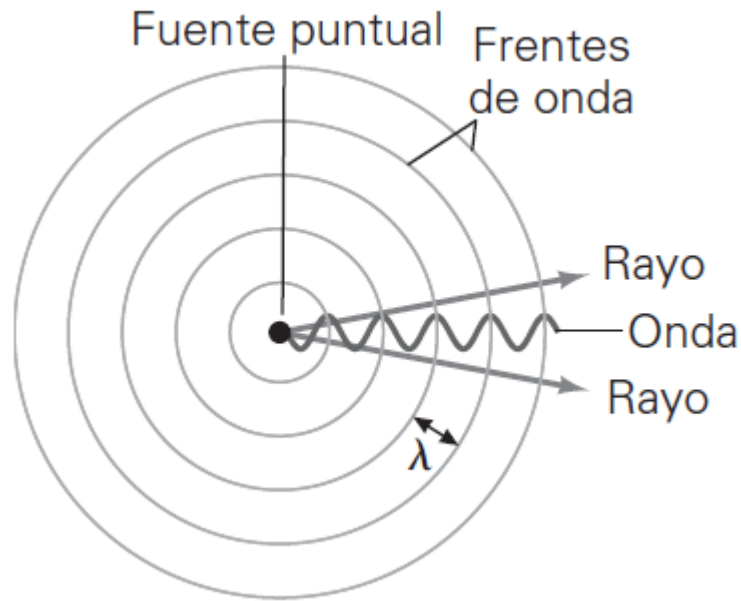


Óptica Geométrica

Óptica geométrica

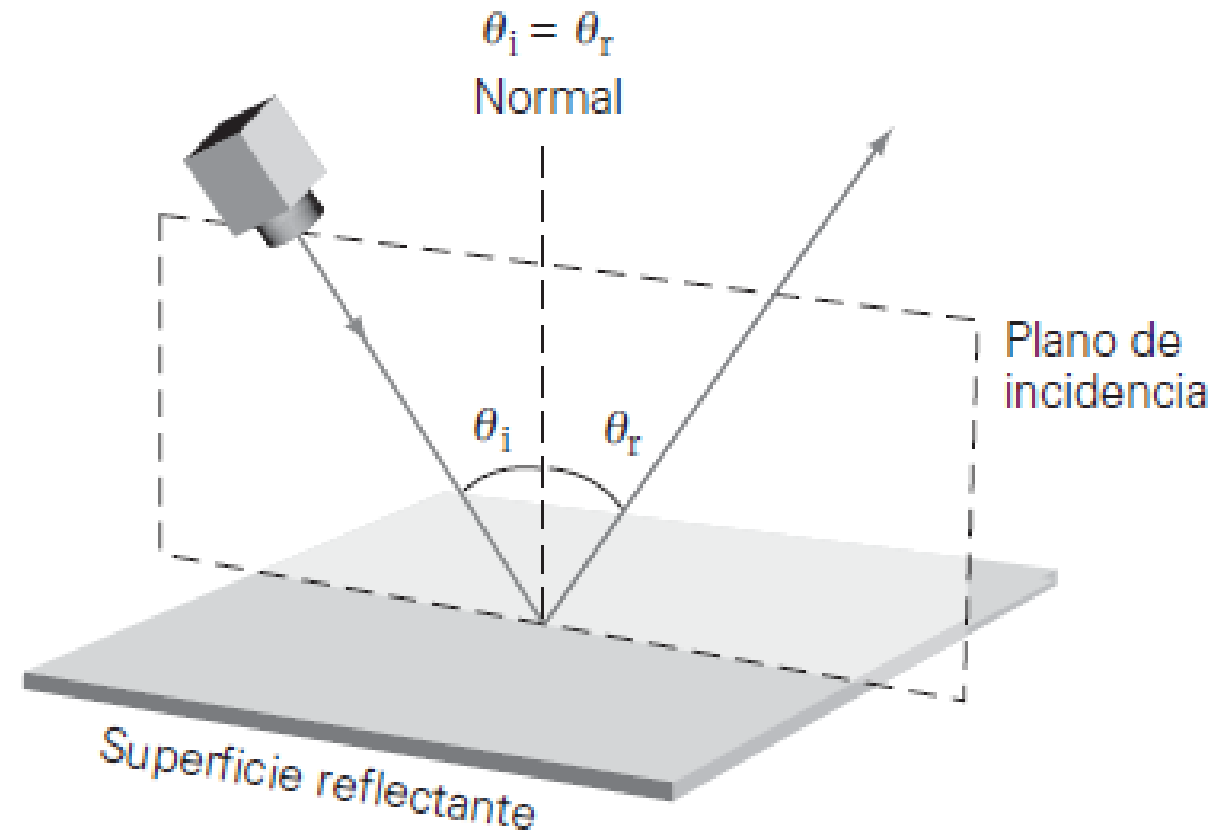
El empleo de representaciones geométricas de frentes de onda y rayos para explicar fenómenos como la reflexión y la refracción de la luz se llama **óptica geométrica**

Frentes de ondas y rayos



Frentes de onda y rayos Un frente de onda se define por los puntos adyacentes de una onda que están en fase, como las crestas o los valles. Una línea perpendicular al frente de onda en la dirección de la propagación de esta última se llama rayo. *a)* Cerca de una fuente puntual, los frentes de onda son circulares en dos dimensiones y esféricos en tres dimensiones. *b)* Muy lejos de una fuente puntual, los frentes de onda son aproximadamente lineales o planos, mientras que los rayos son casi paralelos.

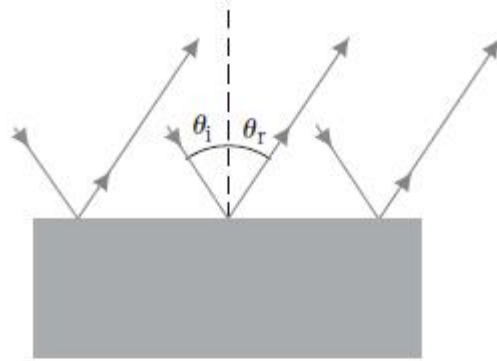
Reflexión



$$\theta_i = \theta_r$$

ley de la reflexión

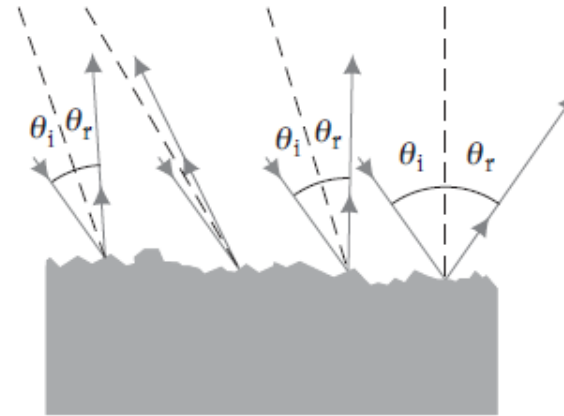
Reflexión: especular y difusa



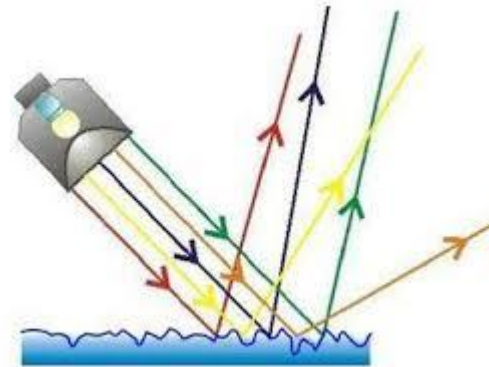
a) Diagrama de la reflexión regular o especular



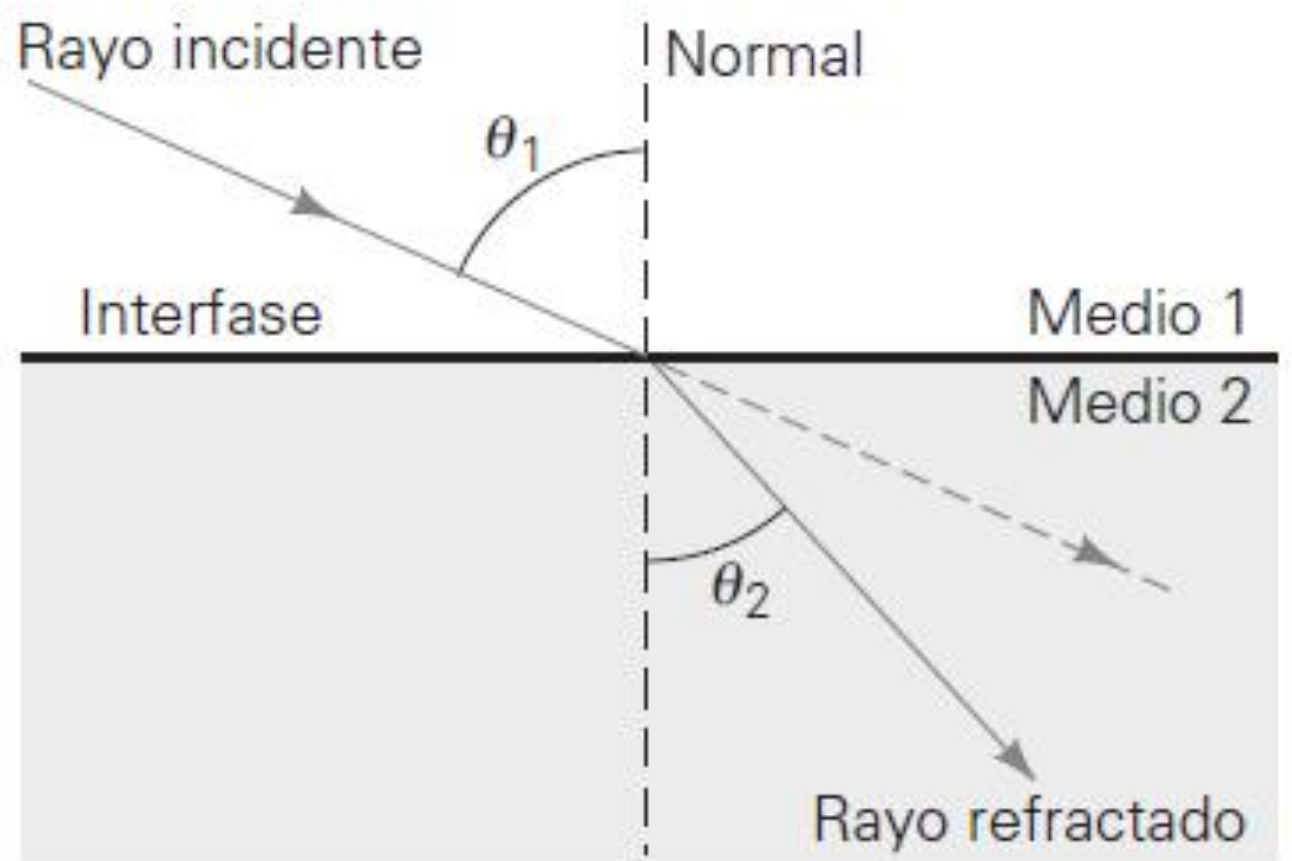
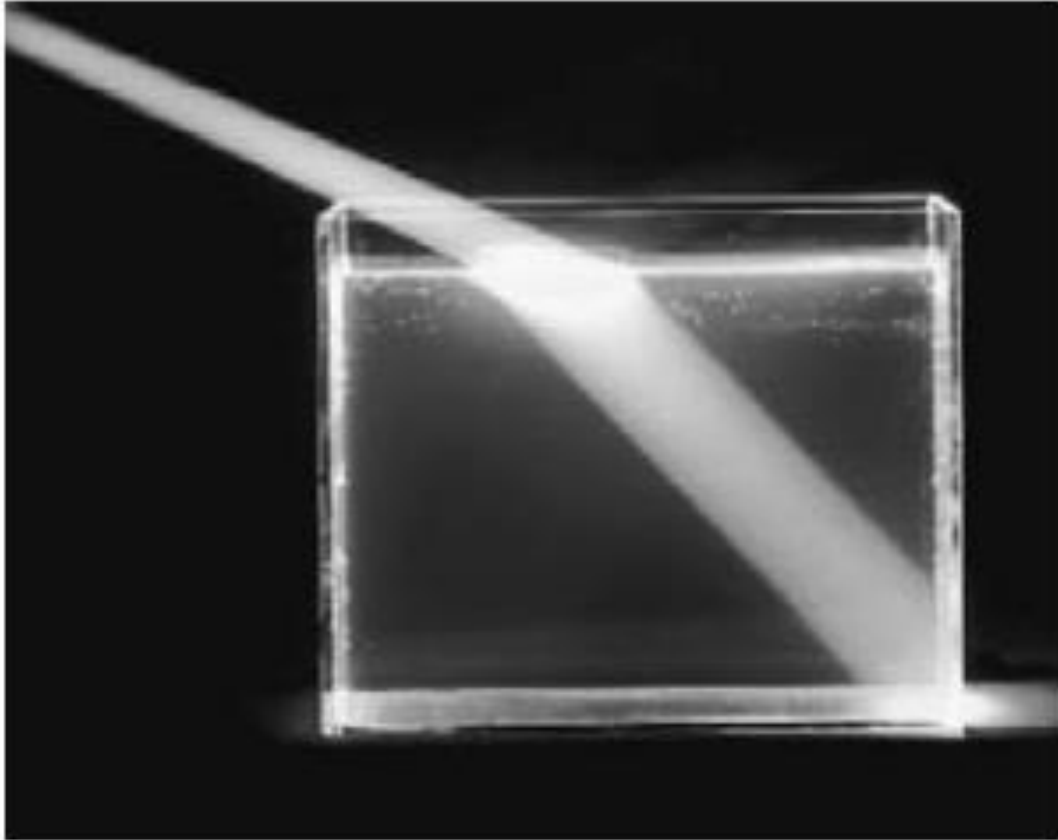
b) Fotografía de la reflexión regular o especular



