



UNIDAD 2

ÓPTICA GEOMÉTRICA

LEY DE SNELL – ESPEJOS PLANOS

Prof. Ing. Natalia Montalván

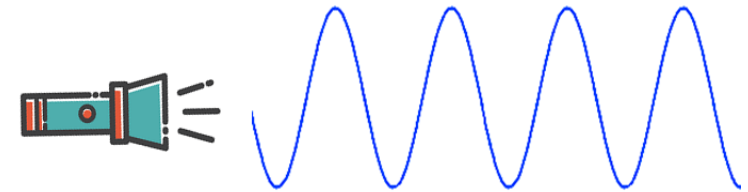
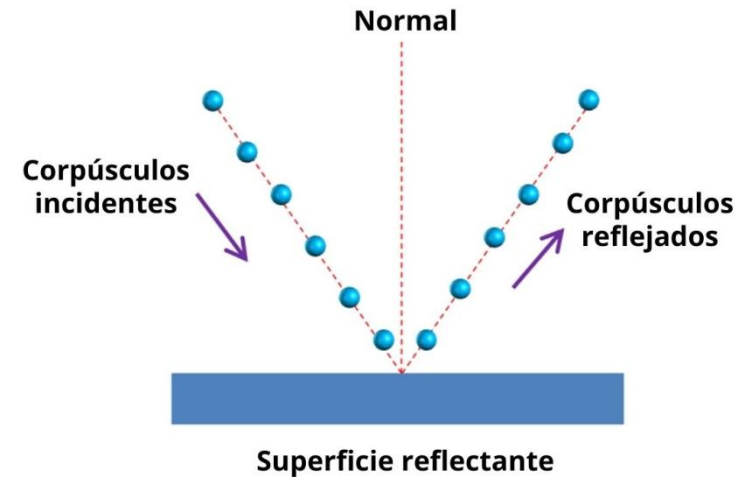
La naturaleza de la luz

Hasta la época de Isaac Newton (1642-1727), la mayoría de científicos pensaban que la luz consistía en **corrientes de partículas** (llamadas corpúsculos) emitidas por las fuentes luminosas.

Alrededor de 1665, comenzaron a descubrirse evidencias de las propiedades ondulatorias de la luz. En 1873 James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación.

Este avance, así como el trabajo experimental que inició en 1887 Heinrich Hertz, demostró en forma concluyente que la **luz en verdad es una onda electromagnética**

Sin embargo, la concepción ondulatoria de la luz no ofrece una visión completa sobre su naturaleza. Varios efectos asociados con su emisión y absorción revelan un aspecto de partícula, en el sentido en que la energía transportada por las ondas luminosas se encuentra contenida en paquetes discretos llamados fotones o cuantos. Estas propiedades aparentemente contradictorias de onda y partícula se conciliaron a partir de 1930 con el desarrollo de la electrodinámica cuántica, una **teoría integral que incluye tanto las propiedades ondulatorias como corpusculares**. La propagación de la luz se describe mejor con el modelo ondulatorio, pero para comprender la emisión y la absorción se requiere un enfoque corpuscular.



La **óptica** es la ciencia que trata de las propiedades, de la naturaleza de la luz y de sus interacciones con la materia. Para nuestro estudio podemos decir que la luz:

- Es una onda electromagnética.
- Es visible en algunos rangos al ojo humano.
- Se propaga en el vacío con una velocidad constante de aproximadamente 3×10^8 m/s.
- Esta velocidad es un límite que impone la naturaleza y no puede ser superado.
- Las diferentes frecuencias de la luz son captadas por el ojo y distinguidas por su color.
- La luz también es una partícula.

Los objetos se pueden clasificar de acuerdo a su comportamiento frente a la luz como:

- **Cuerpos luminosos:** Son emisores de luz.
- **Cuerpos transparentes:** son los que dejan pasar la luz y ver los objetos a través de él (el vidrio).
- **Cuerpos traslucidos:** son los que son atravesados por la luz, pero no permiten ver los objetos a través de ellos (un papel).
- **Cuerpos opacos:** los que no se dejan atravesar por la luz (una gruesa lámina de madera).

Óptica

Para describir las direcciones en las que se propaga la luz, conviene representar una onda luminosa por medio de rayos. En la teoría corpuscular de la luz, los rayos son las trayectorias de las partículas.

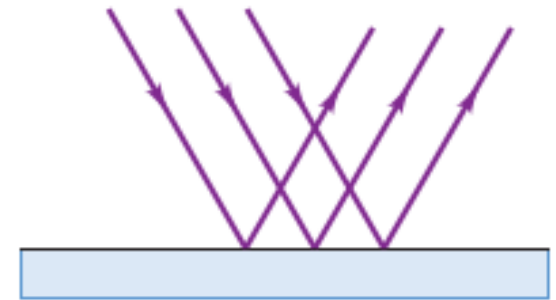
La rama de la óptica en la cual resulta adecuada la descripción de rayos se llama **óptica geométrica**, mientras que la rama que se ocupa específicamente del comportamiento ondulatorio se llama **óptica física**.

Usaremos el **modelo de la luz basado en rayos** para explorar dos de los aspectos más importantes de la propagación de la luz: **reflexión y refracción**.

