

Física II

Tercera parte: Óptica

Dr. Mario Enrique Álvarez Ramos(Responsable)

Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

Dr. Ezequiel Rodríguez Jáuregui

Dr. Santos Jesús Castillo

Webpage: <http://paginas.fisica.uson.mx/qb>

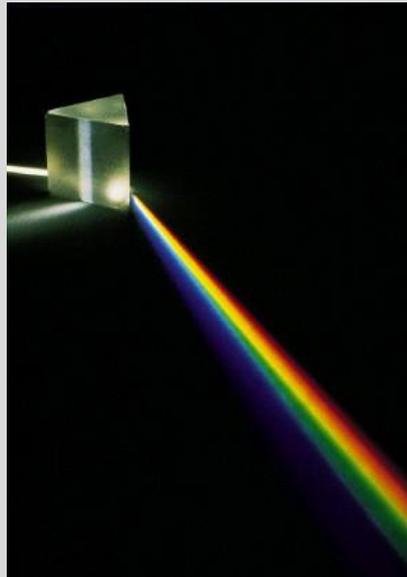
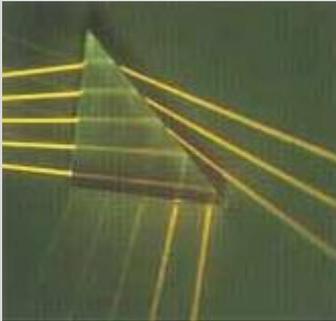
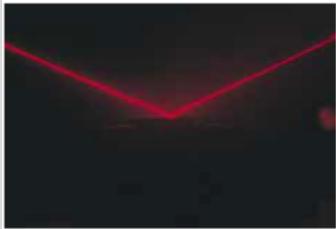
©2017 Departamento de Física

Universidad de Sonora

Tema 9: Leyes de la reflexión y refracción.

- i. La aproximación de rayos en la óptica geométrica.
- ii. Ley de la reflexión.
- iii. Índice de refracción y Ley de Snell.
- iv. Reflexión total interna. La fibra óptica.
- v. Dispersión y prismas.