Reflexión difusa



Refracción

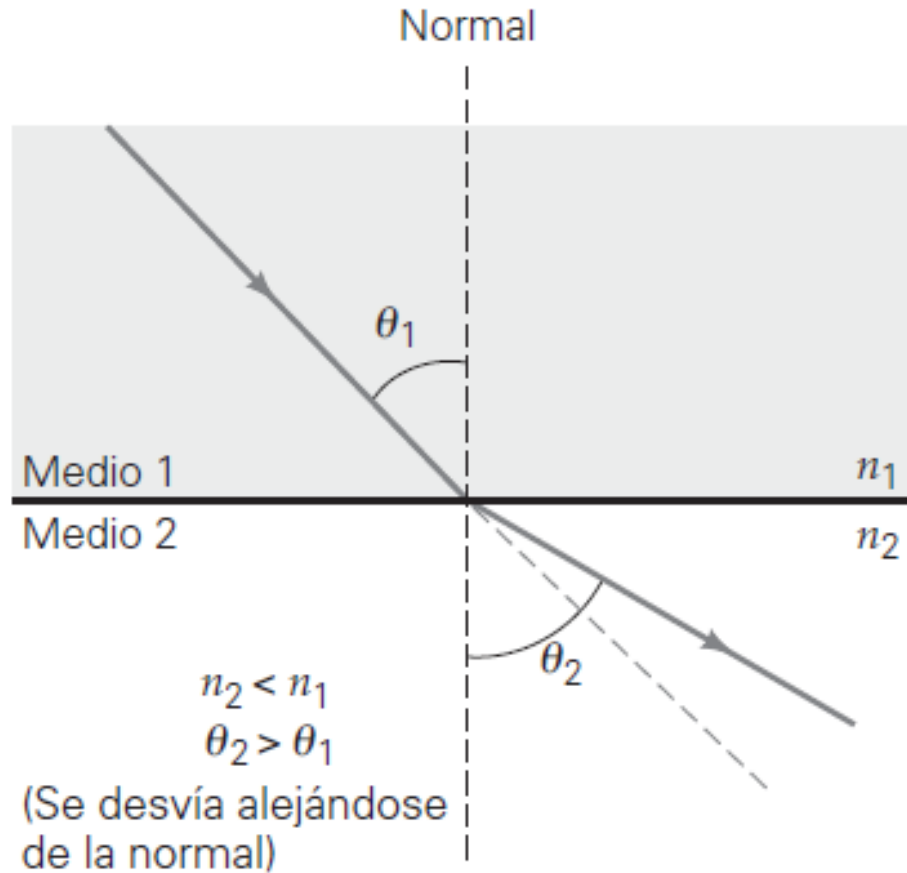
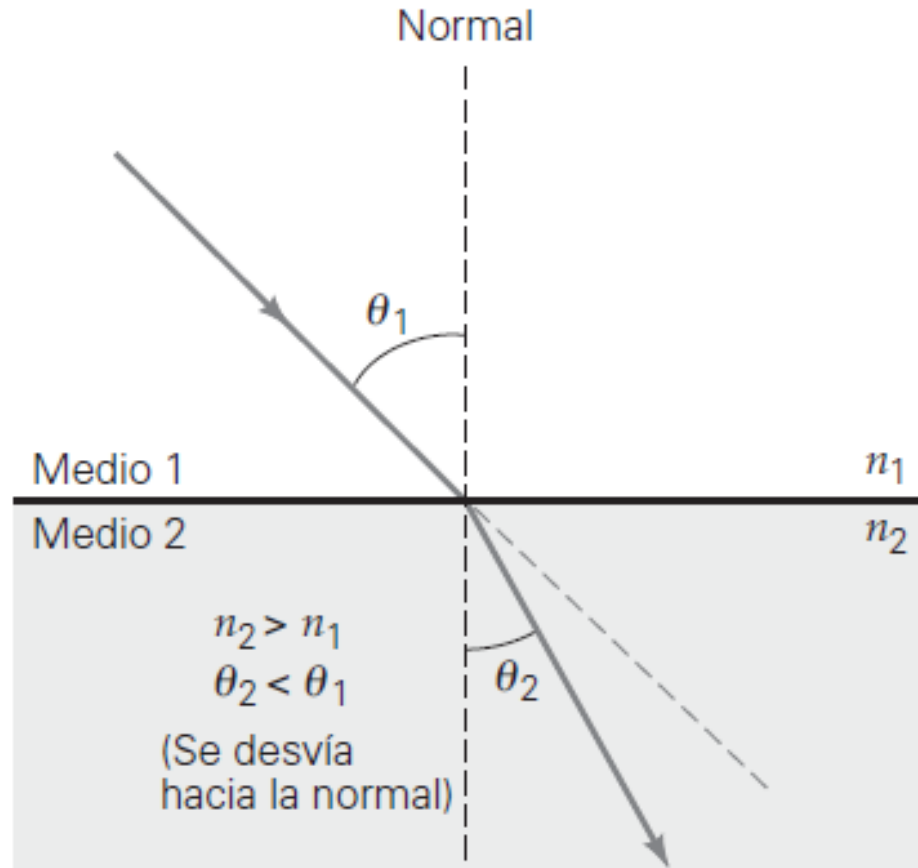


Refracción: Ley de Snell

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2 \quad \text{ley de Snell}$$

$$n = \frac{c}{v} \left(\frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}} \right) \quad \text{índice de refracción (n)}$$

Índice de refracción y desviación de los rayos



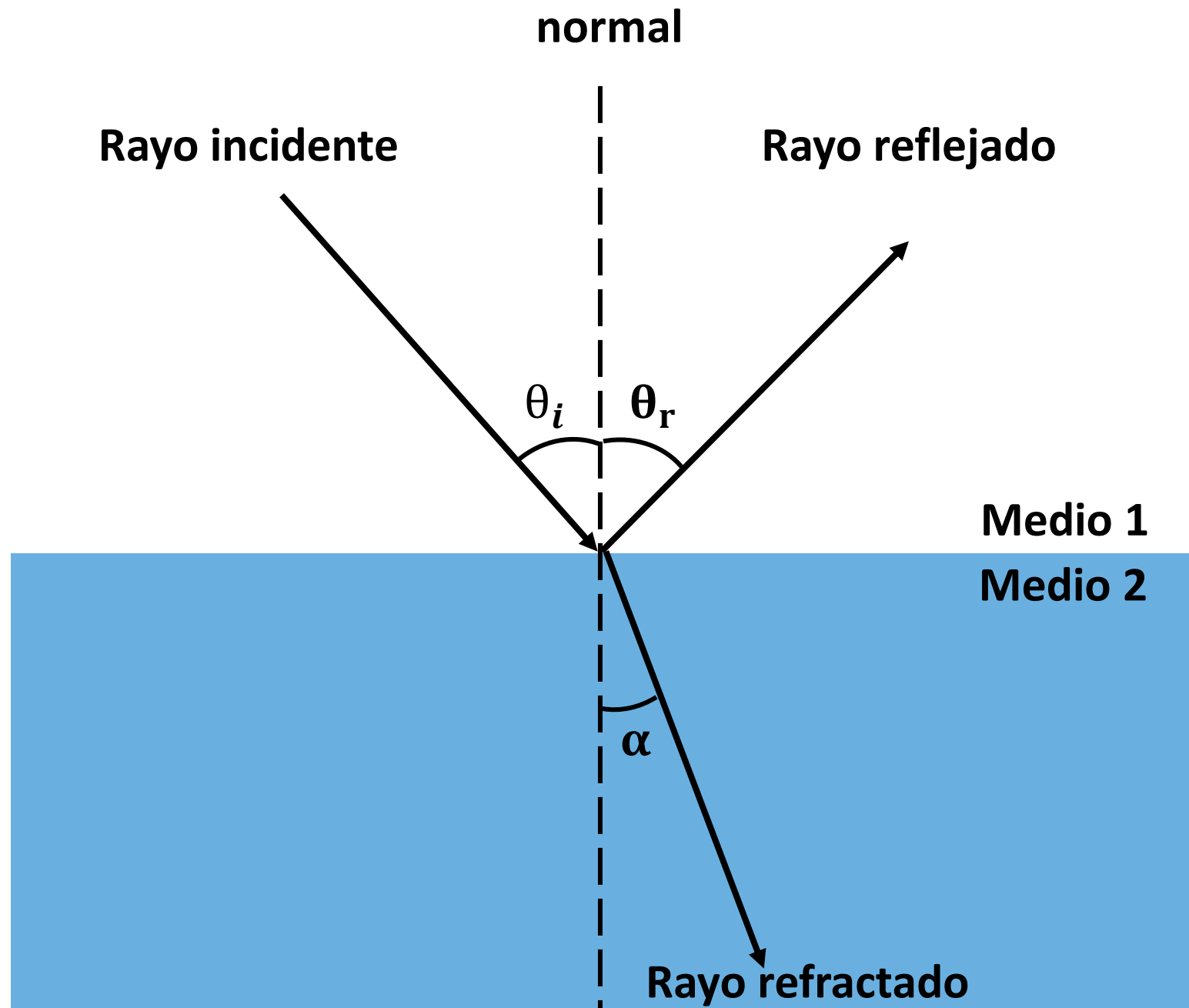
Ley de reflexión

$$\theta_i = \theta_r$$

Ley de Snell: refracción

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_i = n_2 \cdot \text{sen } \alpha$$

$$n = \frac{c}{v} \left(\frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}} \right)$$



<i>Sustancia</i>	<i>n</i>
Aire	1,000 29
Agua	1,33
Hielo	1,31
Alcohol etílico	1,36
Cuarzo fundido	1,46
Ojo humano	1,336–1,406
Poliestireno	1,49
Aceite (valor típico)	1,50
Vidrio (según el tipo) [†]	1,45–1,70
Crown	1,52
Flint	1,66
Circón	1,92
Diamante	2,42

Un rayo de luz viaja por el aire e incide sobre una pieza de vidrio crown, a un ángulo de 37° (con respecto a la normal).

a) ¿Cuál es el ángulo de reflexión?

b) ¿Cuál es el ángulo de refracción?

