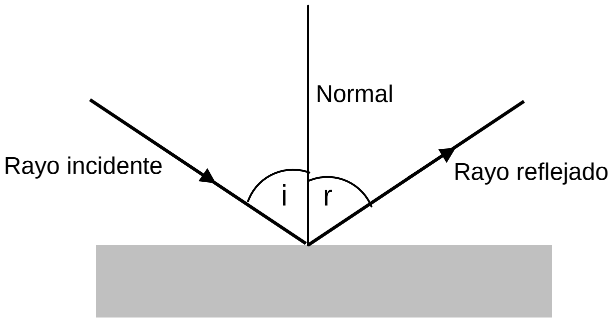
Dpto. Física y Química	**OPTICA** **REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN**	**IES La Magdalena. Avilés. Asturias**

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.



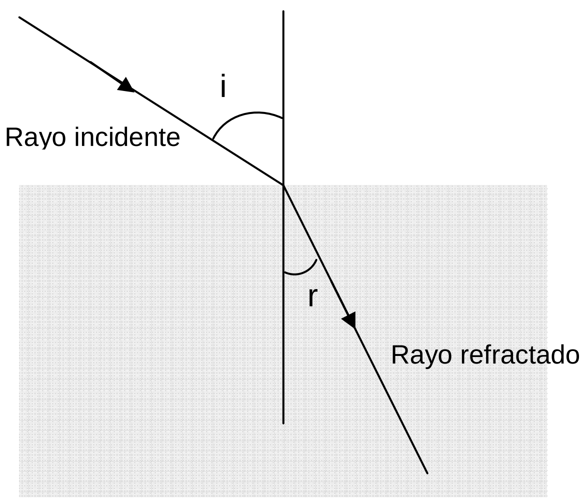
Se denomina **ángulo de incidencia (i)** al formado por el rayo incidente y la normal a la superficie y **ángulo de reflexión (r)** al formado por el rayo reflejado y la normal.

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)***

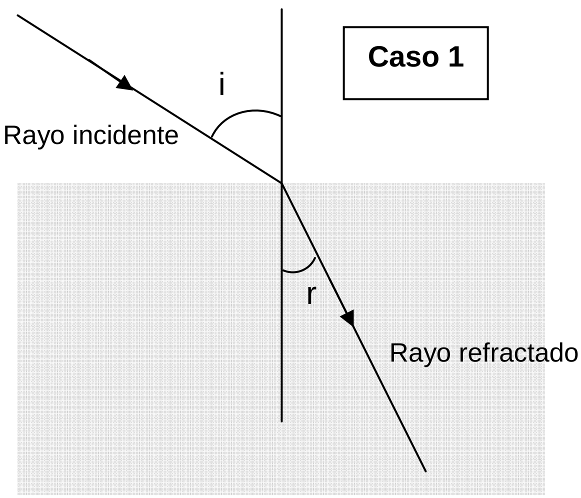
$$\mathbf{n_1 \,sen\, i = n_2 \,sen\, r}$$

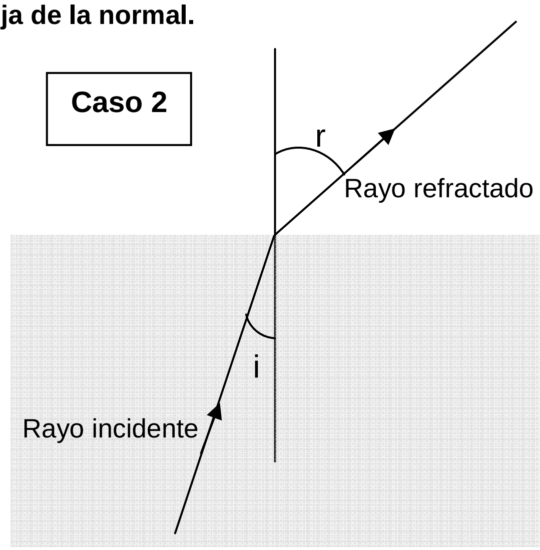
donde $\mathbf{n_1}$ es el índice de refracción del primer medio, o medio en el que se propaga el rayo incidente, y $\mathbf{n_2}$ es el índice de refracción del segundo medio o medio en el que se propaga el rayo refractado.