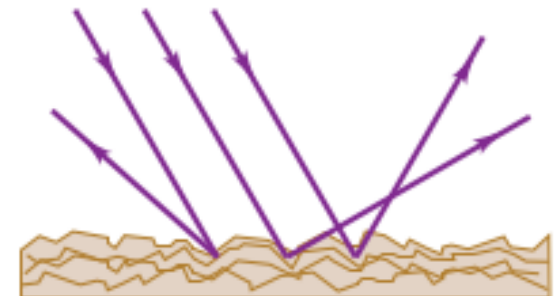
La reflexión con un ángulo definido desde una superficie muy lisa se llama **reflexión especular** (del vocablo latino que significa “espejo”). La reflexión dispersa a partir de una superficie áspera se llama **reflexión difusa**.

Ambas clases de reflexión ocurren con materiales transparentes o con materiales opacos que no transmiten la luz. La gran mayoría de objetos en el ambiente (ropa, plantas, personas) son visibles porque reflejan la luz en una forma difusa desde sus superficies. Sin embargo, nuestro interés principal se centra en la reflexión especular a partir de una superficie muy lisa, como vidrio, plástico o metal muy pulido. A menos que se especifique otra cosa, cuando hablemos de “reflexión” siempre nos referiremos a la reflexión especular.

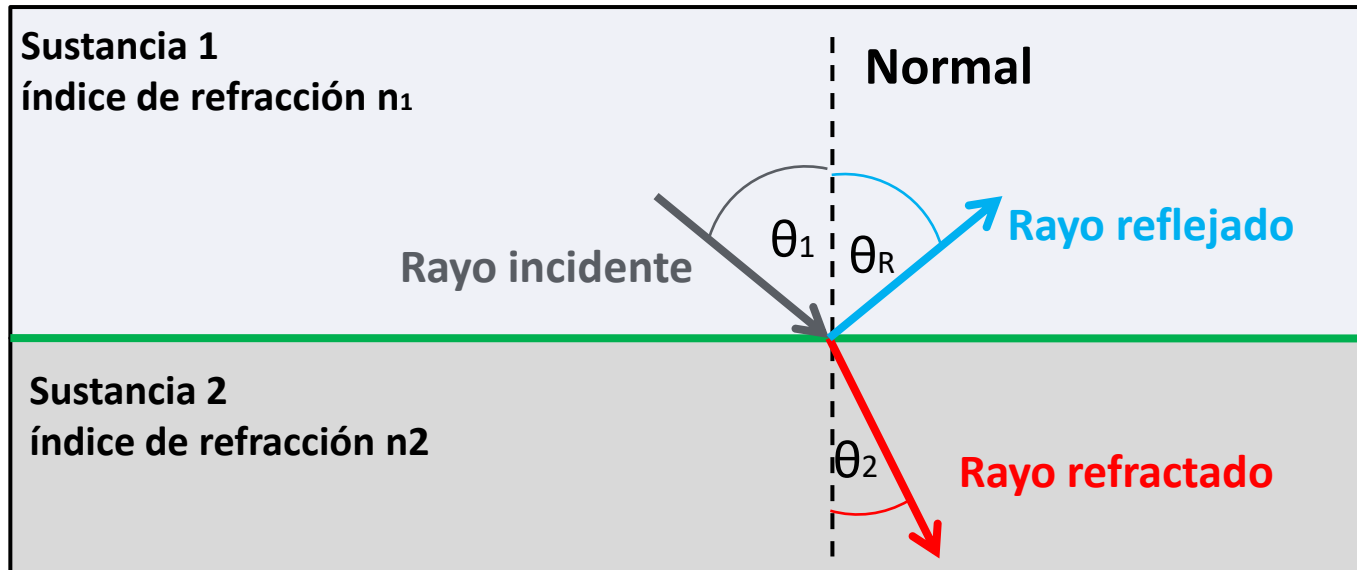
a) Reflexión especular



b) Reflexión difusa



Reflexión y refracción de la luz



Interface
(Separa dos
sustancias)

Cuando una onda luminosa incide en una **interfaz lisa** que separa dos materiales transparentes (como el aire y el vidrio o el agua y el vidrio), la onda en general es reflejada parcialmente y también refractada (transmitida) parcialmente hacia el segundo material.

Describimos las direcciones de los rayos **incidente**, **reflejado** y **refractado** (transmitido) en una interfaz lisa entre dos materiales en términos de los ángulos que forman con la **normal** (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia.



Utilizaremos el siguiente simulador para observar cómo se desvía la luz en la interfase entre dos medios:

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

Reflexión y refracción de la luz

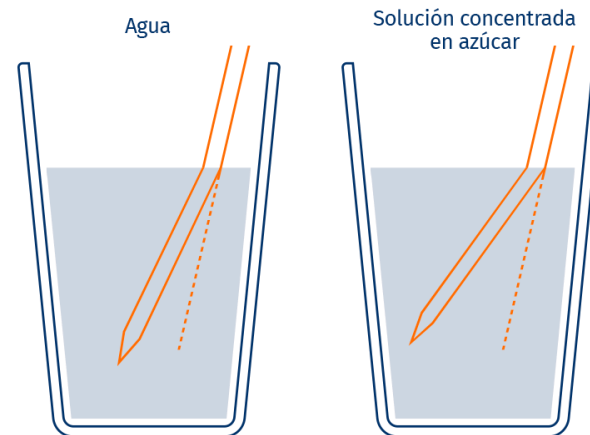
Índice de refracción

El **índice de refracción** de un material, denotado por n , es la razón entre la rapidez de la luz en el vacío ($c = 300000 \text{ km/s}$) y la rapidez de la luz en el material (v):