El ángulo de reflexión es de 37°

a)

Datos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_i = 37^\circ \end{array} \right.$$

Incógnita:

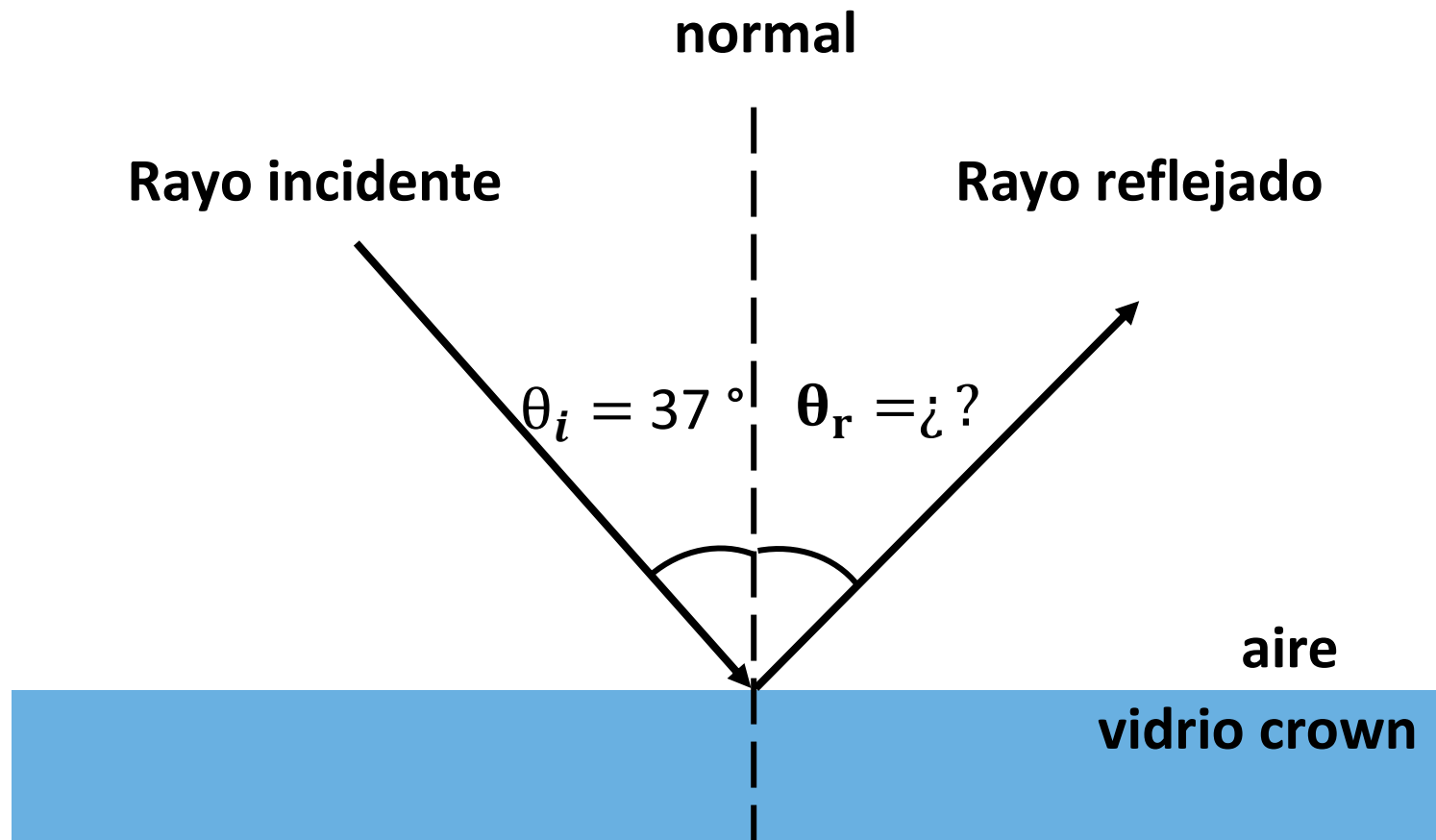
$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_r = ? \end{array} \right.$$

Ley de reflexión

$$\theta_i = \theta_r$$

$$\theta_r = \theta_i$$

$$\theta_r = 37^\circ$$



<i>Sustancia</i>	<i>n</i>
Aire	1,000 29
Agua	1,33
Hielo	1,31
Alcohol etílico	1,36
Cuarzo fundido	1,46
Ojo humano	1,336–1,406
Poliestireno	1,49
Aceite (valor típico)	1,50
Vidrio (según el tipo) [†]	1,45–1,70
Crown	1,52
Flint	1,66
Circón	1,92
Diamante	2,42

a)

Datos:

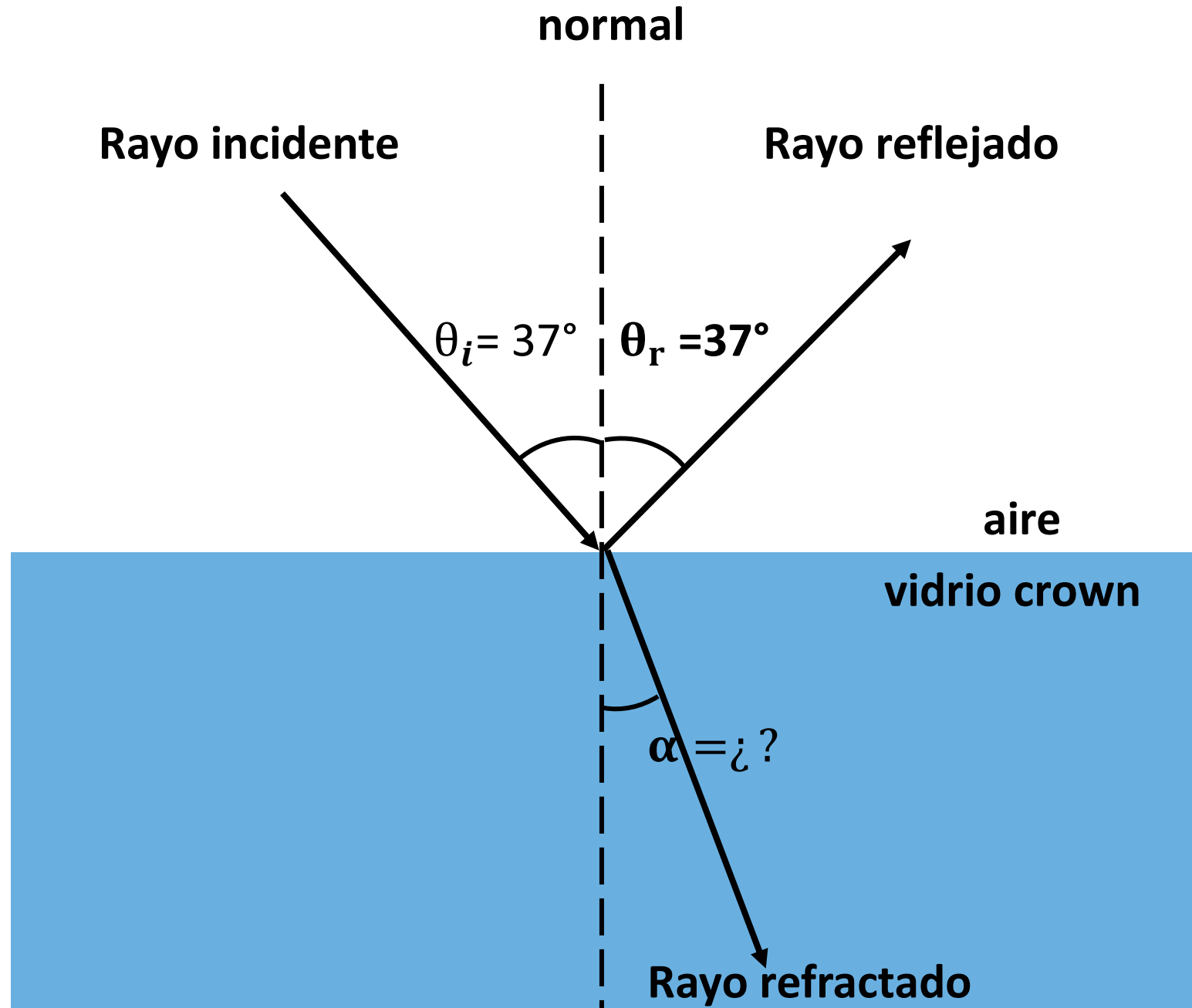
$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_i = 37^\circ \\ n_{\text{aire}} = 1 \\ n_{\text{vidrio}} = 1,52 \end{array} \right.$$

Incógnita:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = ? \end{array} \right.$$

Ley de Snell: refracción

$$n_1 \cdot \sin \theta_i = n_2 \cdot \sin \alpha$$



b)

Datos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_i = 37^\circ \\ n_{\text{aire}} = 1 \\ n_{\text{vidrio}} = 1,52 \end{array} \right.$$

Incógnita:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = ? \end{array} \right.$$

Ley de Snell: refracción

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_i = n_2 \cdot \text{sen } \alpha$$

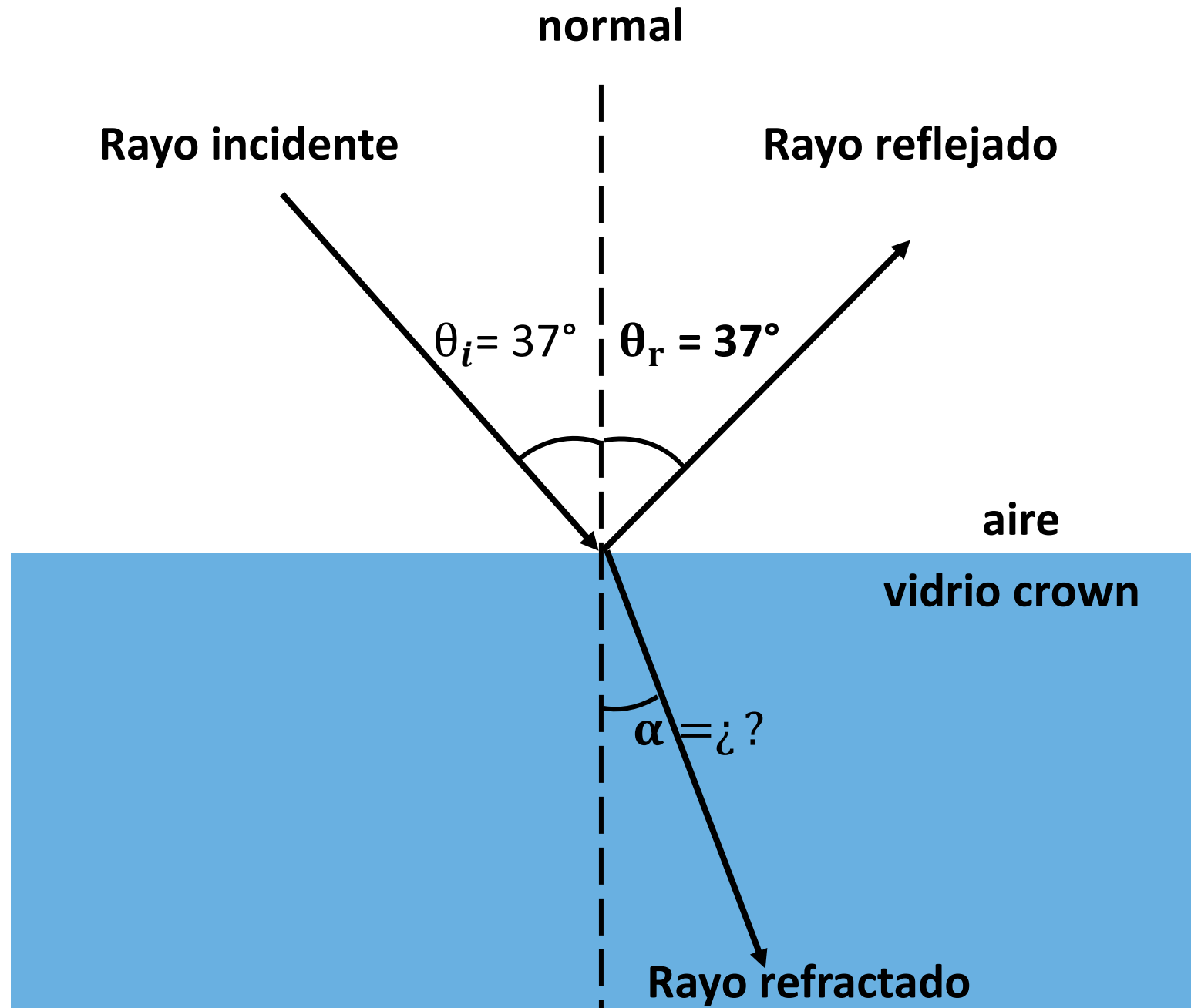
$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \theta_i = n_{\text{vidrio}} \cdot \text{sen } \alpha$$