En la refracción se pueden distinguir dos casos:

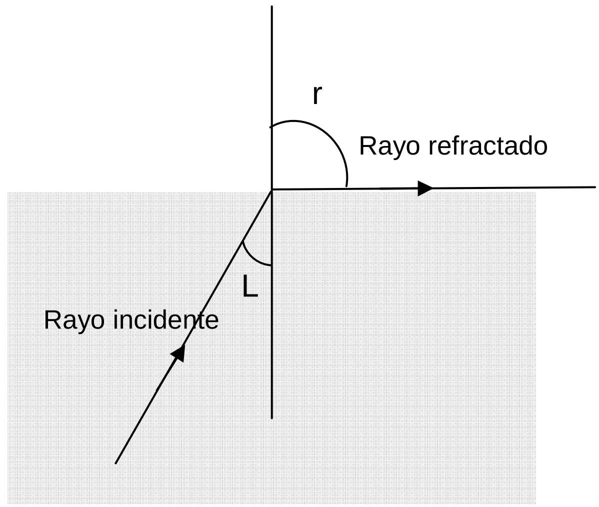
Caso 1: cuando la luz pasa de un medio en el que se propaga con mayor velocidad (como el aire) a otro en el que se propaga más lentamente (como el vidrio o el agua). Dicho con otras palabras, **cuando pasa de un medio con menor índice de refracción a otro con mayor índice de refracción.** Si aplicamos 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 ($r = 90^0$). 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:



$$n_1 \,sen(i) = n_2 \,sen(r)$$

$$n_1 \,sen(L) = n_2 \,sen(90^0) = n_2$$

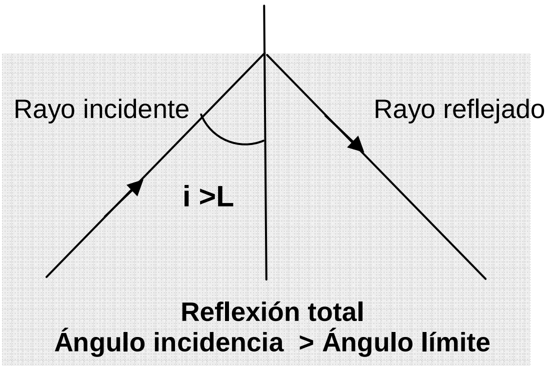
$$\boxed{sen\,(L) = \frac{n_2}{n_1}}$$

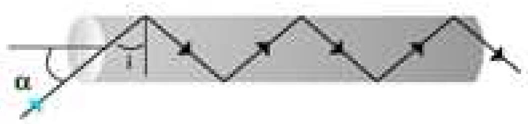
Para el sistema vidrio-aire, considerando un vidrio que tenga un índice de refracción de 1,50:

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

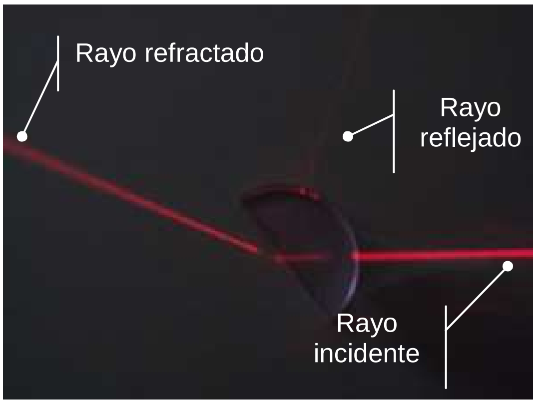
Si seguimos aumentando el ángulo de incidencia de forma que **su valor sea superior al ángulo límite se produce el fenómeno de la reflexión total**. Esto es, no existe refracción. La luz se refleja en la superficie de separación de ambos medios.

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)

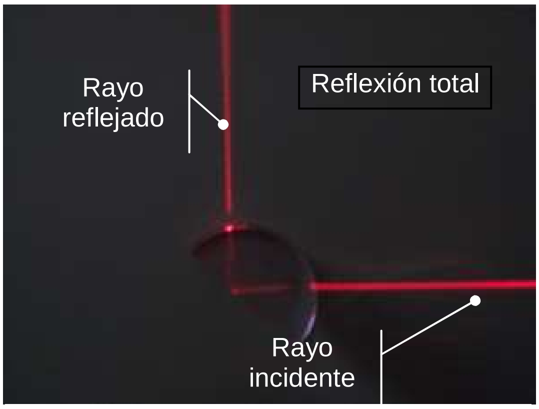




La luz se puede guiar a través de un filamento de vidrio o plástico, ya que si incide sobre las paredes con un ángulo superior al límite se produce el fenómeno de la reflexión total quedando confinada en su interior. Este es el fundamento de la fibra óptica.