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

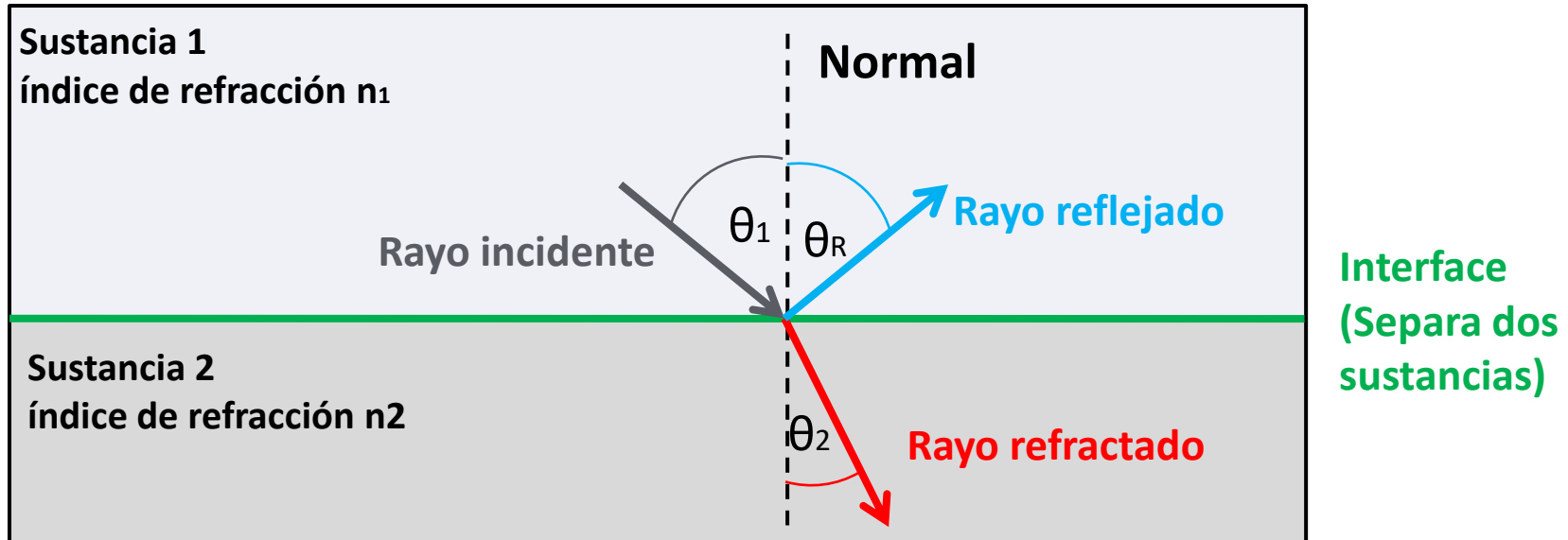
La luz siempre viaja con más lentitud en un material que en el vacío, por lo que el valor de n en cualquier material que no sea el vacío siempre es mayor que la unidad. Los índices de refracción dependen del material y muchos están tabulados:

Material	Índice de refracción
Vacío	1,00
Aire	1,003
Agua	1,33
Alcohol etílico	1,36
Vidrio	1,5
Diamante	2,42



Recuerden que la rapidez de propagación v es inversamente proporcional al índice de refracción n : cuanto mayor sea el índice de refracción de un material, menor será la rapidez de la onda en ese material.

Leyes de reflexión y refracción de la luz



Los **estudios experimentales** de las direcciones de los rayos incidentes, reflejados y refractados en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos condujeron a las siguientes conclusiones:

- Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, están todos en el mismo plano. El plano de los tres rayos es perpendicular al plano de la interface (límite entre los dos materiales).
- El ángulo de reflexión θ_R es igual al ángulo de incidencia θ_1 para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales: $\theta_R = \theta_1$
- El ángulo de incidencia y el del rayo refractado se relacionan entre sí mediante la ley de refracción o **ley de Snell**:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

Reflexión y refracción de la luz



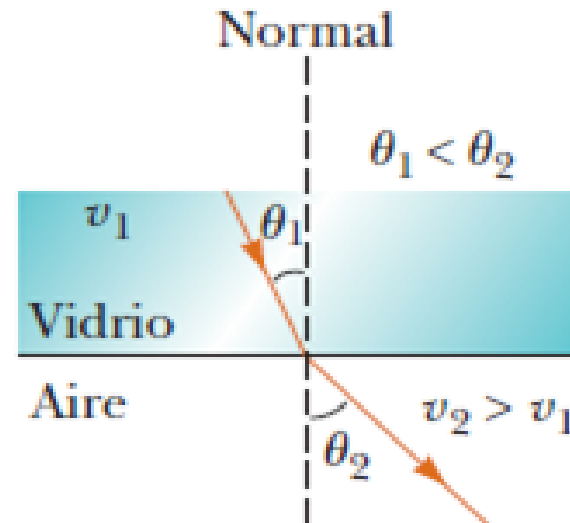
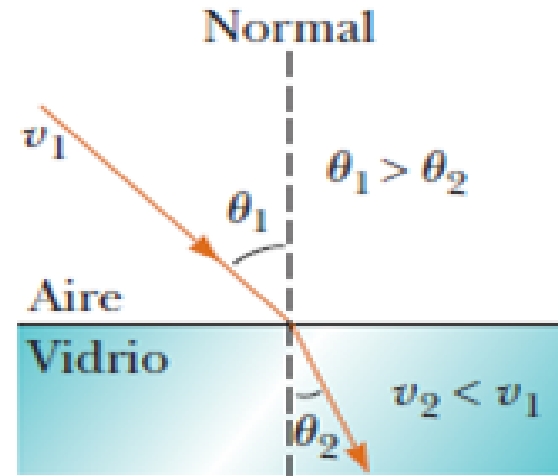
Qué ocurriría si...