$$1 \cdot \text{sen } 37^\circ = 1,52 \cdot \text{sen } \alpha$$

$$\frac{1 \cdot \text{sen } 37^\circ}{1,52} = \text{sen } \alpha$$

$$\text{sen } \alpha = 0,39$$

$$\alpha = \text{arcsen}(0,39) = 23,32^\circ$$

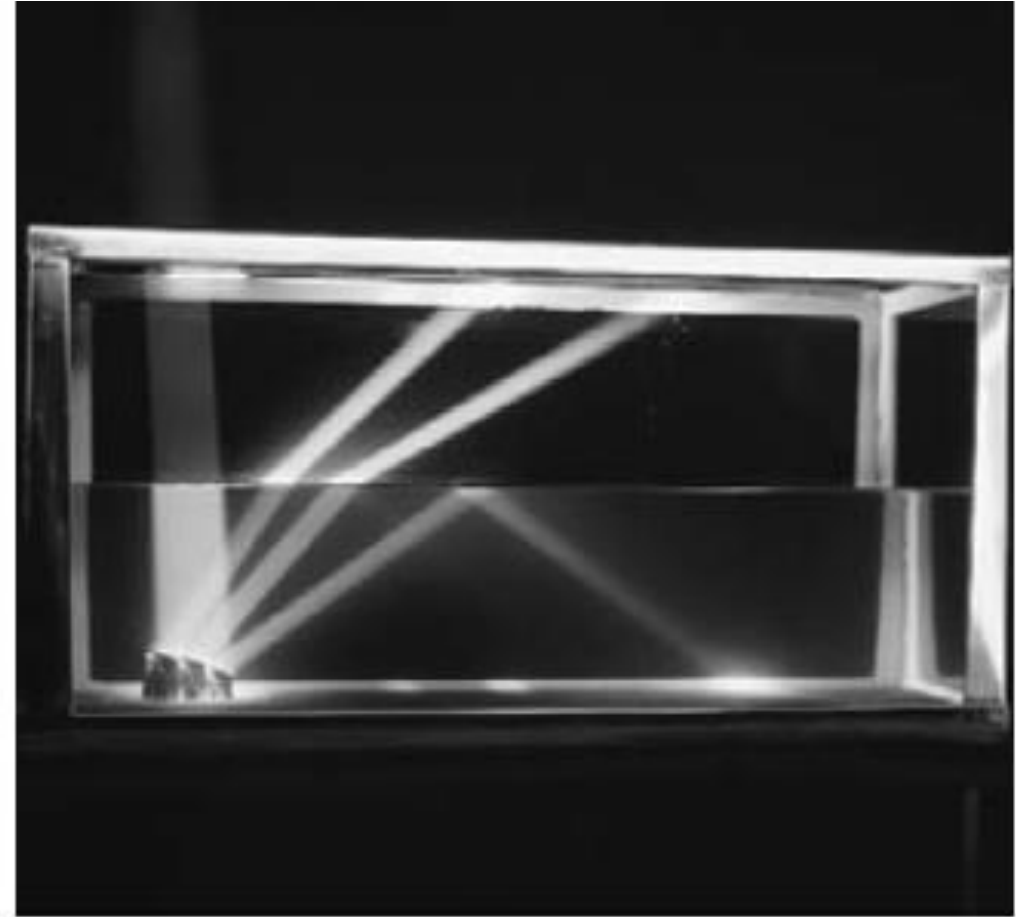
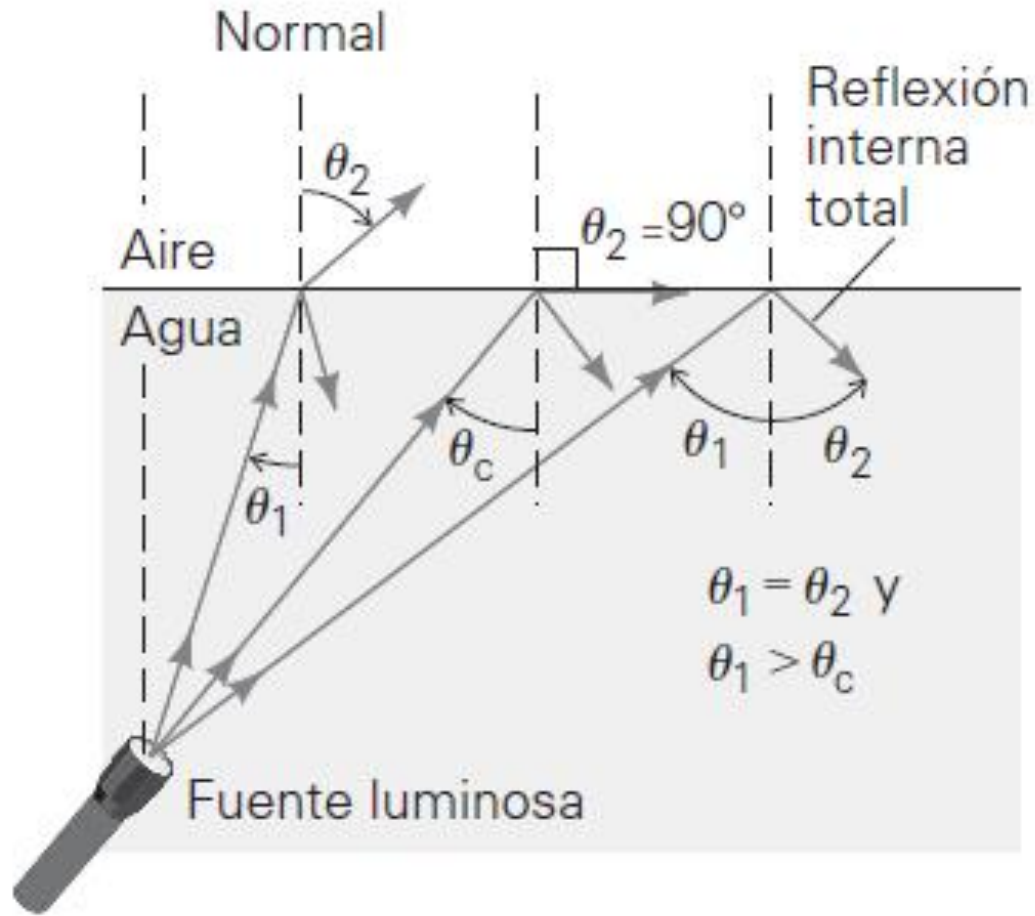


Ley de Snell y reflexión total interna

Un fenómeno interesante se presenta cuando la luz pasa de un medio ópticamente más denso a otro menos denso, como cuando la luz pasa desde el agua hacia el aire. Como sabemos, en ese caso un rayo se refractará alejándose de la normal. (El ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia.)

Sin embargo, existe un límite. Para cierto ángulo de incidencia, llamado ángulo crítico (θ_c), el ángulo de refracción es 90° y el rayo refractado se dirige a lo largo de la interfase entre los medios. Pero, ¿qué pasa si el ángulo de incidencia es todavía mayor? Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico ($\theta_i > \theta_c$), la luz ya no se refracta, sino se refleja internamente. A esta condición se le llama **reflexión interna total**.

Ley de Snell y reflexión total interna



$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{donde } n_1 > n_2$$

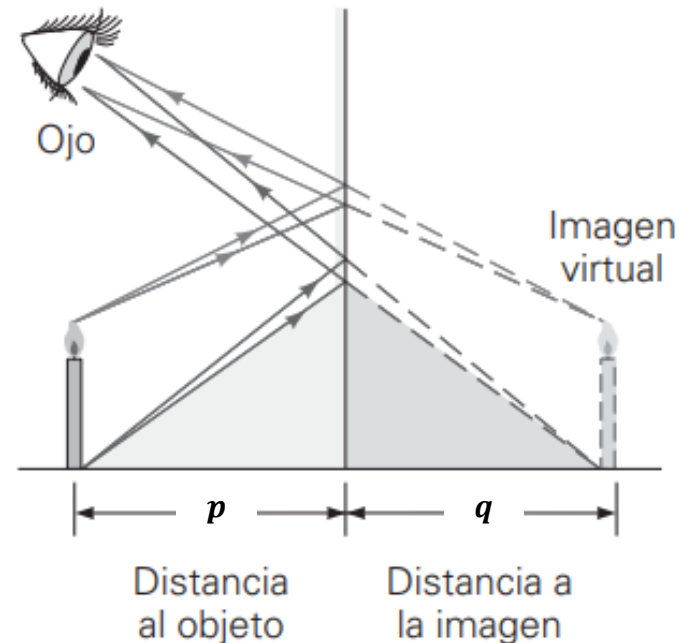
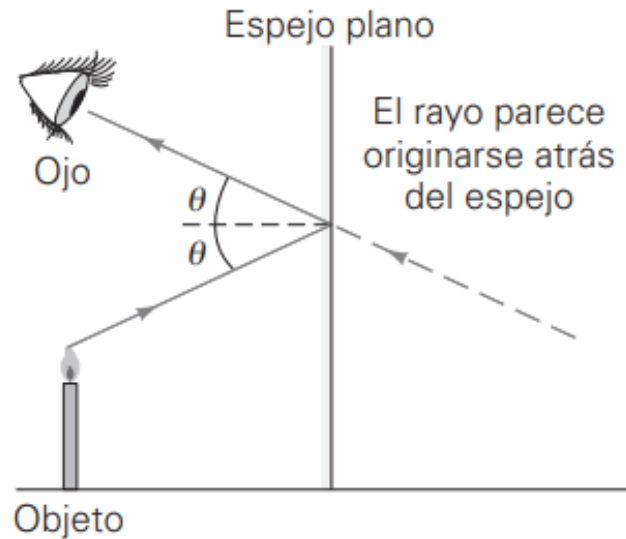
Simulador:

https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_all.html?locale=es

Espejos planos

Los espejos son superficies reflectoras o reflectantes lisas, hechos de metal pulido o de vidrio con un recubrimiento metálico. Al ver un espejo de forma directa, lo que se ve son las imágenes reflejadas de uno y de los objetos que le rodean.

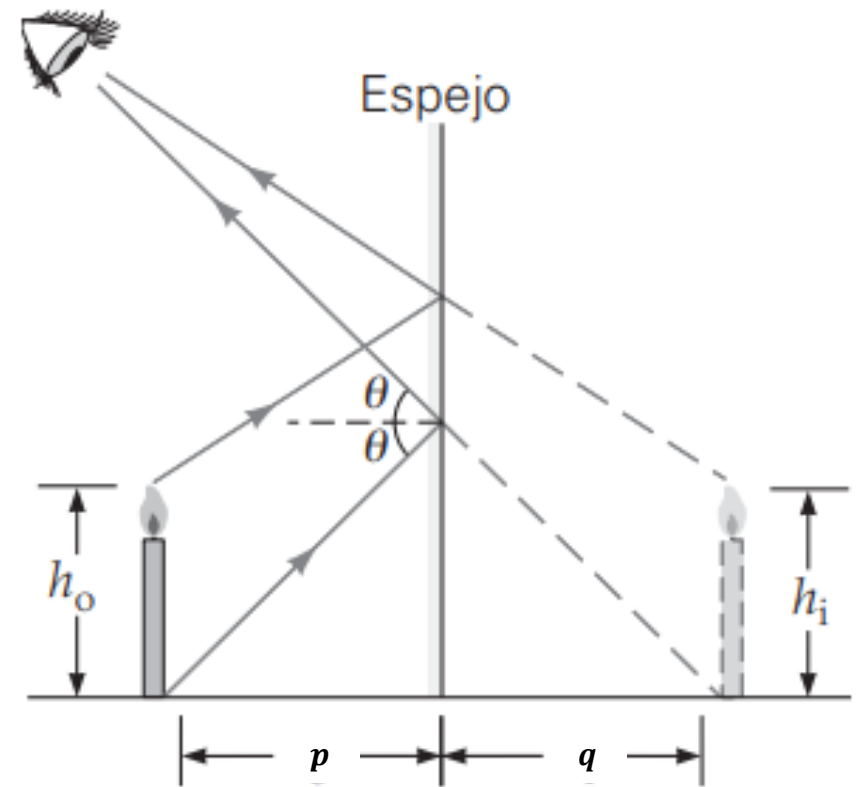
Un espejo con superficie plana se llama espejo plano. El diagrama de rayos de la muestra el modo en que se forman las imágenes en un espejo plano.



Dos características importantes de ellas son su tamaño y orientación con respecto a las del objeto. Ambas se expresan en términos del factor de amplificación lateral (M), que se define como la relación entre la altura de la imagen (h_i) y la del objeto (h_o):

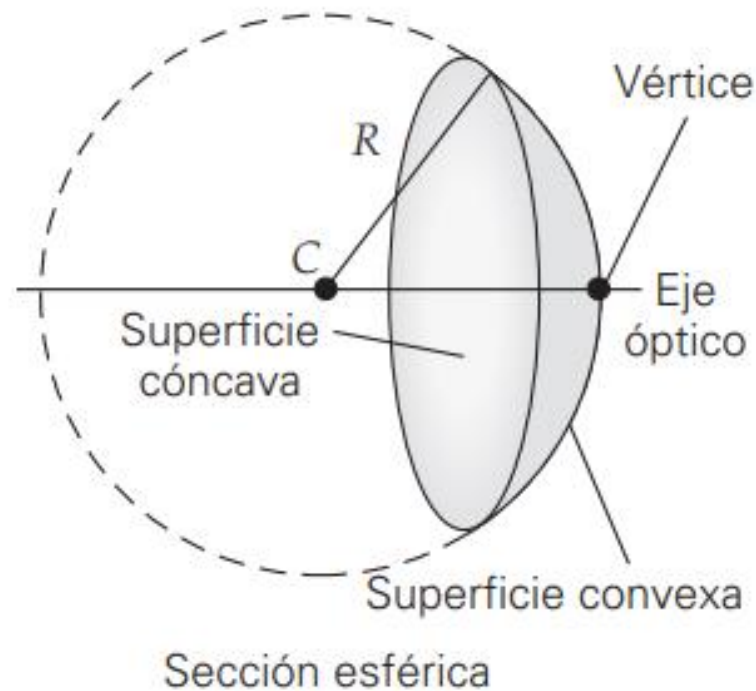
$$M = \frac{\text{altura de la imagen}}{\text{altura del objeto}} = \frac{h_i}{h_o}$$

Se observa que la imagen y el objeto tienen el mismo tamaño (altura), por lo que $h_i = h_o$. Por consiguiente, $M = +1$ para un espejo plano, pues la imagen está derecha y no hay aumento.