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 60^0. Sabiendo que el vidrio tiene un índice de refracción de 1,53. Calcular:

a) Velocidad de propagación de la luz en el vidrio.
b) Ángulo con el que se refracta el rayo.

Solución

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

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

b) Aplicamos la Ley de Snell: $n_1 = n_{aire}$; $n_2 = n_{vidrio}$

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

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

Como la luz pasa del aire (n_{aire} = 1,00) al vidrio (n_{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 ^{0} y que el agua tiene un índice de refracción de 1,33, calcular el ángulo de refracción.

Solución

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

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

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

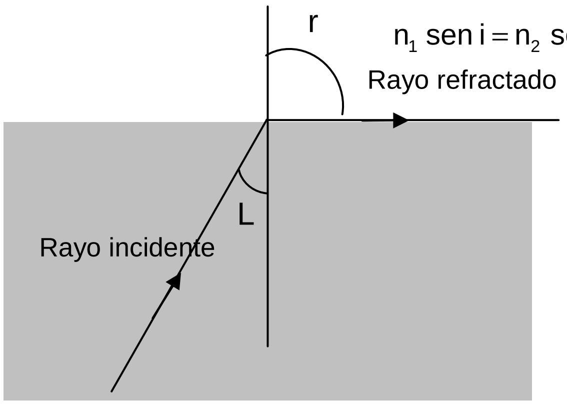
Como la luz pasa del agua (n_{agua} = 1,33) al aire (n_{aire} = 1,00), el ángulo de refracción es superior al de incidencia: el rayo refractado se aleja de la normal.

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 90^0 (sen 90^0 = 1) . Aplicando la ley de Snell con $n_1 = n_{vidrio}$; $n_2 = n_{aire}$



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

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

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

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 $25{,}0^0$ 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

Deterrmine 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 vídrio utilizaremos la Ley de Snell: n_1 sen i = n_2 sen r. Ahora $n_1 = n_{aire}$ = 1,00 ; $n_2 = n_{vidrio.}$ Despejando n_2 :

$$n_2 = \frac{n_1 \text{ seni}}{\text{senr}} = \frac{\text{seni}}{\text{senr}}$$

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:

$$n = \frac{\text{seni}}{\text{senr}} = \frac{\text{sen}\left(25^0\right)}{\text{sen}\left(17{,}5^0\right)} = 1{,}41 \qquad n = \frac{\text{seni}}{\text{senr}} = \frac{\text{sen}\left(25{,}0^0\right)}{\text{sen}\left(17{,}1^0\right)} = 1{,}44$$

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):

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

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

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

- 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:

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

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

Ejemplo 5 (Oviedo, 2009 - 2010)

Razonando la respuesta, diga si es cierto que al aumentar de 10^0 a 20^0 el ángulo de incidencia de un rayo en una superficie plana el ángulo de refraccíón también se duplica.

Solución:

Aplicando la ley de Snell, y suponiendo que pasa del aire al vidrio: sen i = n 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 : $\text{sen}\,(2\alpha) \approx 2\,\text{sen}\,(\alpha)$