Un rayo pasa de un material 1 hacia otro material 2 que tiene un **mayor índice de refracción** ($n_2 > n_1$):

El ángulo θ_2 que forma el rayo refractado con la normal es más pequeño en el segundo material que el ángulo de incidencia θ_1 en el primero ($\theta_1 > \theta_2$), por consiguiente, al atravesar la interface **el rayo se desvía hacia la normal**.

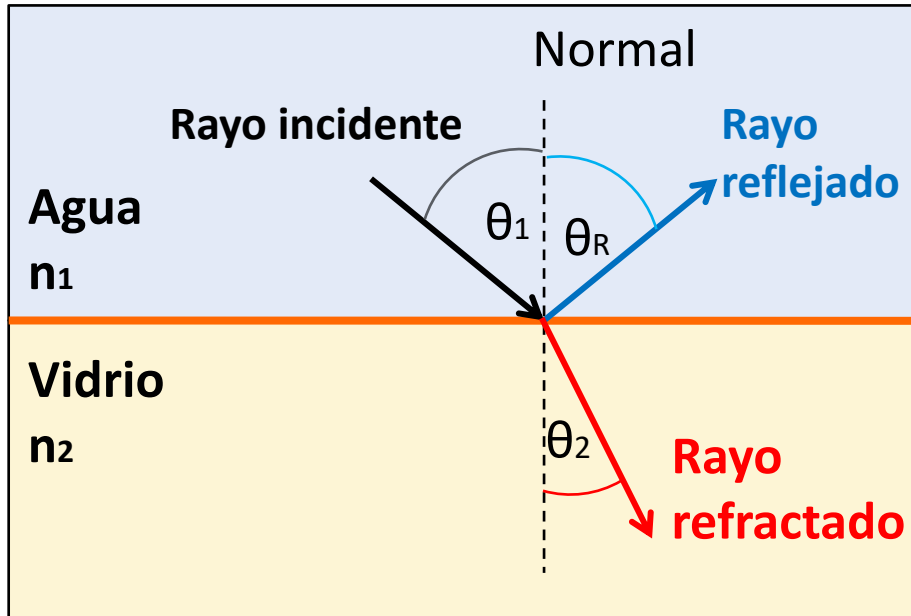
El segundo material tiene un **menor índice de refracción** que el primero ($n_2 < n_1$):

El ángulo θ_2 que forma el rayo refractado con la normal es más grande en el segundo material que el ángulo de incidencia θ_1 en el primero ($\theta_1 < \theta_2$), por lo tanto, al atravesar la interface **el rayo se desvía alejándose de la normal**:



Reflexión y refracción de la luz

Ejemplo 1 - Ley de Snell: Un haz de luz atraviesa desde un material **1** que es agua ($n = 1,33$) hacia un material **2** que es un vidrio ($n = 1,52$). Si el rayo incidente forma un ángulo de 60° con la normal, determine las direcciones de los rayos reflejado y refractado.



Dirección del rayo reflejado:

$$\theta_R = \theta_1 = 60^\circ$$

Dirección del rayo refractado:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

$$1,33 \cdot \sin 60 = 1,52 \cdot \sin \theta_2$$

$$\arcsin\left(\frac{1,33 \cdot \sin 60}{1,52}\right) = \theta_2$$

$$\theta_2 = 49,3^\circ$$

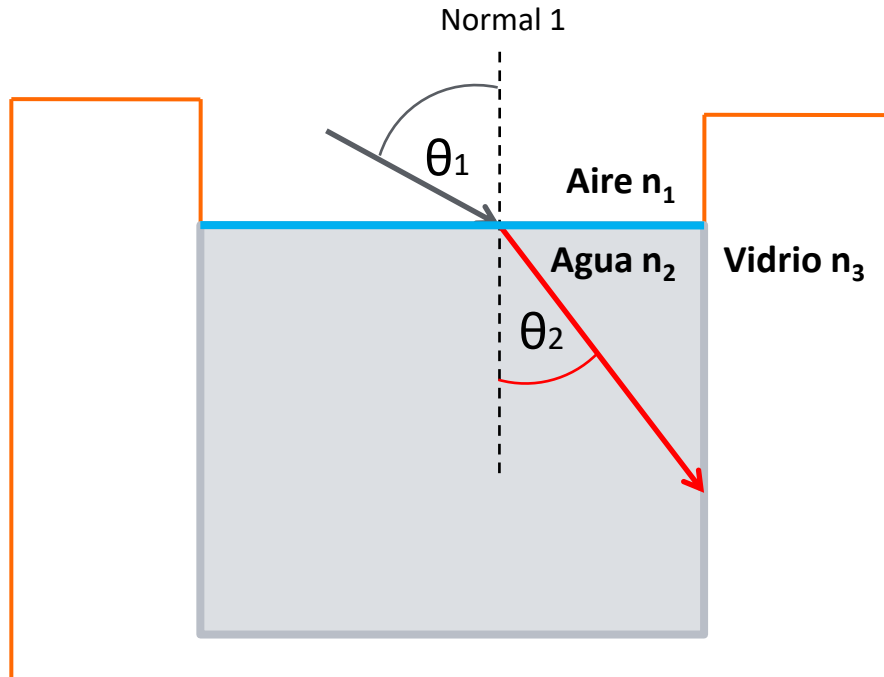


Actividades de repaso:

- En el ejemplo anterior, ¿qué ocurriría si el material 1 fuera diamante? ¿Es posible determinar la dirección del rayo refractado?
- Resuelve el ejercicio 8 de la guía de trabajos prácticos.