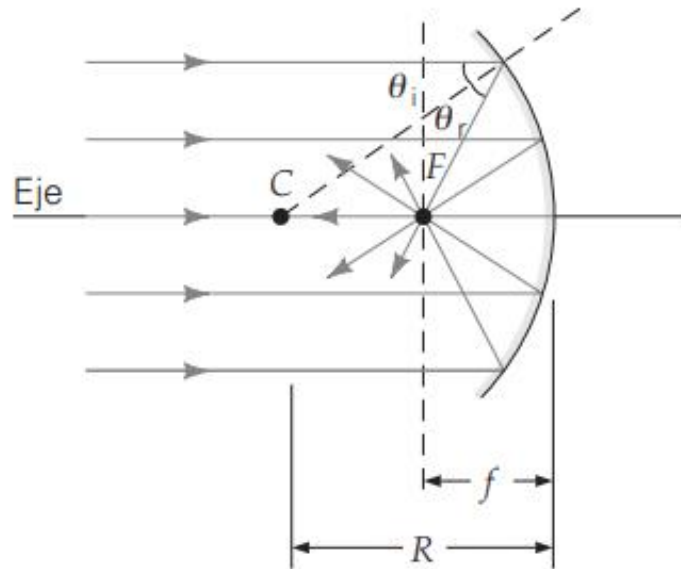
Espejos esféricos

Como su nombre lo indica, un espejo esférico es una superficie reflectora con geometría esférica. Si se rebana una parte de una esfera hueca de radio R a lo largo de un plano, la parte cortada tiene la forma de un espejo esférico. Tanto el interior como el exterior de ese casquete pueden ser reflectores.



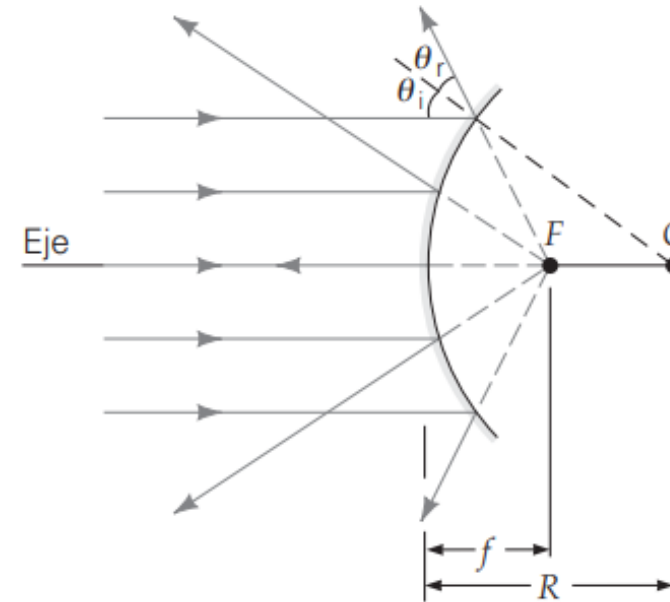
Espejos esféricos

Si la reflexión se efectúa en la superficie interna, la sección se comporta como un **espejo cóncavo**. Si la reflexión se realiza en la superficie externa, entonces la sección se comporta como un **espejo convexo**.



a) Espejo cóncavo o convergente

C = centro de curvatura
F = Foco



b) Espejo convexo o divergente

R = radio de curvatura
f = distancia focal

$$f = \frac{R}{2} \quad \text{distancia focal, espejo esférico}$$

Diagramas de rayos

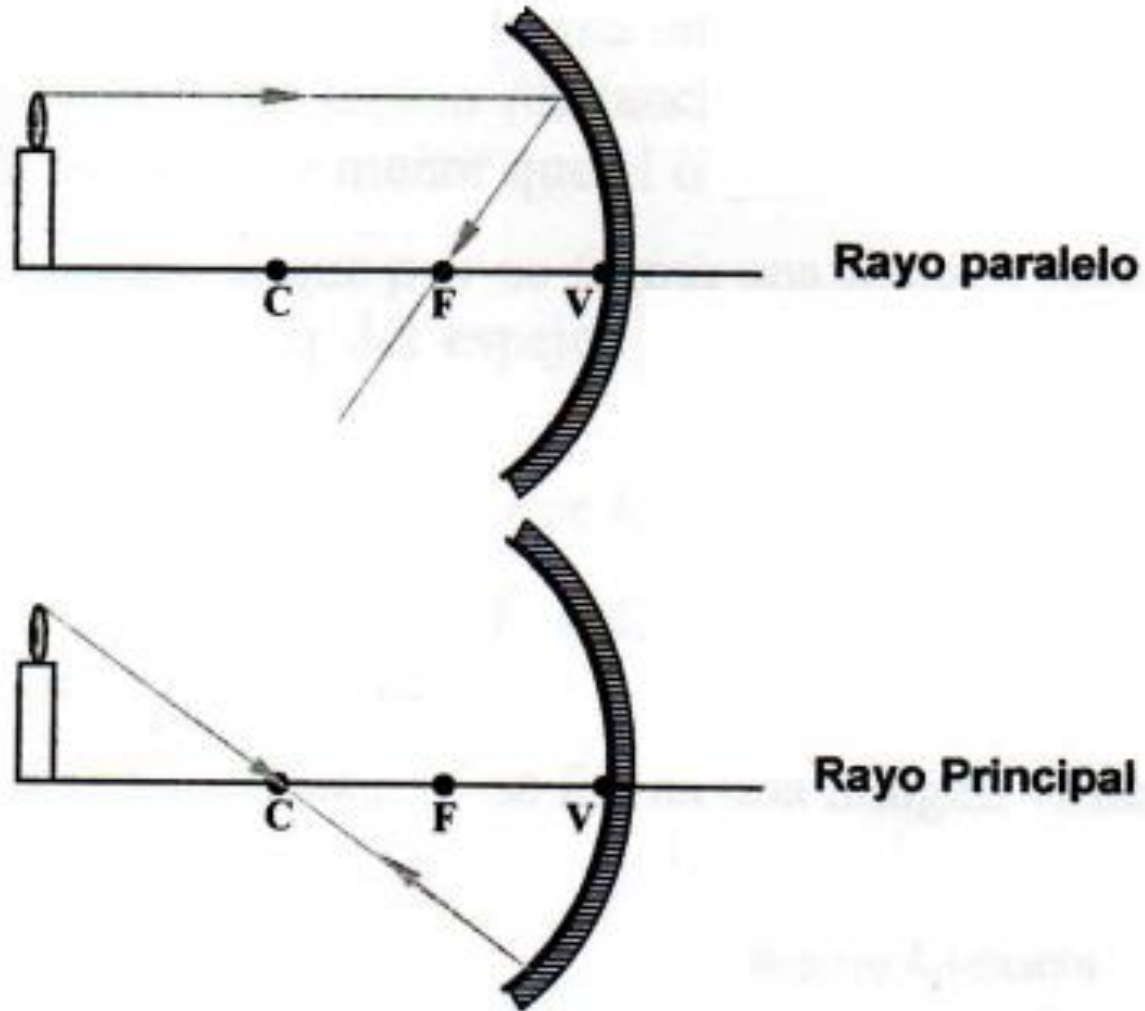
Las características de las imágenes formadas por espejos esféricos se determinan con la ayuda de la óptica geométrica. Este método consiste en trazar rayos que emanan de uno o más puntos de un objeto. Se aplica la ley de la reflexión ($\theta_i = \theta_r$), y se definen tres rayos con respecto a la geometría del espejo:

- 1) Un **rayo paralelo**, que incide a lo largo de una trayectoria paralela al eje óptico, y que se refleja y pasa (o parece pasar) por el foco (al igual que todos los rayos paralelos y cercanos al eje).
- 2) Un **rayo principal o radial**, que incide pasando por el centro de curvatura (C) del espejo esférico. Como incide en dirección normal a la superficie del espejo, se refleja a lo largo de su trayectoria de llegada y pasan por el punto C.
- 3) Un **rayo focal**, que pasa (o parece pasar) por el foco y se refleja en dirección paralela al eje óptico. Es, por así decirlo, un rayo paralelo que viaja en sentido contrario.

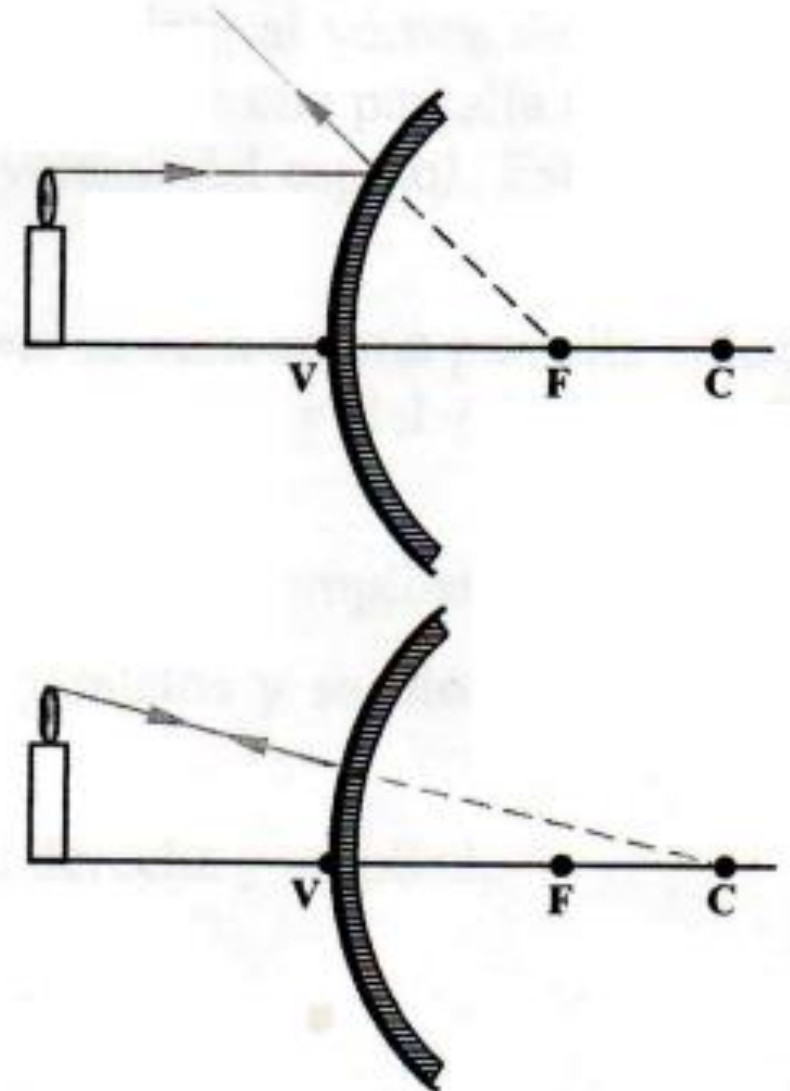
Si utilizamos dos rayos cualesquiera de los tres anteriores podremos ubicar la imagen (distancia a la imagen) y determinar su tamaño (aumentado o reducido), su orientación (derecha o invertida) y su tipo (real o virtual). Se acostumbra usar la punta del objeto asimétrico (por ejemplo, la punta de una flecha o la llama de una vela) como el punto de partida de los rayos. El punto correspondiente de la imagen estará en el punto de intersección de los rayos. Con este método se facilita ver si la imagen está derecha o invertida

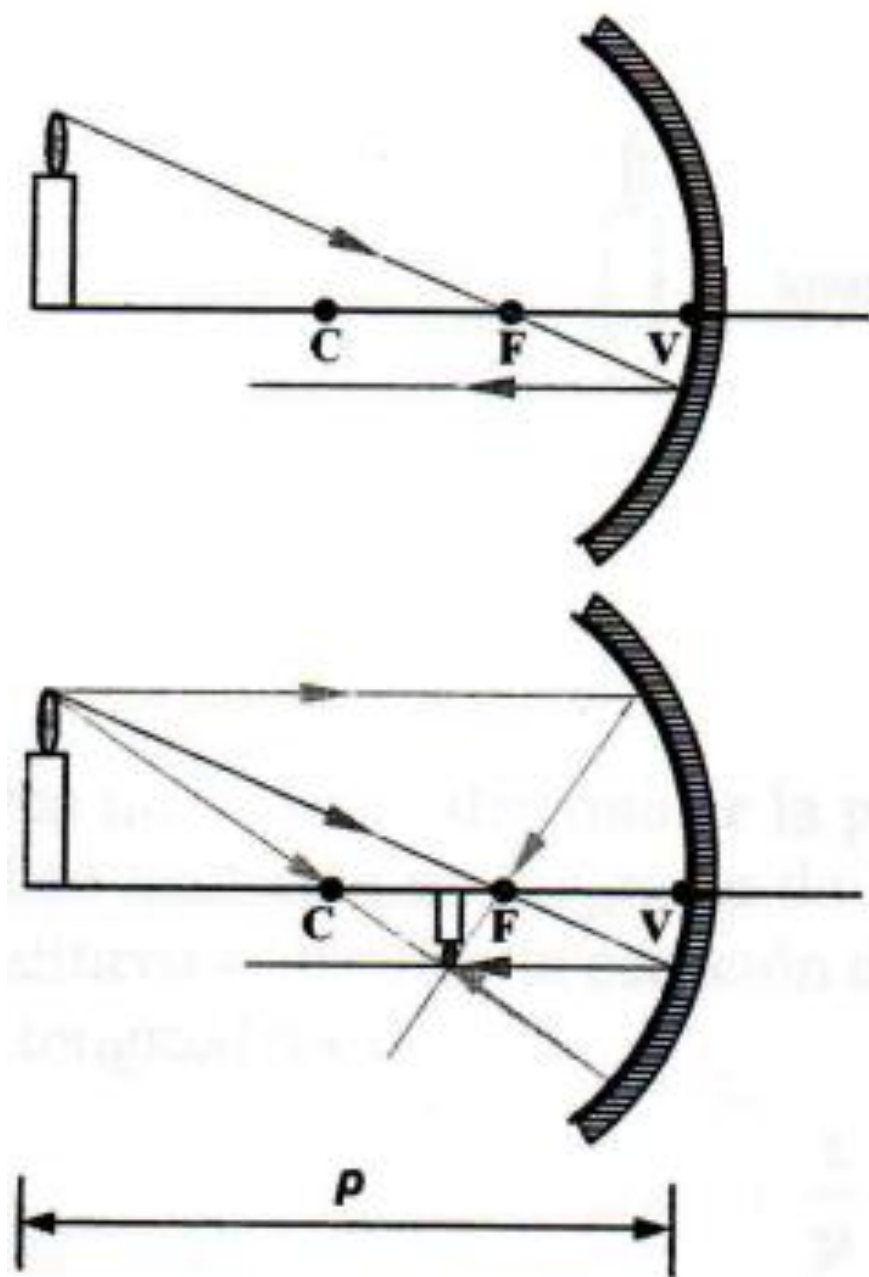
Ilustraciones de los rayos en espejos cóncavos y convexos