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

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

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

$$\text{Como } r_1 \text{ será también pequeño :}$$

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

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

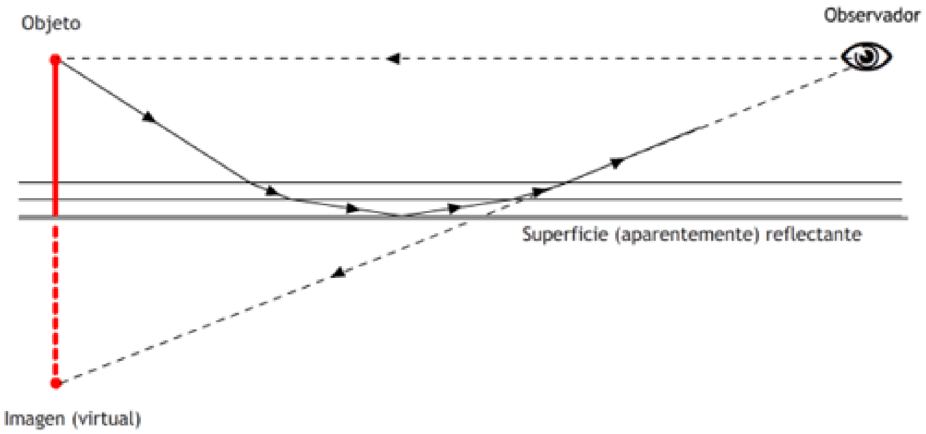
Si suponemos un vidrio de n = 1,50 se puede comprobar lo anterior realizando los cálculos correspondientes:

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

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

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

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

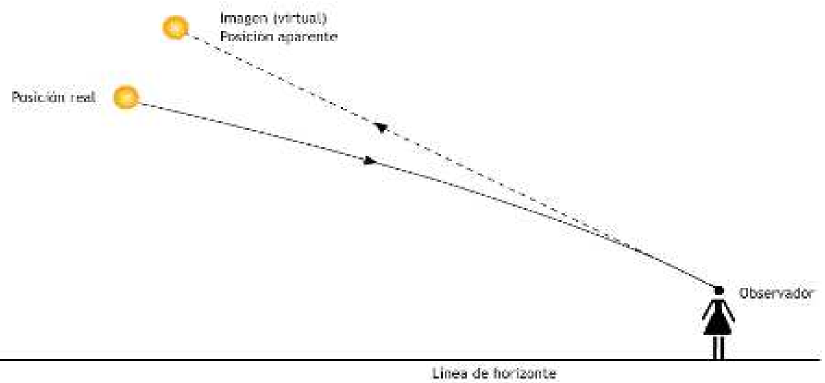


Las capas en contacto con el suelo están más calientes lo que provoca que su índice de refracción sea menor que el de las capas superiores. Así, un rayo que se propaga de arriba abajo se desvía alejándose de la normal hasta que sufre refraccion total. En la trayecto de ascenso pasa de zonas en las que 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).

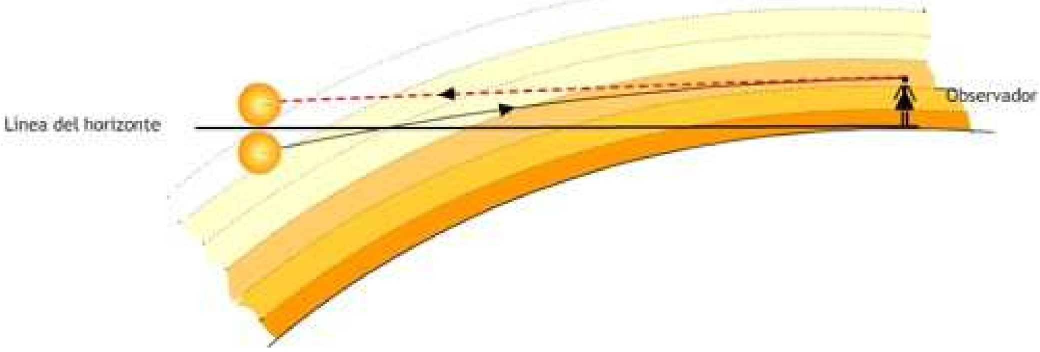
El mismo efecto es el responsable del aspecto de "carretera mojada" que se puede observar en los días soleados (ver imagen).

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 estella.



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:***

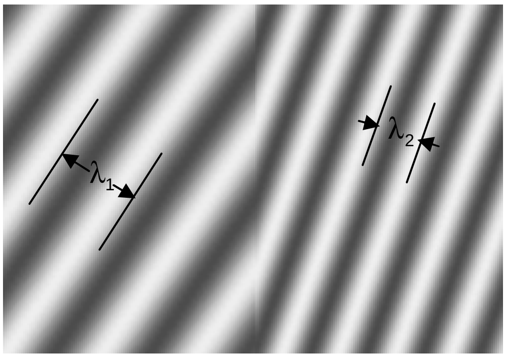
$$\left.\begin{array}{l} v_1 = \lambda_1 f \\ v_2 = \lambda_2 f \end{array}\right\} \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Como :

$$\left.\begin{array}{l} n_1 = \dfrac{c}{v_1} \\ n_2 = \dfrac{c}{v_2} \end{array}\right\} \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