Refracción de la luz

Ejemplo 2 - Ley de Snell: El depósito de la figura tiene sus paredes de vidrio ($n = 1,50$) y contiene agua ($n = 1,33$). ¿Qué ángulo forma el rayo refractado de la interface agua - vidrio con la normal de dicha interface si el ángulo de incidencia sobre el agua es igual a 75° ?



INTERFACE 1 AIRE – AGUA:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

$$1 \cdot \sin 75 = 1,33 \cdot \sin \theta_2$$

$$\arcsin\left(\frac{1 \cdot \sin 75}{1,33}\right) = \theta_2$$

$$\theta_2 = 46,6^\circ$$



Analiza el recorrido del rayo e identifica la segunda interface. Completa el dibujo con la Normal 2 y el rayo refractado de dicha interface.

Refracción de la luz

Ejemplo 2 - Ley de Snell: El depósito de la figura tiene sus paredes de vidrio ($n = 1,50$) y contiene agua ($n = 1,33$). ¿Qué ángulo forma el rayo refractado de la interface agua - vidrio con la normal de dicha interface si el ángulo de incidencia sobre el agua es igual a 75° ?

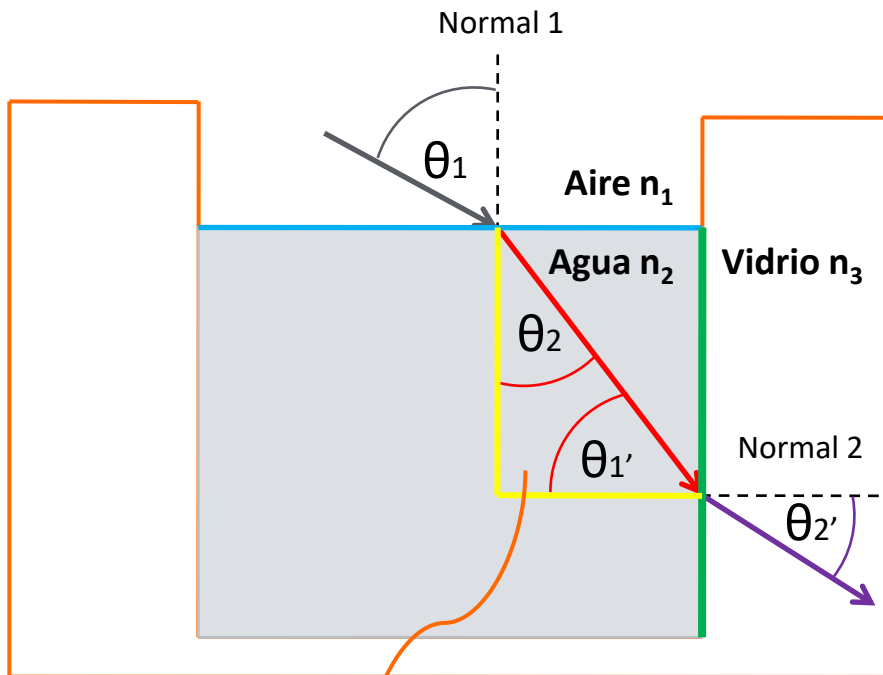
INTERFACE 2 AGUA – VIDRIO:

$$n_2 \cdot \sin \theta_{1'} = n_3 \cdot \sin \theta_{2'}$$

$$1,33 \cdot \sin 43,4 = 1,50 \cdot \sin \theta_{2'}$$

$$\arcsin\left(\frac{1,33 \cdot \sin 43,4}{1,50}\right) = \theta_{2'}$$

$$\theta_{2'} = 37,5^\circ$$

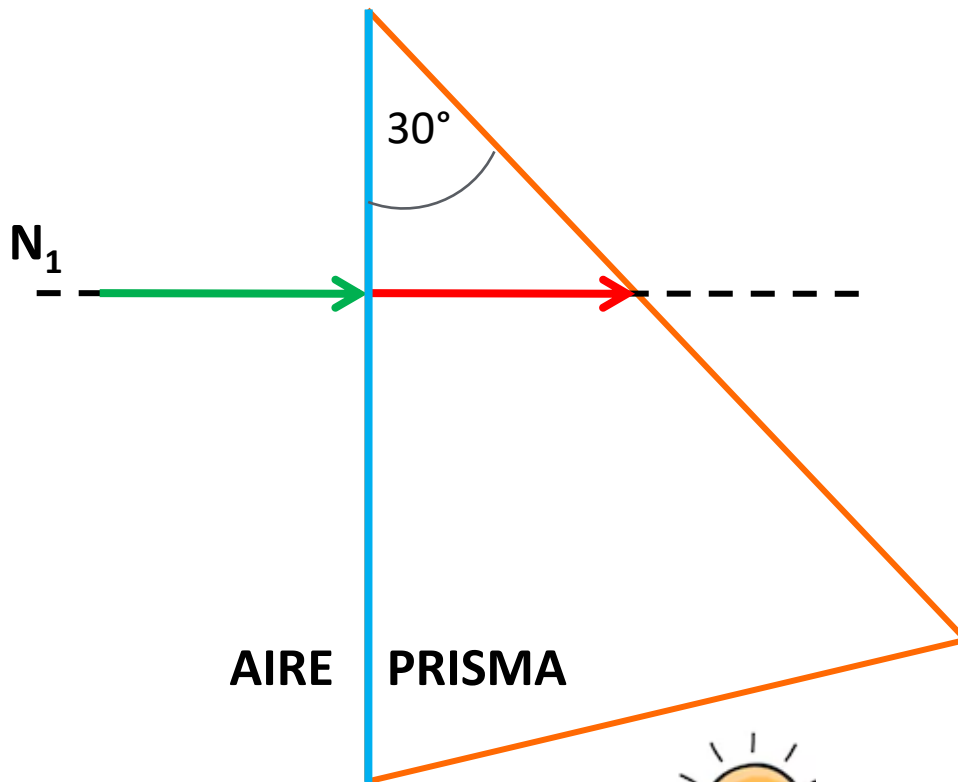


$$90^\circ + \theta_2 + \theta_{1'} = 180^\circ$$

$$\theta_{1'} = 43,4^\circ$$

Ley de Snell en un prisma

Ejercicio 12. Determine el ángulo de desviación con que emerge un rayo de luz de un prisma de 30° rodeado de aire y de índice de refracción $n = 1,55$.



INTERFACE 1: AIRE - PRISMA

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

$$1 \cdot \sin 0 = 1,55 \cdot \sin \theta_2$$

$$\arcsin\left(\frac{1 \cdot \sin 0}{1,55}\right) = \theta_2$$

$$\theta_2 = 0$$

INTERFACE 1

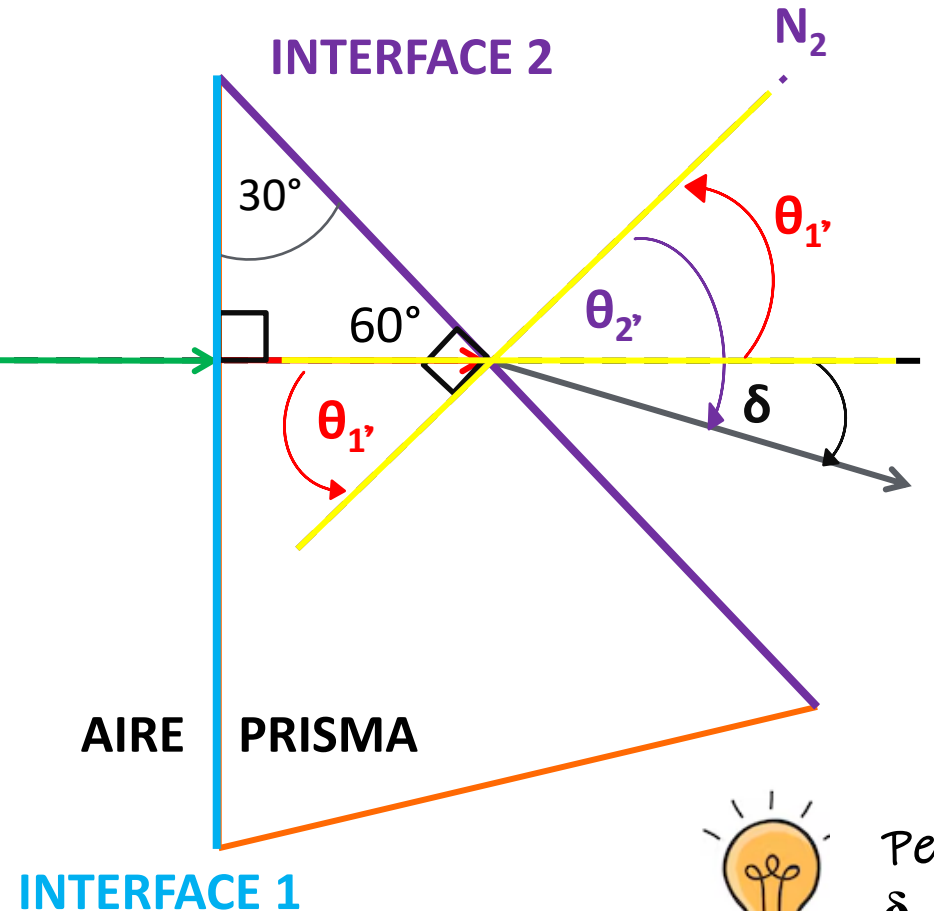


¿Qué significa que la dirección del rayo refractado sea igual a cero?

Cuando un haz de luz incide perpendicular a la interface (sobre la normal) la atraviesa sin desviarse

Ley de Snell en un prisma

Ejercicio 12. Determine el ángulo de desviación con que emerge un rayo de luz de un prisma de 30° rodeado de aire y de índice de refracción $n = 1,55$.



INTERFACE 2: PRISMA - AIRE

$$n_2 \cdot \sin \theta_1' = n_1 \cdot \sin \theta_2'$$

$$1,55 \cdot \sin 30 = 1 \cdot \sin \theta_2,$$

$$\arcsin\left(\frac{1,55 \cdot \sin 30}{1}\right) = \theta_{2'}$$

$$\theta_{2'} = 50,8$$



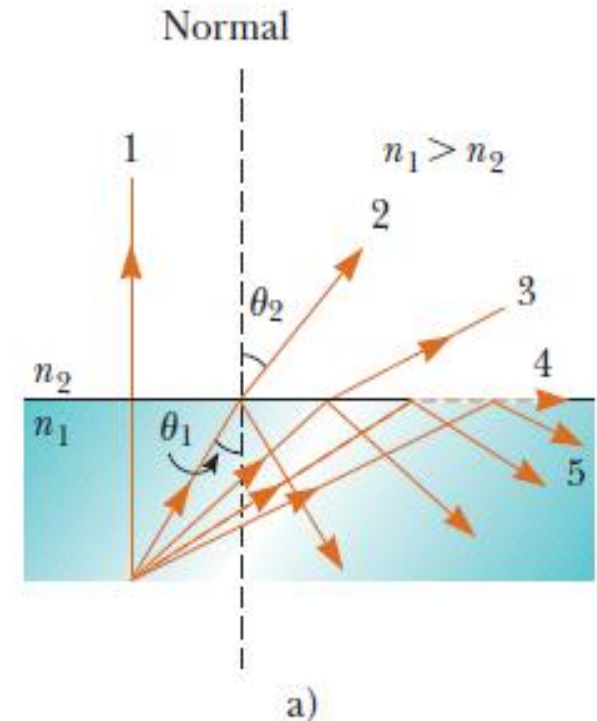
Pero el ejercicio pide la desviación δ . ¿Cómo la determinarías?