Espejo Cóncavo

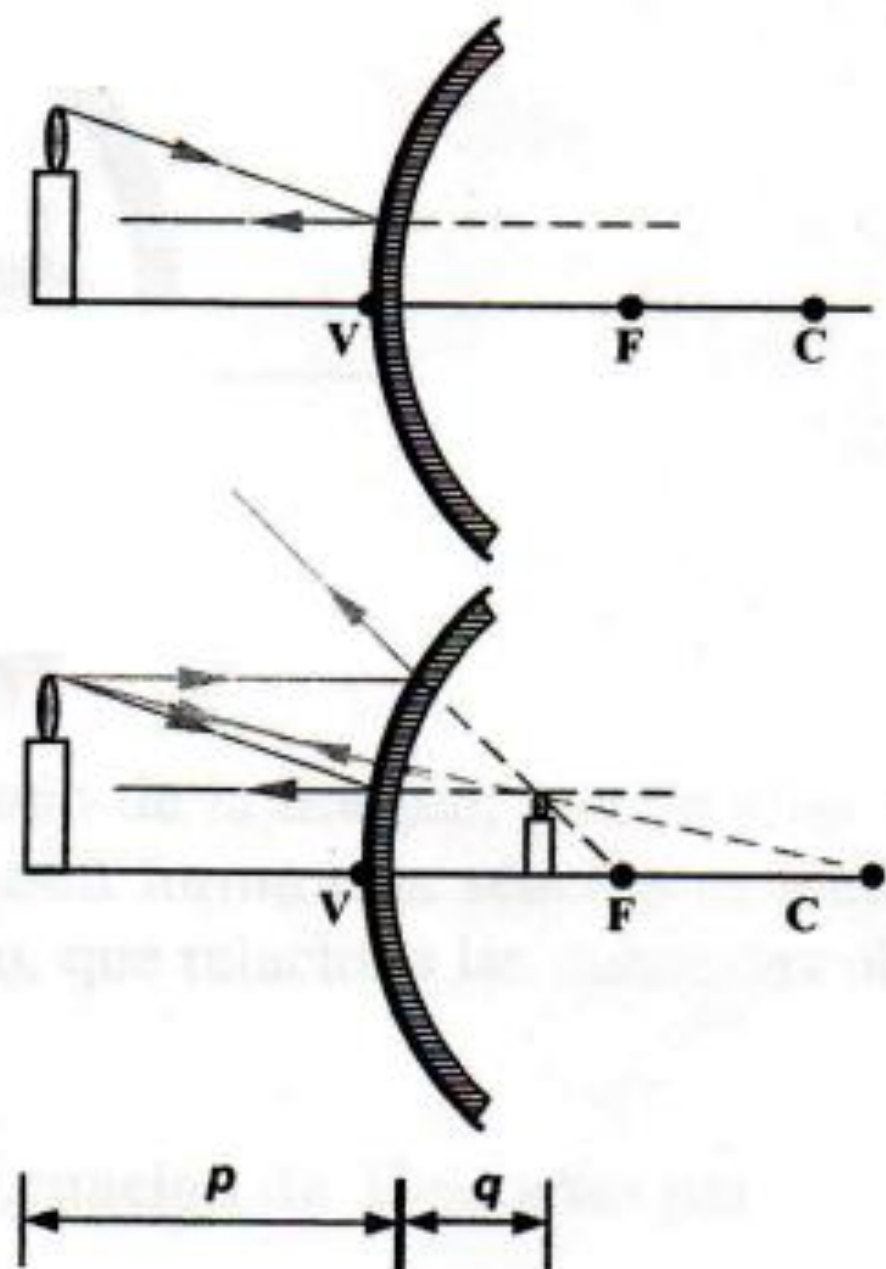


Espejo Convexo





Rayo Focal



Análisis de la Formación de Imágenes: Espejo Convexo

Los rayos reflejados desde un espejo convexo convergen, y al prolongar los rayos detrás del espejo para determinar su intersección vemos que la imagen es virtual. Esta imagen es similar a la imagen virtual formada por un espejo plano y no puede proyectarse en una pantalla.

Los rayos reflejados de un objeto a cualquier distancia de un **espejo convexo** siempre divergen, es por ello que **un espejo convexo o divergente no puede formar una imagen real.**

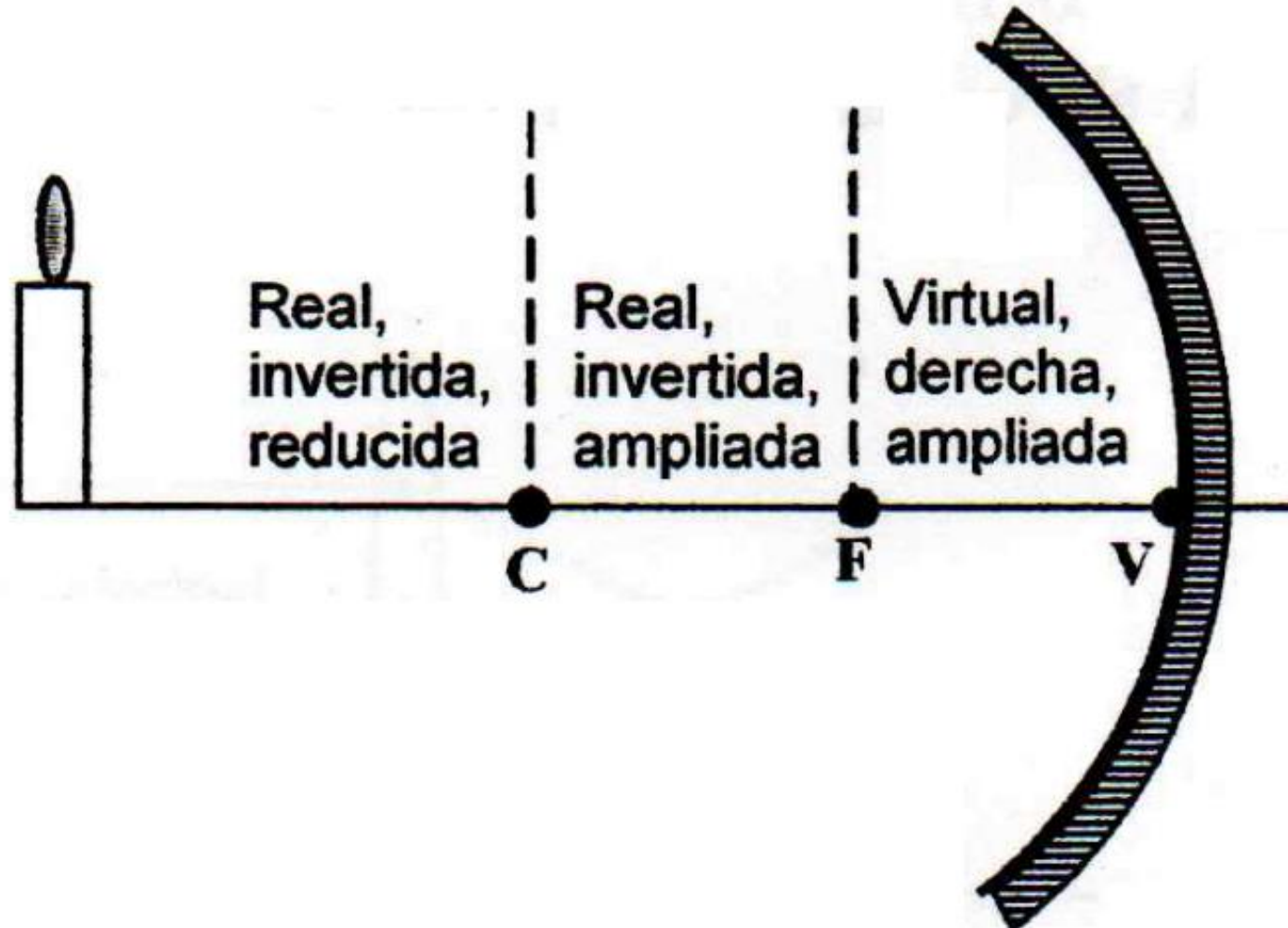
Análisis de la Formación de Imágenes: Espejo Cóncavo

Un **espejo esférico cóncavo** se llama convergente porque los rayos paralelos al eje principal que inciden sobre él se reflejan e intersectan en el foco; es por ello que las características de la imagen cambian con la distancia del objeto al espejo. Existen dos puntos donde ocurren cambios significativos: C y F, los cuales dividen al eje principal en tres regiones:

- En el caso en que $p > r$ (donde p es la distancia del objeto al vértice del objeto y r el radio de curvatura) se forma una imagen real que se verá en una pantalla colocada a una distancia q del espejo (distancia de la imagen al vértice del espejo). Esta imagen será real, invertida y menor que el objeto.
- En el caso en que $p = r$ se forma una imagen real que se verá en una pantalla colocada a una distancia q del espejo. Esta imagen será real, invertida y del mismo tamaño del objeto.
- En el caso en que $f < p < r$ se forma una imagen real invertida y ampliada.
- En el caso en que $p = f$ los rayos reflejados son paralelos y se dice que se forma la imagen en el infinito.
- En el caso en que $p < f$ se forma una imagen virtual, derecha y ampliada.

Análisis de la Formación de Imágenes: Espejo Cóncavo

Espejo Cóncavo



Análisis de la Formación de Imágenes

Simuladores

Cóncavo

<https://www.geogebra.org/m/EWg2nWxU#material/p8betBjQ>

Convexo

<https://www.geogebra.org/m/EWg2nWxU#material/cJSxdMKw>

Problemas:

Hay dos maneras de determinar la posición y el tamaño de la imagen; una de ellas es de manera gráfica mediante un diagrama de rayos a escala y otra forma mediante métodos analíticos utilizando la ecuación del espejo esférico, que relaciona las distancias objeto, imagen y la longitud focal:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de Descartes para espejos

El factor de magnificación puede determinarse de forma analítica, como el cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto:

$$M = \frac{h_i}{h_o}$$

O bien, expresado en términos de las distancias de la imagen y el objeto:

$$M = -\frac{q}{p}$$

$$M = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p}$$

Convenciones de signos para los espejos esféricos

Si $|M| > 1$, la imagen se magnifica, o es mayor que el objeto. Si $|M| < 1$, la imagen se reduce, o es menor que el objeto.