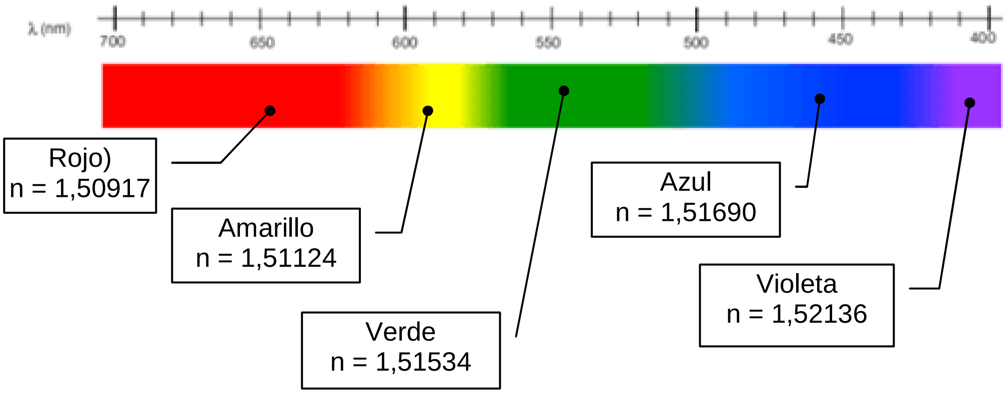
Por tanto :

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



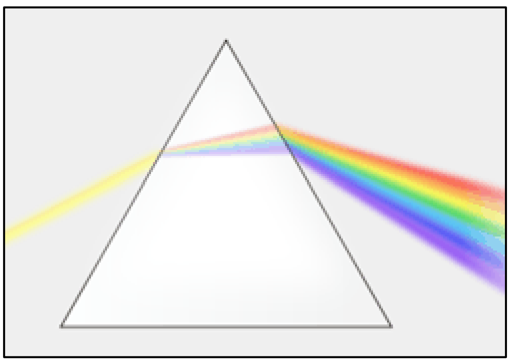
Disminución de la longitud de onda al pasar de un medio con mayor velocidad de propagación (izquierda) a otro con menos velocidad de propagación (derecha)

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.***

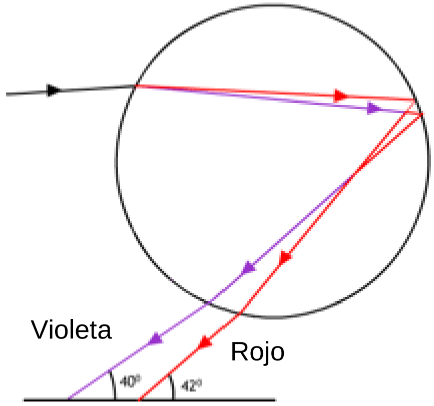


La dispersión de la luz del sol por las gotas de lluvia da lugar al ***arco iris.***

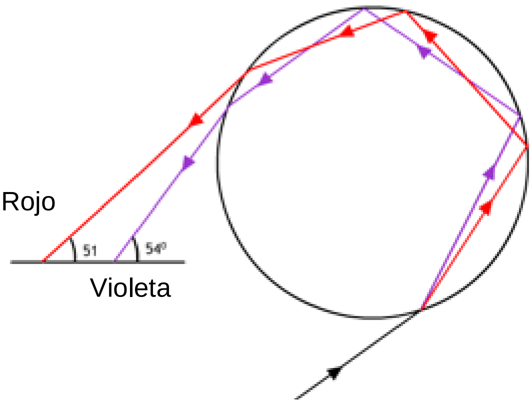
Cuando tenemos el sol situado a nuestra espalda, en las gotas de lluvia se produce la refracción y reflexión de la luz de forma similar a lo que ocurre con un prisma, de forma tal que la luz blanca emerge nuevamente descompuesta en sus colores como consecuencia de la dispersión que se produce en el interior 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 42^0 para el color rojo y 40^0 para el violeta. Los demás colores muestran desviaciones máximas comprendidas entre estos valores.

Todas la s gotas colocadas en un semicírculo que forme 42^0 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.