Reflexión total interna

Hemos descrito la forma en que la luz se refleja y se transmite parcialmente en una interfaz entre dos materiales con distintos índices de refracción. Sin embargo, **en ciertas circunstancias, toda la luz se puede reflejar en la interfaz, sin que se transmita nada de ella**, aun si el segundo material es transparente.

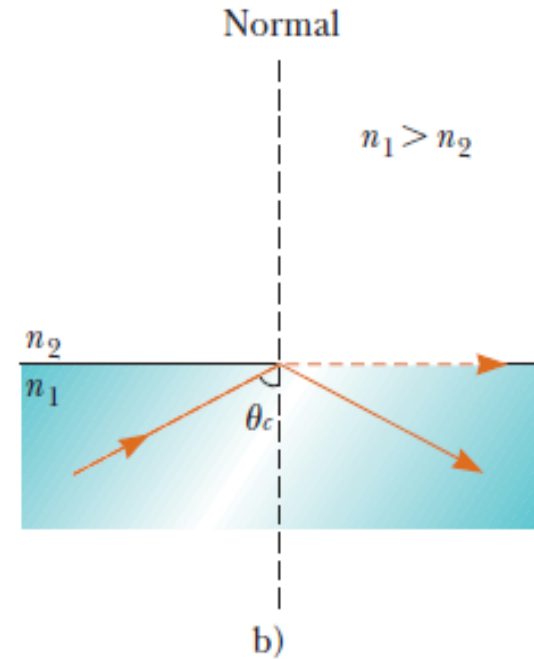
Observemos la siguiente imagen: Se ilustran varios rayos que salen de una fuente puntual en el material a con índice de refracción n_1 . Los rayos inciden en la superficie del segundo material con índice n_2 , donde $n_1 > n_2$:

- **Rayo 1:** Sin importar cuáles sean los materiales en cada lado de la interfaz, **en el caso de una incidencia normal, el rayo transmitido no se desvía en absoluto.**
- **Rayos 2 y 3:** Como $n_1 > n_2$ el rayo refractado **se desvía apartándose de la normal.**
- **Rayo 4:** Debe haber algún valor de θ_1 menor que 90° para el cual la ley de Snell da **$\sin \theta_2 = 1$ y por ende $\theta_2 = 90^\circ$** . Esto se ilustra con el **rayo 4** en el diagrama, que emerge apenas rozando la superficie con un ángulo de refracción de 90° .



Reflexión total interna

El ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge en forma tangencial a la superficie se llama **ángulo crítico**, y se denota con θ_c . Más allá del ángulo crítico, el rayo no puede pasar hacia el material superior: queda atrapado en el material inferior y se refleja por completo en la superficie de frontera. Esta situación, llamada **reflexión interna total**, sólo ocurre cuando un rayo incide sobre la interfaz con un segundo material cuyo índice de refracción es menor que el del material por el que viaja el rayo.



Es posible encontrar el ángulo crítico para dos materiales dados si se iguala $\theta_2 = 90^\circ$ ($\sin \theta_2 = 1$) en la ley de Snell. De esta forma, se tiene:

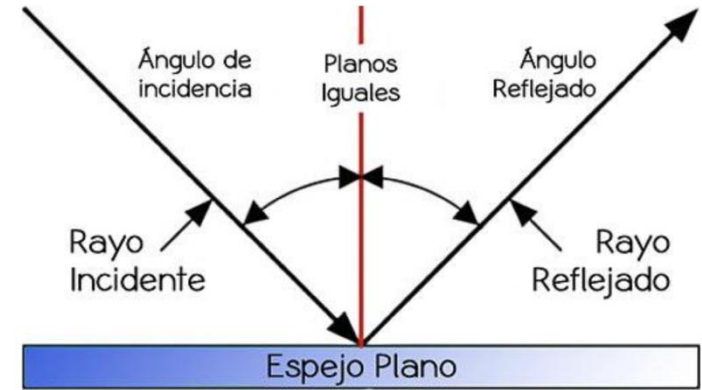
$$n_1 \cdot \sin \theta_c = n_2 \cdot \sin 90$$
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$



Determinar el valor del ángulo crítico para un vidrio rodeado de aire, si el índice de refracción del vidrio es 1,70.

Reflexión de la luz – Espejos planos

Para comprender las imágenes y su formación, sólo necesitamos el modelo de rayos de la luz, las leyes de reflexión y refracción, y un poco de geometría. El papel fundamental que desempeña la geometría en nuestro análisis es la razón por la que se da el nombre de **óptica geométrica** al estudio de la formación de imágenes mediante rayos luminosos. Comenzaremos nuestro análisis con uno de los dispositivos ópticos de formación de imágenes más sencillos: un **espejo plano**. Un espejo plano es una superficie lisa y muy pulida que forma imágenes debido a la reflexión de la luz.



