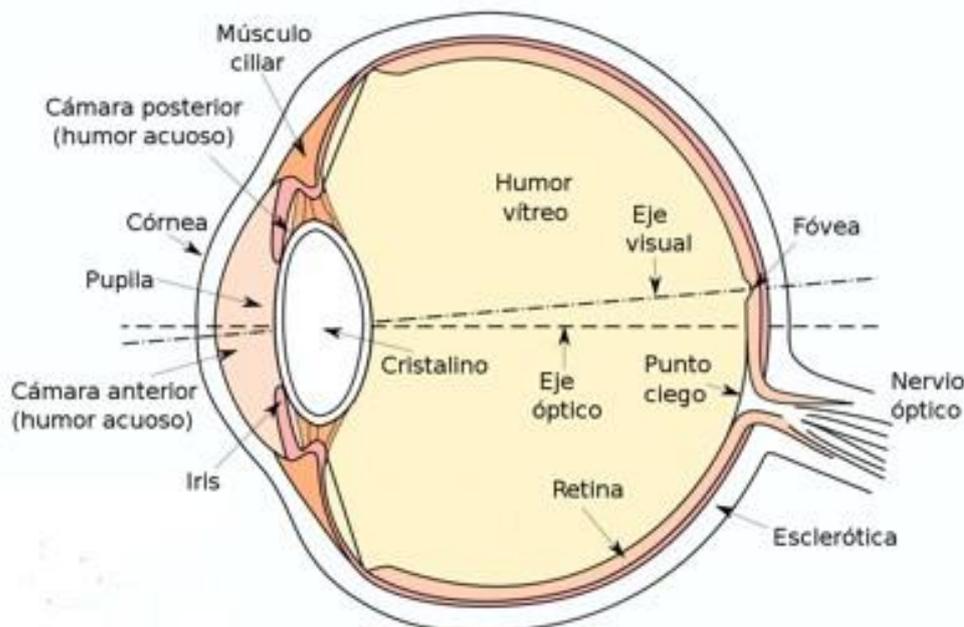
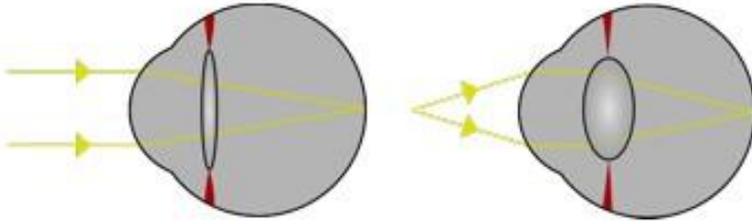


Imagen. Fuente: Wikipedia



Para enfocar correctamente los objetos situados en el infinito (izquierda) los músculos ciliares, que controlan la curvatura del cristalino, se relajan. El cristalino adquiere su mínima curvatura y los rayos convergen en la retina formando una imagen nítida del objeto.

Cuando tratamos de ver un objeto situado a corta distancia los músculos ciliares se tensan aumentando la

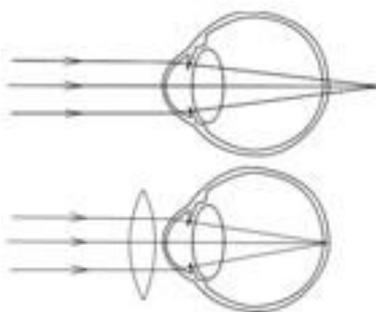
curvatura del cristalino. Su distancia focal disminuye produciendo una convergencia más acusada y la imagen se forma correctamente en la retina.

Gracias al control involuntario de la curvatura del cristalino (proceso que recibe el nombre de acomodación), podemos ver nítidamente objetos situados lejos (infinito) y cerca.

Lógicamente la acomodación tiene un límite. El ojo humano no es capaz de enfocar correctamente objetos situados a menos de 25 cm (**punto próximo**).

En algunas ocasiones el ojo no enfoca correctamente las imágenes, lo que produce una disminución de la agudeza visual que se conoce de forma general con el nombre de **ametropía**.

La miopía, la hipermetropía y el astigmatismo son las principales ametropías. Todas ellas se pueden corregir con el uso de lentes.



Ojo hipermetrope (arriba).
Corrección con una lente convergente (abajo).

Ojo hipermetrope

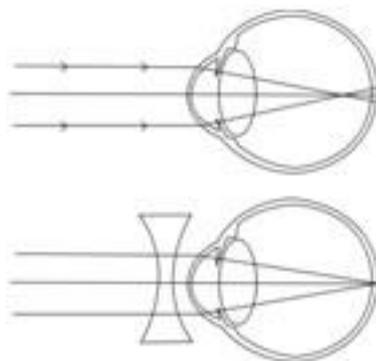
Un ojo hipermetrope forma la imagen de un objeto detrás de la retina. La imagen es, por tanto, borrosa, poco nítida.

Los hipermetros tienen el punto próximo más alejado que una persona normal (tienden a alejar el texto que tratan de leer).

La visión de objetos lejanos puede ser prácticamente normal.

La hipermetropía se corrige con lentes convergentes, que aumentan la convergencia natural del ojo, logrando que la imagen se forme en la retina.

El tratamiento quirúrgico consiste en modificar la curvatura de la córnea mediante láser o en el implante de una lente intraocular que corrija el defecto de convergencia del cristalino.



Ojo miope (arriba).
Corrección con una lente divergente (abajo).

Ojo miope

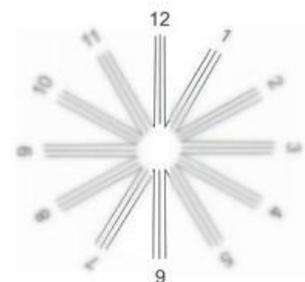
Un ojo miope presenta un exceso de convergencia por lo que forma la imagen antes de la retina ocasionando una visión borrosa, sobre todo de los objetos situados lejos.