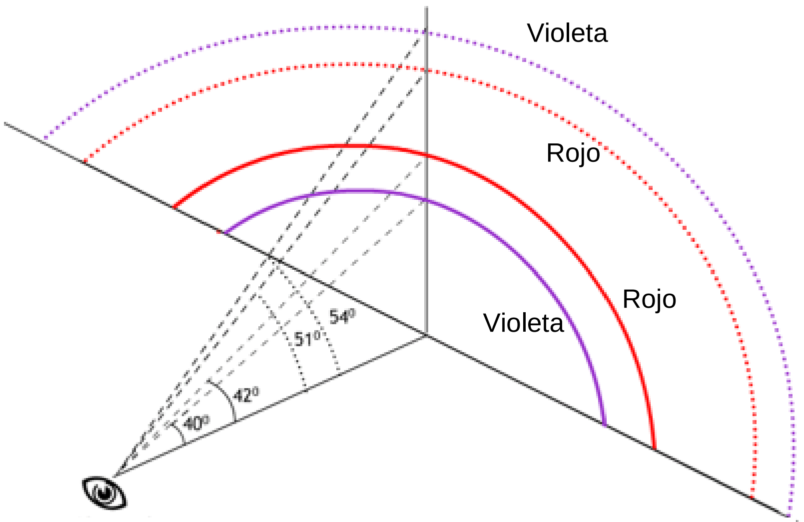
El arco iris secundario aparece como consecuencia de una doble reflexión en el interior de las gotas. Como consecuencia el color violeta emerge con una mayor inclinación (54^0)que el rojo (51^0).

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 20^0 se forma un espectro.

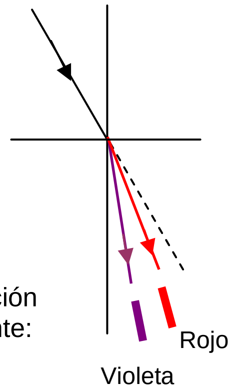
a) ¿Qué se refracta más el rojo o el violeta? (explíquese incluyendo un dibujo).
b) Determine la separación angular en minutos de arco sexagesimal de los rayos refractados para los extremos rojo y violeta.

Solución:

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

$$\mathrm{sen}\,(r_R) = \frac{n_V}{n_R}\ \mathrm{sen}\,(r_v)$$

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



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:

$$\mathrm{sen}(i) = n_V\ \mathrm{sen}\,(r_v) \ ; \ \mathrm{sen}\,(r_v) = \frac{\mathrm{sen}(i)}{n_V} = \frac{\mathrm{sen}(20^0)}{1,472} = 0,23235 \Rightarrow \boxed{r_v = 13,435^0}$$

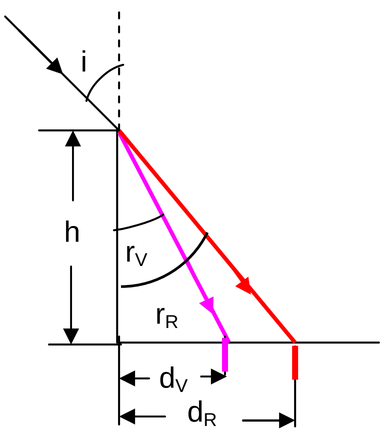
$$\mathrm{sen}(i) = n_R\ \mathrm{sen}\,(r_R) \ ; \ \mathrm{sen}\,(r_R) = \frac{\mathrm{sen}(i)}{n_R} = \frac{\mathrm{sen}(20^0)}{1,455} = 0,23507 \Rightarrow \boxed{r_R = 13,595^0}$$

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

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 27^0, 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:



$$\mathrm{sen}(i) = n_V\ \mathrm{sen}\,(r_v)\ ;\ \mathrm{sen}(i) = n_R\ \mathrm{sen}\,(r_R)$$