Antes de analizar el significado del término imagen, necesitamos primero el concepto de **objeto** como se utiliza en óptica. Por objeto entendemos cualquier cosa desde donde se irradian rayos de luz. Esta luz podría ser emitida por el objeto mismo si éste es autoluminoso, como el filamento incandescente de una bombilla eléctrica.

Por otro lado, la luz podría ser emitida por una fuente distinta (como una lámpara o el Sol) y luego reflejarse en el objeto; un ejemplo de ello es la luz que llega a nuestros ojos desde las páginas de un libro, una remera o una pelota.

Reflexión de la luz – Espejos planos

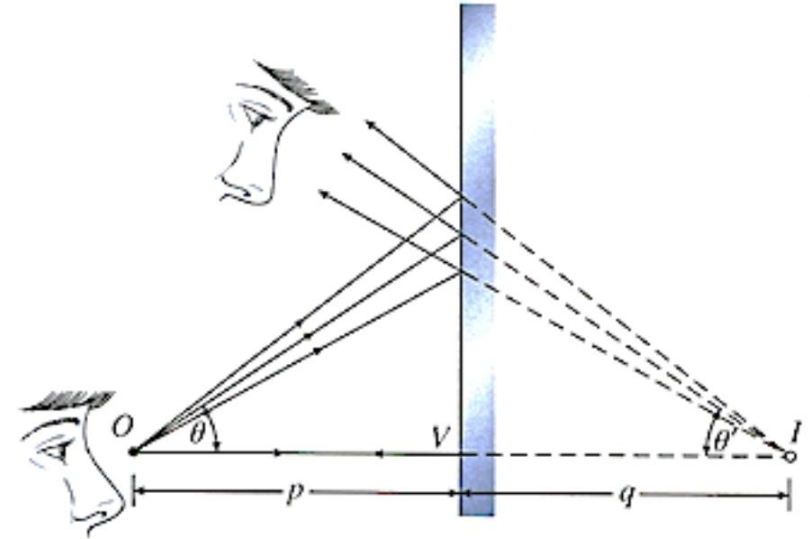
Consideremos una fuente puntual de luz ubicada en el punto O. Los rayos luminosos se irradian desde el objeto puntual P en todas direcciones.

El objeto puntual se encuentra a una **distancia p del espejo** denominada **distancia objeto**, los rayos proyectados inciden sobre el espejo y se reflejan con un ángulo $\theta_i = \theta_r$ y divergen, para el observador parecen provenir desde una fuente ubicada en I, detrás del espejo a una **distancia q del espejo** denominada **distancia imagen**.

En un espejo plano, la imagen de un objeto parece estar a la misma distancia **q**, detrás del espejo, que la distancia **p** a la que se encuentra el objeto real frente al espejo.

La imagen se forma donde **todos los rayos reflejados se interceptan** (imagen real) o donde parecen interceptarse (imagen virtual).

Las imágenes de los espejos planos son siempre imágenes virtuales.

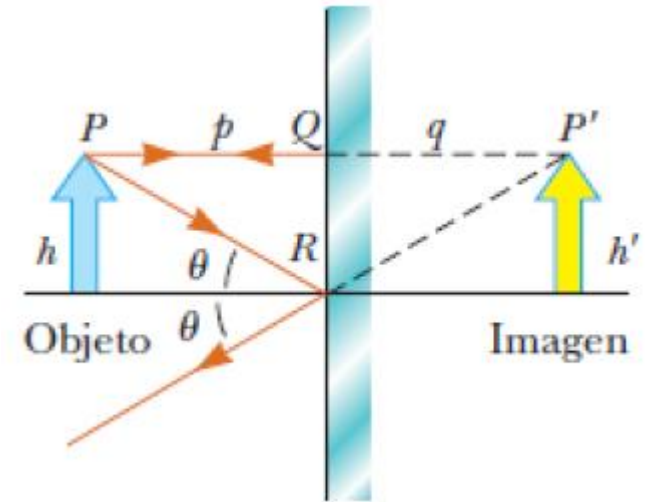


Los rayos luminosos provenientes del objeto situado en el punto O se reflejan en un espejo plano. Los rayos reflejados que penetran en el ojo se ven como si proviniesen del punto de imagen I.

Formación de imágenes en espejos planos

Consideremos ahora un objeto (representado por la flecha celeste) de una altura h y una distancia p del espejo, a pesar de que existe un número infinito de posibles direcciones hacia las cuales los rayos luminosos pueden salir de cada punto del objeto, solo es necesario elegir dos rayos para determinar donde se formara la imagen.

- Uno de esos rayos parte de P , sigue una trayectoria perpendicular hasta el espejo y se refleja sobre sí mismo.
- El segundo rayo sigue la trayectoria oblicua PR y se refleja como se muestra en la figura, de acuerdo con las leyes de la reflexión.



Un observador frente al espejo extendería los dos rayos reflejados de regreso hacia el punto en el cual parecen haberse originado, es decir, el punto P' por detrás del espejo. Continuar con este proceso para puntos diferentes de P sobre el objeto da como resultado una **imagen virtual** (representada por la flecha amarilla) del objeto completo, que parece formarse detrás del espejo.

Reglas generales de signos para un espejo plano:

1. Regla de signos para la distancia de objeto: cuando el objeto está del mismo lado de la superficie reflectante, la distancia de objeto **p es positiva**.
2. Regla de signos para la distancia de imagen: como la imagen está del otro lado de la superficie reflectante, la distancia imagen **q es negativa**.

$$p = -q$$