Además, es necesario establecer los signos de las diversas cantidades, y por convención se utilizarán los siguientes:

- La **longitud focal (f)** es **positiva (+)** para un **espejo cóncavo**
negativa (-) para un **espejo convexo**
- La **distancia al objeto (p)** siempre se considera **positiva (+)**
- La **distancia a la imagen (q)** es **positiva (+)** para una imagen real (que se forma del mismo lado del espejo que el objeto)
negativa (-) para una imagen virtual (que se forma detrás del espejo)
- La **magnificación (M)** es **positiva (+)** para una **imagen derecha**
negativa (-) para una **imagen invertida**

Ejemplo:

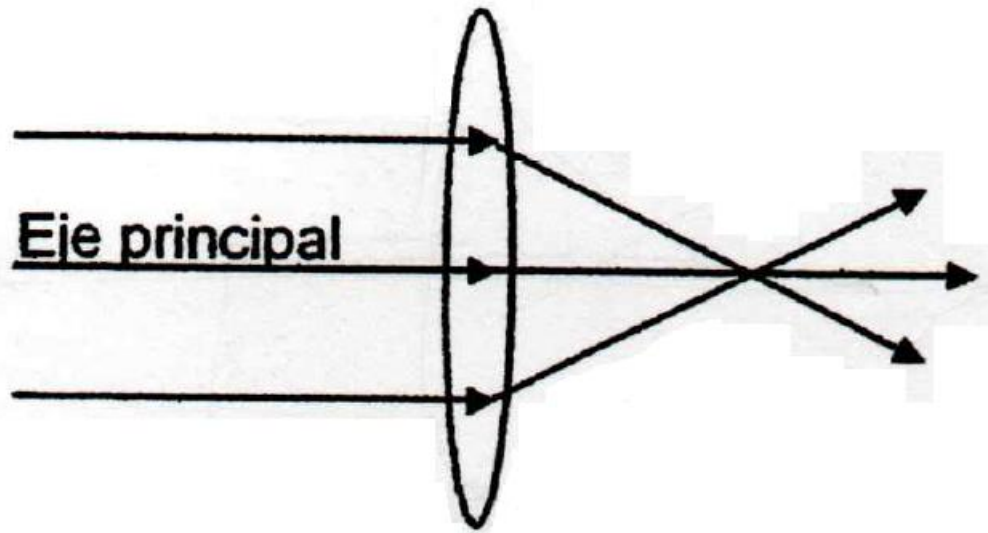
Se coloca un objeto a 39 cm frente a un espejo esférico cóncavo de 24 cm de radio.

- a) Con un diagrama de rayos ubique la imagen formada por este espejo.
- b) Describa las características de la imagen.
- c) Determinar analíticamente f , q y M

Lentes

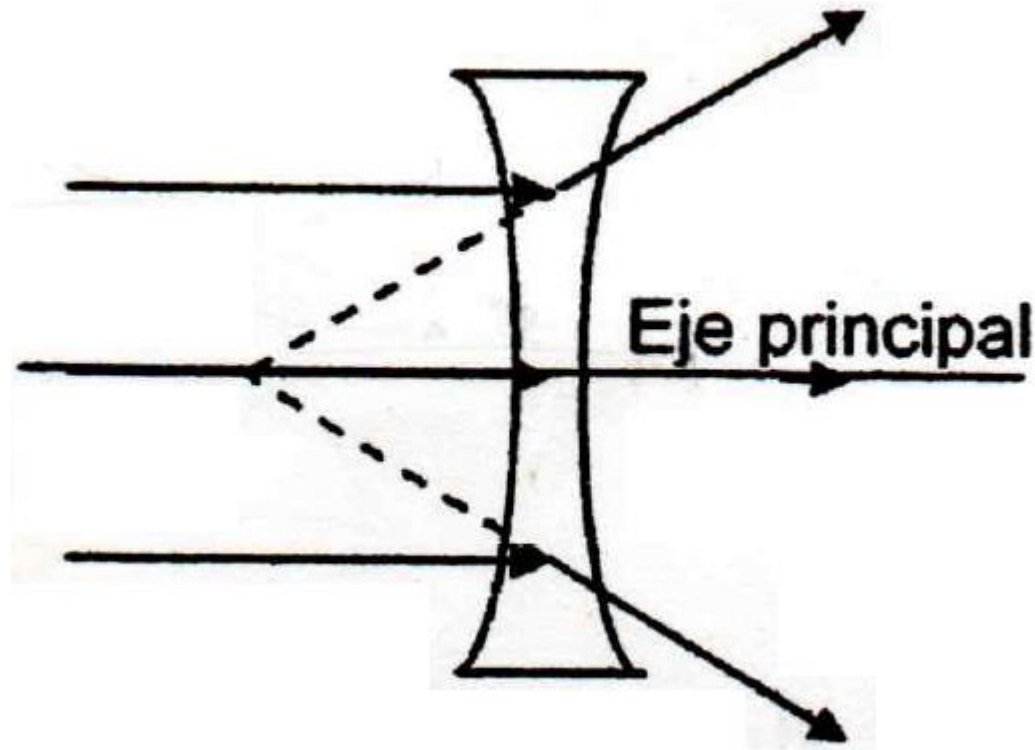
Las propiedades de las lentes se deben a la refracción de la luz que pasa a través de ellas. Cuando los rayos de luz pasan a través de una lente se desvían de sus trayectorias originales, de acuerdo a la ley de refracción.

En una **lente biconvexa o convergente**; los rayos de luz incidentes paralelos al eje de la lente convergen en un punto focal del lado opuesto de la lente como se muestra en la siguiente figura:



Lentes

En una **lente biconcava o divergente**, los rayos paralelos incidentes emergen de la lente como si surgieran de un punto focal en el lado incidente de la lente como se indica en la Figura:



Existen varios tipos de lentes convergentes y divergentes; en general, una lente convergente es más gruesa en su centro que en su periferia, mientras que una lente divergente es más delgada en su centro que en su periferia. Limitaremos nuestro análisis a las lentes biconvexas y biconcavas con simetría esférica, es decir, aquellas para las que ambas superficies tienen el mismo radio de curvatura. Cuando la luz pasa a través de una lente se refracta y se desplaza lateralmente, si la lente es gruesa el desplazamiento puede ser muy grande y complicar el análisis, es por ello que estudiaremos las lentes delgadas para las cuales este desplazamiento es despreciable.

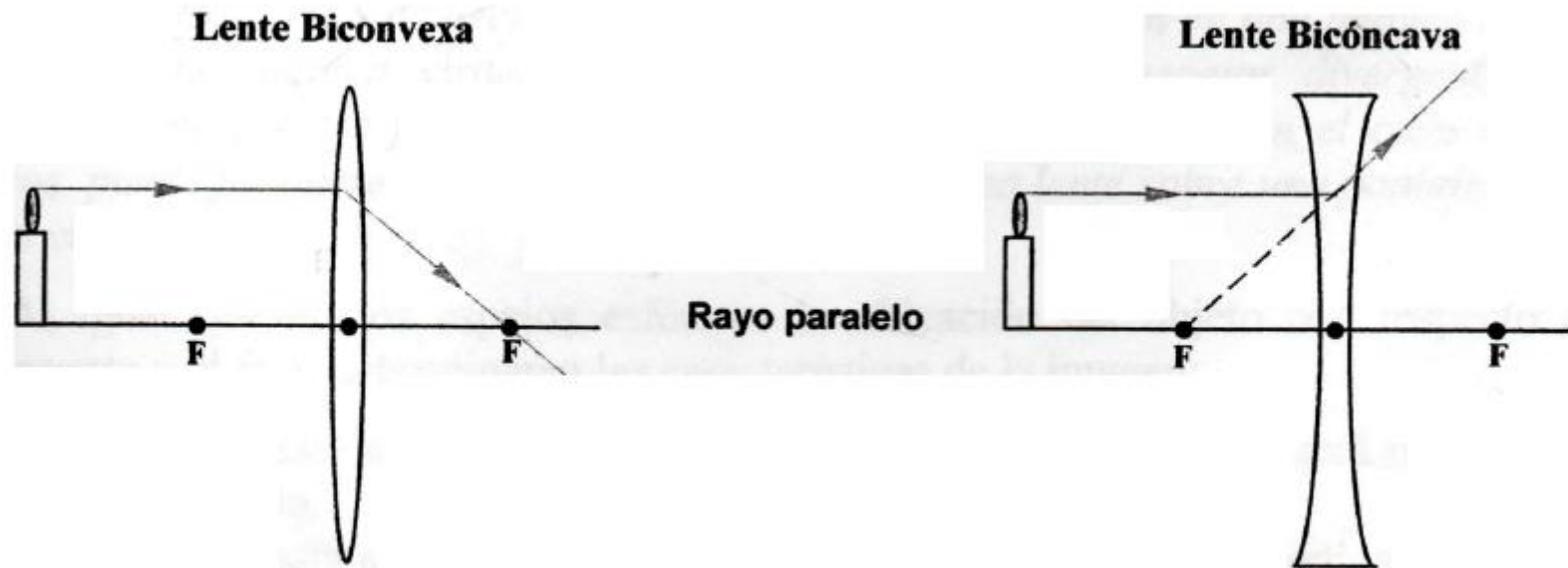
Al igual que un espejo esférico, una lente con geometría esférica tiene un centro de curvatura, un radio de curvatura, un punto focal y una longitud focal para cada una de sus superficies. [Los puntos focales se encuentran a iguales distancias de cada lado de la lente, sin importar si los radios de curvatura son iguales o no; dado que para una lente esférica $f \neq r/2$ como ocurría en el caso del espejo esférico.]

Las reglas generales para el trazo de diagramas de rayos en el caso de las lentes son análogas a las de los espejos esféricos, pero es claro que se necesitan ciertas modificaciones, pues la luz pasa a través de una lente en cualquier dirección. Los lados opuestos de una lente se distinguen como los lados objeto e imagen. El lado objeto es el lado donde se coloca el objeto, y el lado imagen es el lado opuesto de la lente (donde se formaría una imagen real).

Los Tres Rayos Principales

Los rayos desde un punto de un objeto se trazan de la siguiente manera:

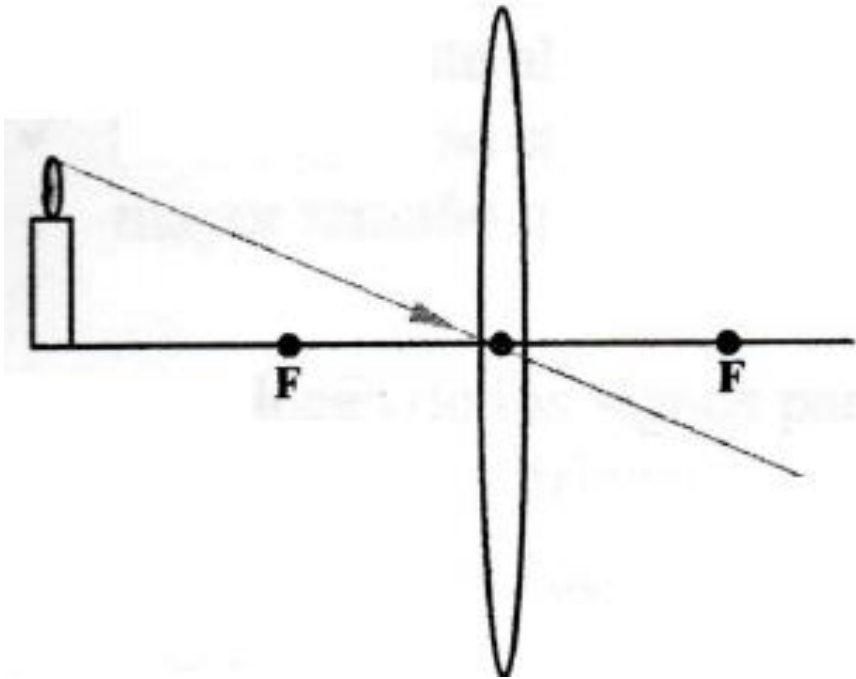
- Un **rayo paralelo** es un rayo paralelo al eje de la lente al momento de la incidencia y que después de la refracción pasa por el punto focal en el lado imagen de una lente convergente, o parece divergir del punto focal del lado objeto en una lente divergente.



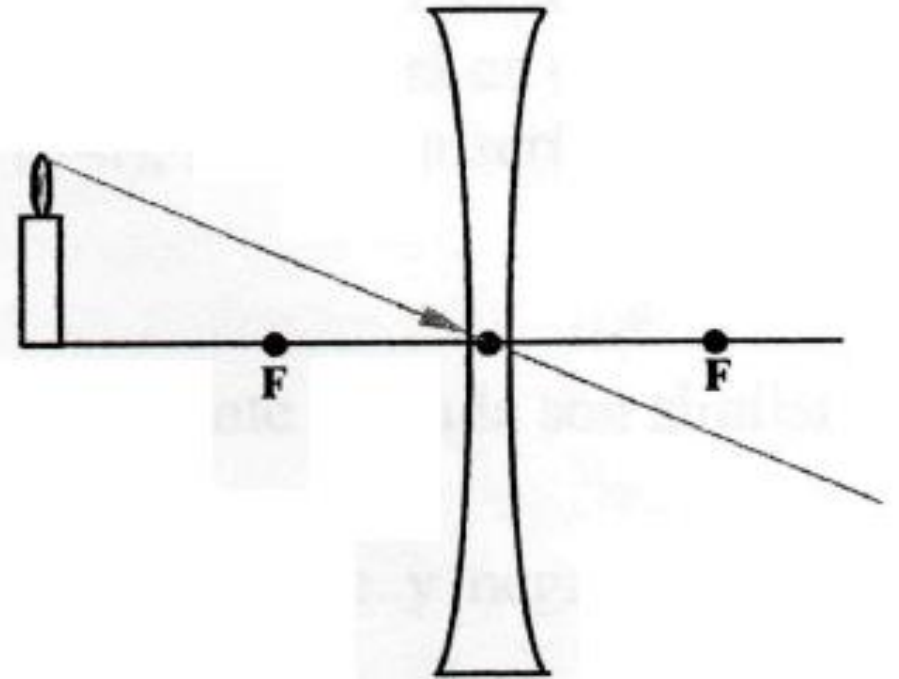
Los Tres Rayos Principales

Los rayos desde un punto de un objeto se trazan de la siguiente manera:

- Un **rayo principal** es un rayo que pasa por el centro de la lente sin desviación.