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

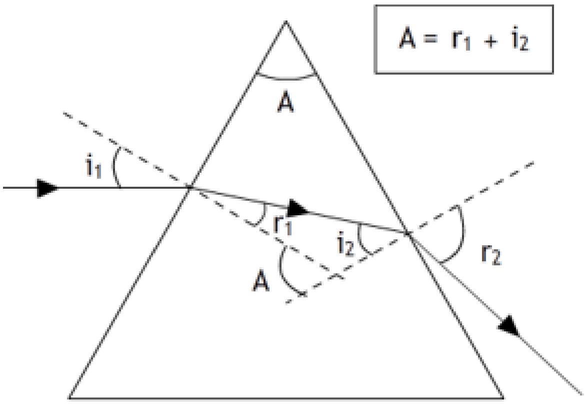
$$\mathrm{sen}\,(r_R) = \frac{\mathrm{sen}(i)}{n_R} = \frac{\mathrm{sen}(27^0)}{1,32} = 0,34393 \Rightarrow \boxed{r_R = 20,12^0}$$

$$\mathrm{tg}\,(r_v) = \frac{d_V}{h} \ ;\ d_V = h\ \mathrm{tg}\,(r_v) = 25\ \mathrm{cm}\ \mathrm{tg}\,(19,65^0) = 8,93\ \mathrm{cm}$$

$$\mathrm{tg}\,(r_R) = \frac{d_R}{h} \ ;\ d_R = h\ \mathrm{tg}\,(r_R) = 25\ \mathrm{cm}\ \mathrm{tg}\,(20,12^0) = 9,16\ \mathrm{cm}$$

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

Refracción en prismas y lentes



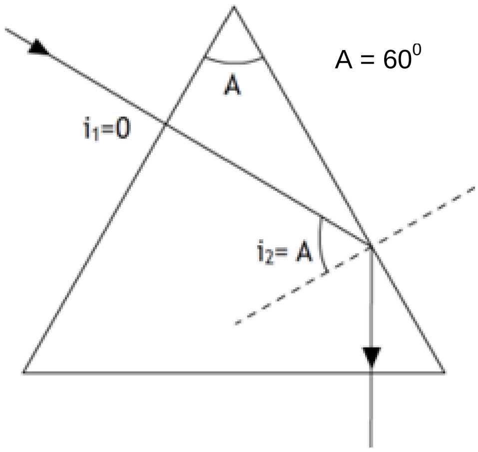
Si un rayo de luz incide sobre una de las caras de un prisma de vidrio con el ángulo adecuado, después de refractarse en la primera cara sufrirá una segunda refracción en la segunda saliendo desviado hacia su base (ver figura).

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 60^0) según: ***A = r₁ + i₂***



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 (60^0). Como este ángulo es mayor que el ángulo límite para el vidrio (unos 40^0) 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:

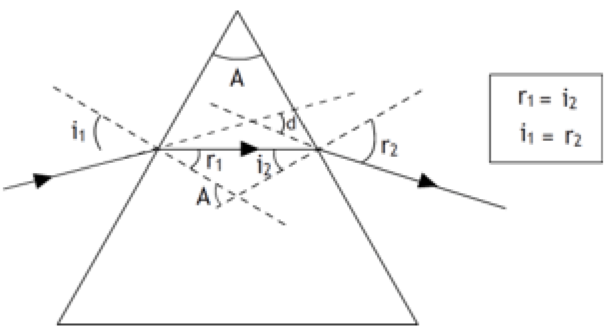
$$n\ \text{sen}(i_2) = \text{sen}\ (90^0) = 1\ ;\ \text{sen}(i_2) = \frac{1}{n} = \frac{1}{1{,}60} = 0{,}6250 \Rightarrow i_2 = 38{,}7^0$$

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

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

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 0^0 y $35{,}5^0$, no hay refracción en la segunda cara. Se produce la reflexión total.
- Para un ángulo de incidencia mayor de $35{,}5^0$, 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.

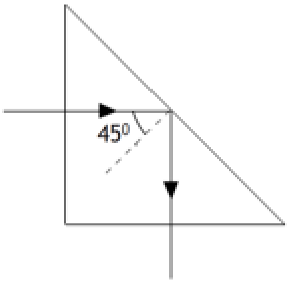
$$d = (i_1 - r_1) + (r_2 - i_2) = (i_1 + r_2) - (r_1 + i_2)$$

$$\boxed{d = (i_1 + r_2) - A}$$

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.