Los miopes tienen el punto próximo más cerca que una persona normal (tienden a acercar el texto que tratan de leer).

La miopía se corrige con lentes divergentes, mediante las cuales los rayos de un objeto situado lejos divergen antes de llegar al ojo compensando así la excesiva convergencia de éste.

La miopía también se puede corregir mediante cirugía. El tratamiento quirúrgico consiste en modificar la curvatura de la córnea mediante láser o mediante el implante de una lente intraocular que corrija el exceso de convergencia del cristalino.

Ojo astigmático. El astigmatismo es un defecto (normalmente congénito) debido a que la córnea presenta distinta curvatura en el plano horizontal y el vertical. Esto provoca una visión de los objetos ligeramente deformados. Por ejemplo, las letras se ven como si hubiera una sombras detrás o estuvieran deformadas. Se corrige con lentes cilíndricas.



Visión de una persona con astigmatismo

La visión de los colores

A pesar de lo que normalmente se cree el color de los objetos no es un atributo de éstos (un objeto no es rojo o amarillo), sino que depende tanto de la luz que incida sobre dicho objeto como del observador que capte la luz procedente de los mismos. En palabras del propio Newton:

".. .si en todo momento hablo de luz y de rayos como coloreados, se debe entender que hablo no filosóficamente y con propiedad, sino groseramente, porque los rayos, por hablar con propiedad, no son coloreados."

Isaac Newton

Percibimos el color de un objeto como resultado de un proceso que implica:

- **La interacción de las ondas electromagnéticas con dicho objeto.** Como resultado parte de la energía de la luz es absorbida por el objeto (la energía luminosa se transforma en energía cinética de las moléculas del cuerpo provocando un calentamiento de éste) y otra parte es reflejada.
- **La recepción de la luz procedente de los objetos que, convenientemente interpretada, nos produce la sensación de color.** La luz reflejada por los objetos es la que perciben nuestros ojos. En la retina se convierte en impulsos eléctricos que son transmitidos al cerebro donde es interpretada produciéndonos la sensación de color.

La teoría tricromática, propuesta originalmente por Thomas Young (principios del s. XIX), y más tarde desarrollada por Helmholtz en 1866, explica la forma en la que apreciamos los colores:

- Nuestra retina está equipada con tres tipos de células (conos) sensibles a los colores: **rojo, verde y azul** del espectro (**colores primarios**).
- **Los colores resultan de la mezcla de estos tres colores primarios.**



En la **síntesis aditiva** los colores primarios se suman produciendo los demás colores.

Si suponemos idéntica intensidad para los tres colores primarios:

Verde + Rojo = Amarillo

Rojo + Azul = Magenta

Verde + Azul = Cian

Rojo + Verde + Azul = Blanco

Mezclando los tres colores primarios con intensidades diferentes se obtienen todos los demás colores.

Cuando la luz incide sobre un objeto **se produce una absorción parcial de la misma** produciéndose la visión de los colores por la mezcla de las luces reflejadas:

- Si un objeto **absorbe la luz verde y la azul, reflejará la roja**. Concluiremos, por tanto, que **el objeto es de color rojo**. De manera análoga se puede explicar el color verde o azul.
- Si el objeto **absorbe la luz azul, reflejará la verde y la roja**. La mezcla de ambas da amarillo. Concluiremos, por tanto, que **el objeto es de color amarillo**.
- Si el objeto **absorbe la luz verde, reflejará la azul y la roja**. La mezcla de ambas da magenta. Concluiremos, por tanto, que **el objeto es de color magenta**.
- Si el objeto **absorbe la luz roja, reflejará la azul y la verde**. La mezcla de ambas da cian. Concluiremos, por tanto, que **el objeto es de color cian**.
- Los demás colores se forman modificando la intensidad de los colores primarios que se reflejan.

Ejemplo 1

Explicar cuál será el color de un objeto que es amarillo cuando se ilumina con luz blanca

- a) Si se ilumina con luz azul.
- b) Si se ilumina con luz roja.

Solución

Si el objeto es amarillo cuando es iluminado con luz blanca es porque absorbe la luz azul y refleja la luz roja y la verde con idéntica intensidad, que al ser percibidas por el ojo dan como resultado la síntesis aditiva del amarillo.

Si se ilumina con luz azul, no reflejará luz alguna (absorbe el azul). El objeto aparecerá negro.

Si se ilumina con luz roja reflejará este color (refleja el rojo y el verde). El objeto aparecerá rojo.

La notación empleada en los programas informáticos para los colores ilustra de una manera clara la teoría tricromática.

En el llamado código RGB (red, green blue) los colores se escriben mediante notación hexadecimal ⁽¹⁾ mediante seis dígitos, precedidos del signo #. Los dos primeros dan la intensidad del color rojo, los dos siguientes la intensidad para el verde y los dos últimos la intensidad para el azul.



De acuerdo con esto el código para los colores primarios será:

FF0000 : Rojo

00FF00 : Verde

0000FF : Azul

Combinando éstos obtenemos al amarillo, magenta y cian:

FFFF00 : Amarillo

FF00FF : Magenta

00FFFF : Cian

Algunos ejemplos:

FF6633 : Mezcla de rojo puro (FF) verde de una intensidad media-baja (66) y azul poco intenso (33)



0099FF : Color formado con nada de rojo (00) verde de una intensidad media (99) y azul muy intenso (FF)



(1) El sistema hexadecimal de numeración emplea dieciséis dígitos, los diez del sistema decimal, más seis letras, de la A a la F: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F