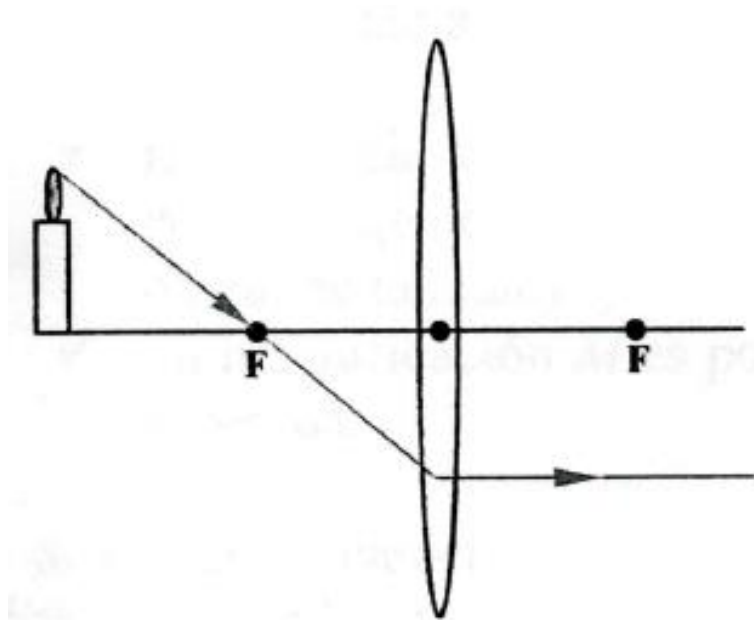
Rayo Principal



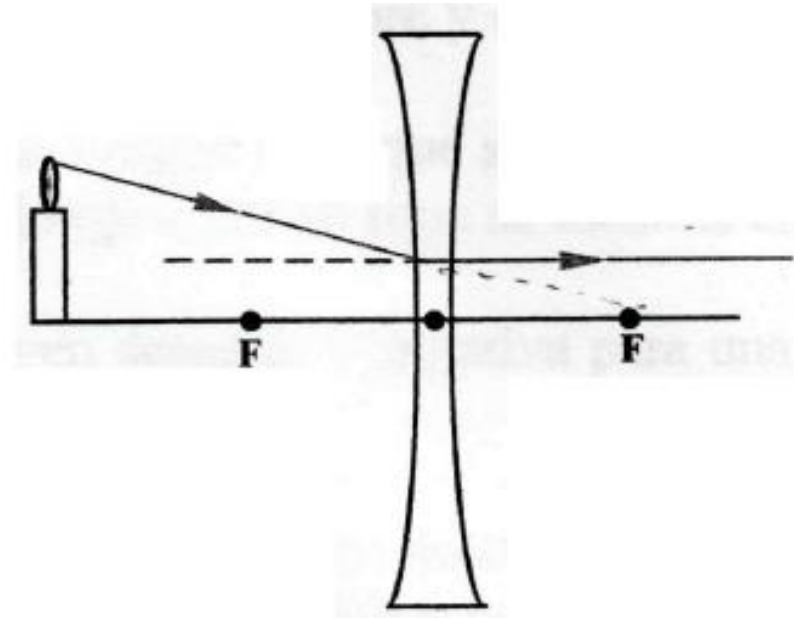
Los Tres Rayos Principales

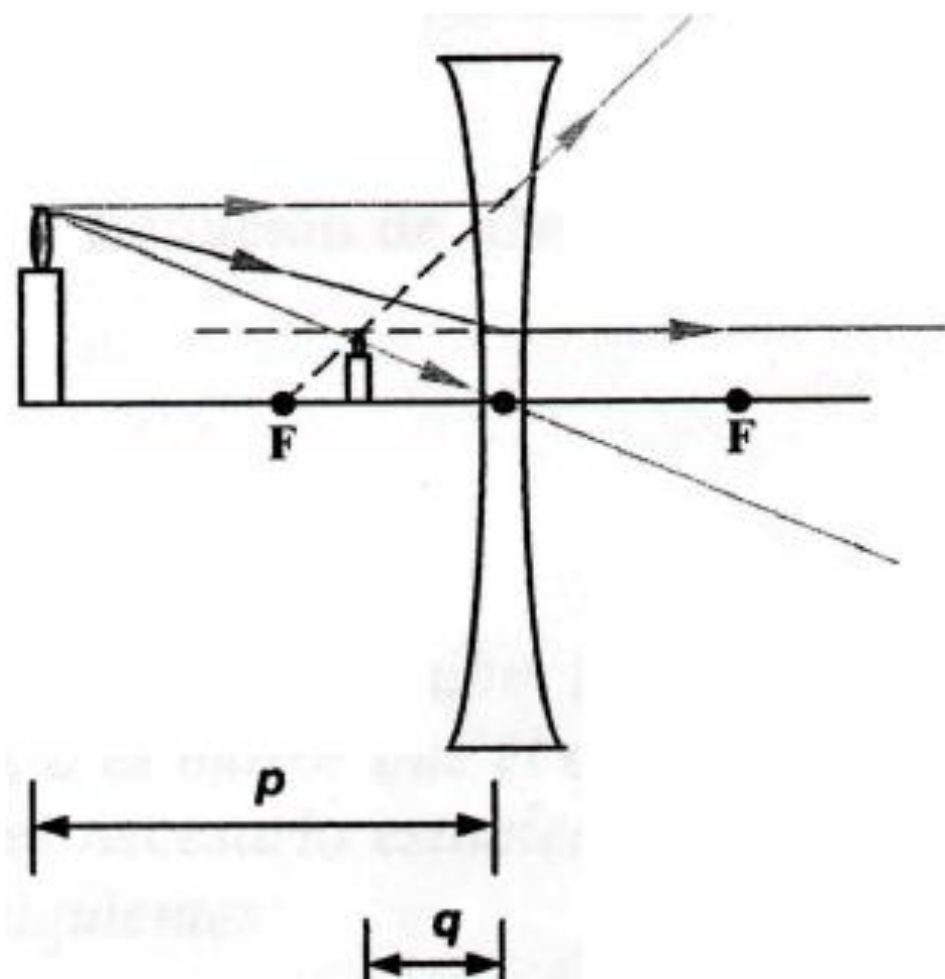
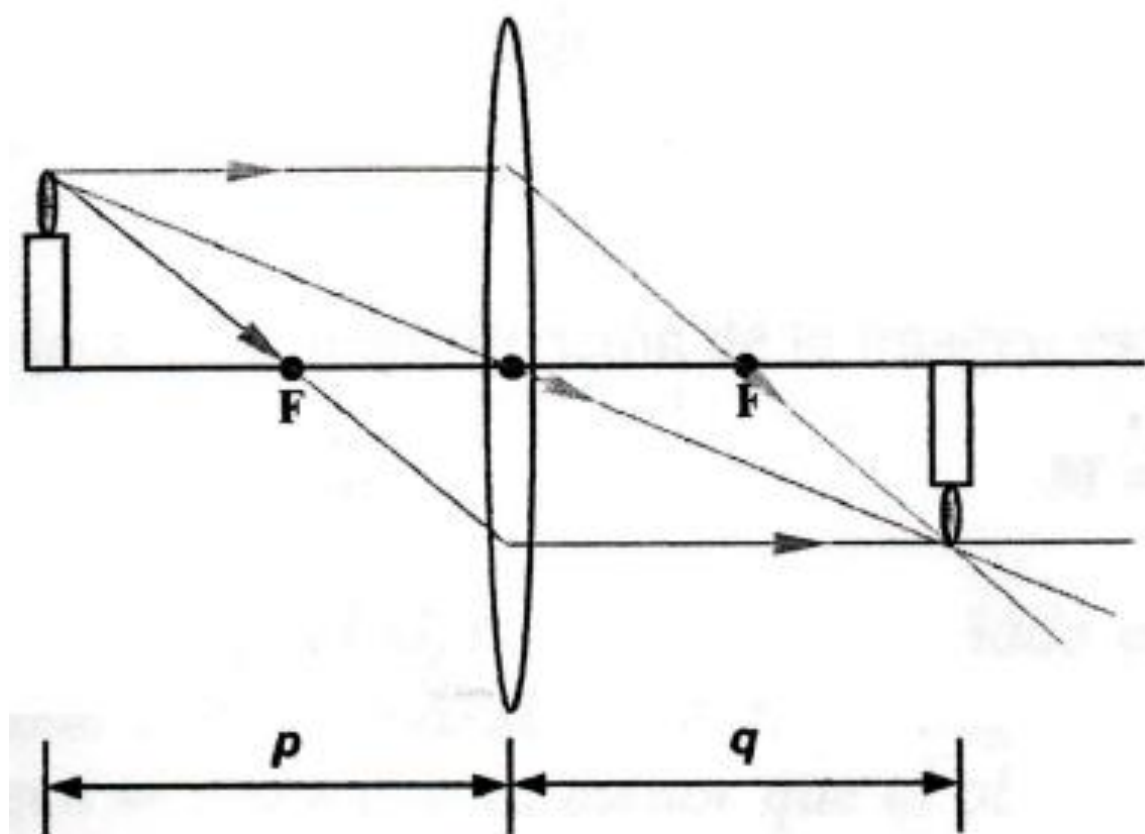
Los rayos desde un punto de un objeto se trazan de la siguiente manera:

- Un **rayo focal** es un rayo que pasa por el punto focal del lado objeto de la lente convergente, o que parece pasar por el punto focal del lado imagen de una lente divergente, y que después de la refracción es paralelo al eje de la lente.



Rayo Focal





Análisis de la Formación de Imágenes

Para una lente, la imagen es real cuando se forma del lado de la lente opuesto al objeto y virtual cuando se forma en el mismo lado de la lente que el objeto.

En las **lentes divergentes** solo se forman *imágenes virtuales*.

Al igual que en los espejos esféricos la ubicación del objeto con respecto a **la lente convergente** y al foco determinarán las características de la imagen:

- En el caso en que $p > 2f$ la imagen será real, invertida y menor que el objeto.
- En el caso en que $p = 2f$ se forma una imagen real, invertida y del mismo tamaño del objeto.
- En el caso en que $f < p < 2f$ se forma una imagen real, invertida y ampliada.
- En el caso en que $p = f$ los rayos que llegan a la lente emergen de ella paralelamente al eje principal de modo que la imagen se formará en el infinito.
- En el caso en que $p < f$ se forma una imagen virtual, derecha y ampliada.

Análisis de la Formación de Imágenes

Simuladores

Convergente

<https://www.geogebra.org/m/EWg2nWxU#material/POedpyQ1>

Divergente

<https://www.geogebra.org/m/EWg2nWxU#material/zSDnDkov>

Problemas:

Hay dos maneras de determinar la posición y el tamaño de la imagen; una de ellas es de manera gráfica mediante un diagrama de rayos a escala y otra forma mediante métodos analíticos utilizando la ecuación de Descartes, que relaciona las distancias objeto, imagen y la longitud focal:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de Descartes para espejos

El factor de magnificación puede determinarse de forma analítica, como el cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto:

$$M = \frac{h_i}{h_o}$$

O bien, expresado en términos de las distancias de la imagen y el objeto:

$$M = -\frac{q}{p}$$

$$M = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p}$$

Convenciones de signos para lentes

Si $|M| > 1$, la imagen se magnifica, o es mayor que el objeto. Si $|M| < 1$, la imagen se reduce, o es menor que el objeto.

Además, es necesario establecer los signos de las diversas cantidades, y por convención se utilizarán los siguientes:

- La **longitud focal (f)** es **positiva (+)** para una **lente convergente**
negativa (-) para una **lente divergente**
- La **distancia al objeto (p)** siempre se considera **positiva (+)** para **objeto es real**
- La **distancia a la imagen (q)** es **positiva (+)** para una imagen real (que se forma en el lado opuesto al objeto)
negativa (-) para una imagen virtual (que se forma en el mismo lado del objeto)
- La **magnificación (M)** es **positiva (+)** para una **imagen derecha**
negativa (-) para una **imagen invertida**

Ejemplos:

- a) La longitud focal de una lente convergente es de 15 cm. Un objeto de 3 cm de altura se coloca sobre el eje principal. Hallar la posición, el tipo y tamaño de la imagen cuando el objeto se encuentra a 40 cm del vértice.
- b) Una lente divergente tiene una longitud focal de 15 cm. Si un objeto se encuentra a 30 cm de ella, ¿Dónde esta la imagen y cuáles son sus características?