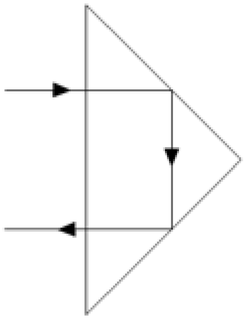
La desviación es mínima cuando el rayo que atraviesa el prisma lo hace paralelamente a la base (ver figura). Entonces se cumple:

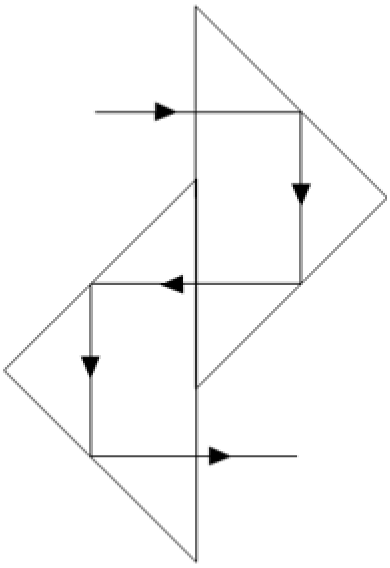
$$r_1 = i_2 \Rightarrow \text{(aplicar ley de Snell)}\ i_1 = r_2$$

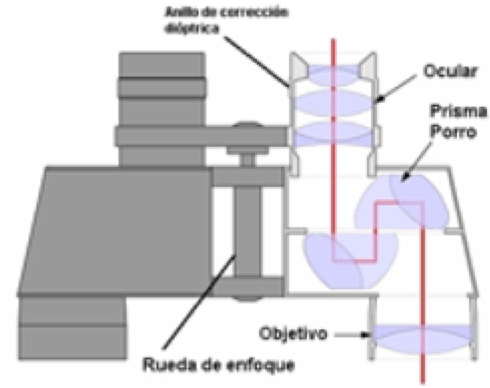


El prisma de Porro (en honor de su inventor el italiano Ignazio Porro) es un triángulo isósceles con un ángulo recto, Debido a que el ángulo límite en el vidrio es de unos 40^0 la geometría del prisma lo hace especialmente adecuado para lograr reflexiones totales de los rayos incidentes.

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

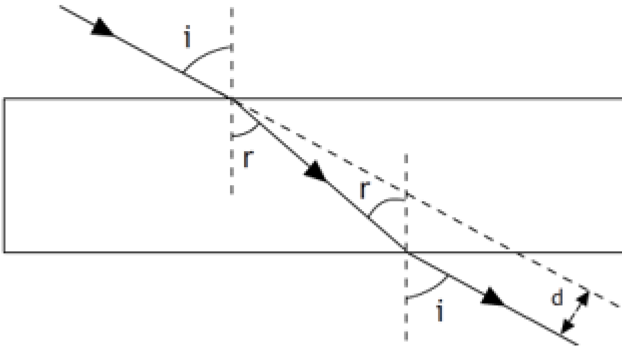






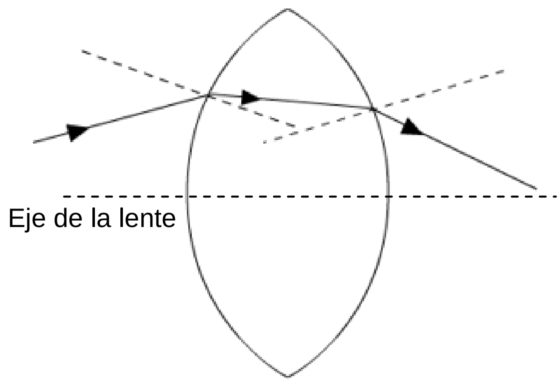
Sistema óptico de unos prismáticos. Se puede observar el prisma de Porro
Fuente: Wikipedia

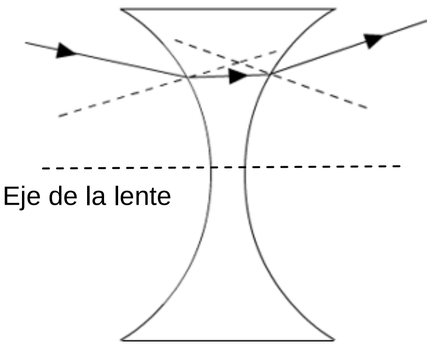
Cuando un rayo se refracta en una ***lámina de caras paralelas*** el rayo que emerge lo hace paralelo al incidente (ver figura).



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 contario, produce una divergencia del rayo incidente que se desvía alejándose del eje de la lente.

Las lentes bicóncavas son lentes divergentes.