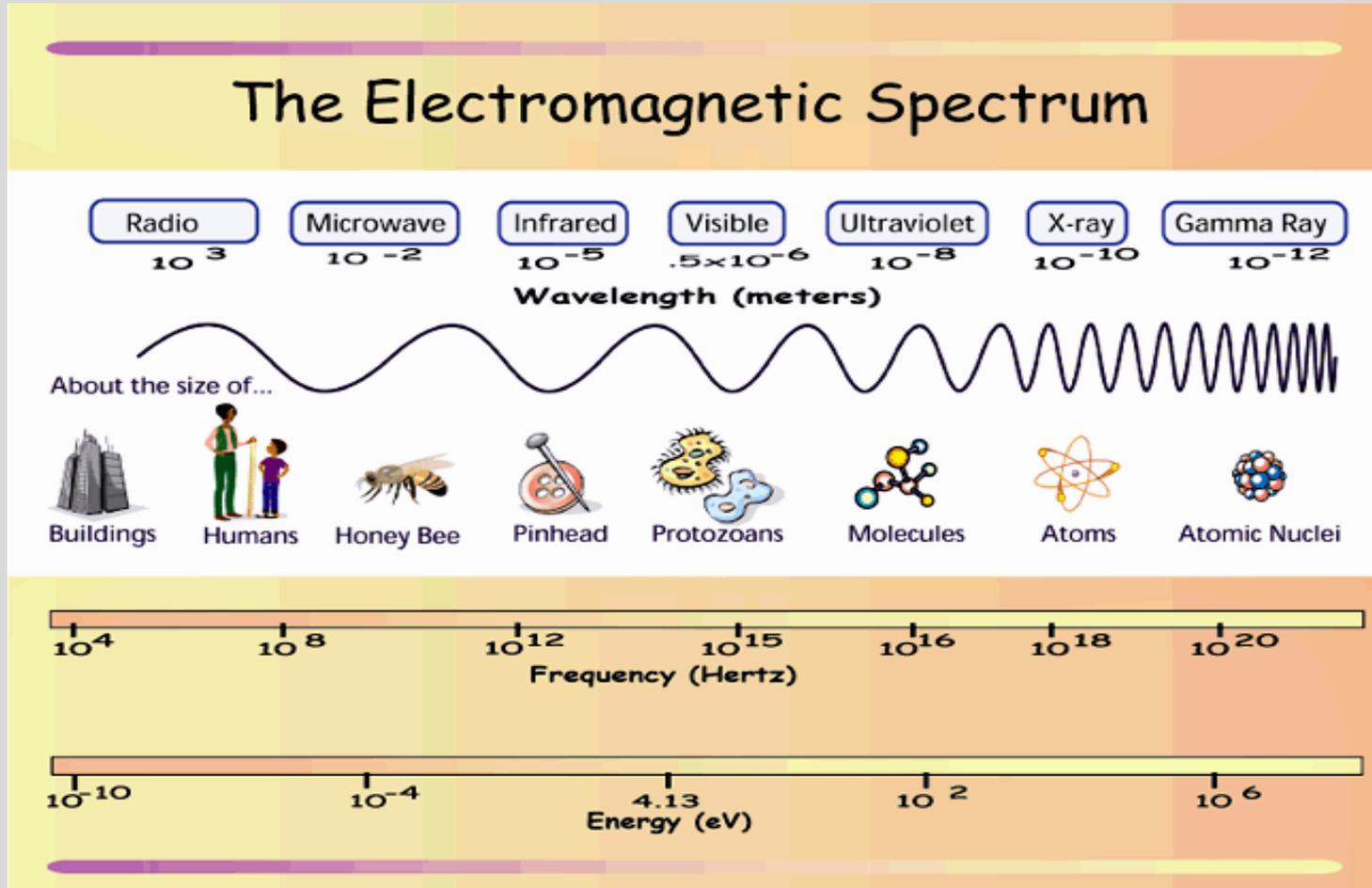
Leyes de la reflexión y refracción



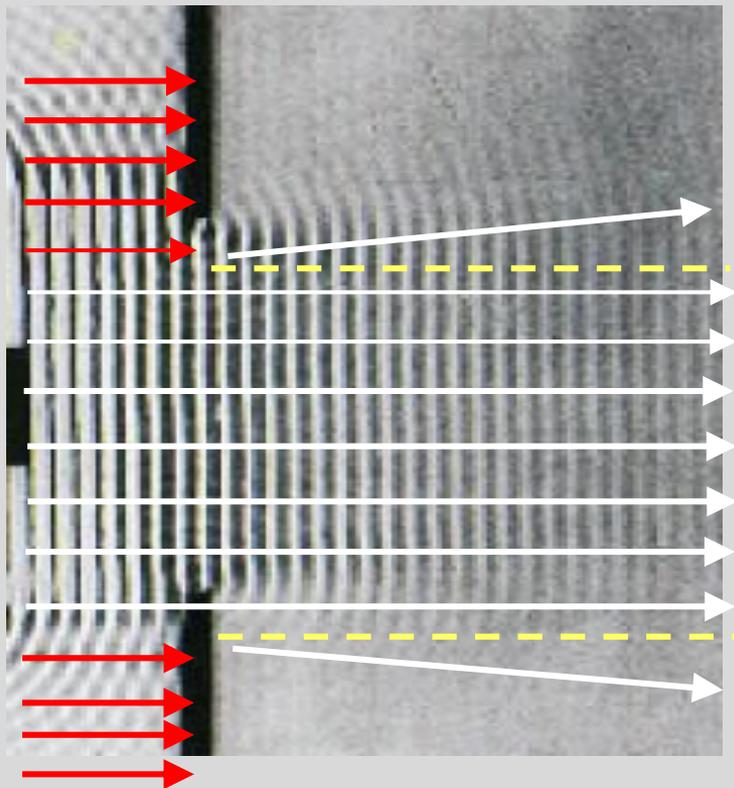
Naturaleza de la luz

- ¿Qué es la luz?
- Evolución histórica de las teorías acerca de la naturaleza de la luz
 - Las primeras teorías surgen en el siglo XVII. Había dos contrapuestas:
 - Teoría corpuscular (Newton).
 - Teoría ondulatoria (Huygen y Hooke).
 - En el siglo XIX la teoría corpuscular quedó desacreditada debido a:
 - Descubrimiento de los fenómenos de interferencia y difracción (Young y Fresnel) y de polarización (Fresnel).
 - Desarrollo de la teoría electromagnética y la posibilidad de la existencia de ondas electromagnéticas (Maxwell).
 - La teoría ondulatoria explicaba bien los fenómenos de propagación de la luz pero no la interacción con la materia.
 - A principios del siglo XX se postula una nueva teoría corpuscular que dice que la luz está formada por partículas de energía llamadas fotones (Einstein).
 - Hoy en día se acepta que la luz presenta una doble naturaleza:
 - Cuando se propaga por el espacio se comporta como una onda.
 - Cuando interacciona con la materia se comporta como una partícula.

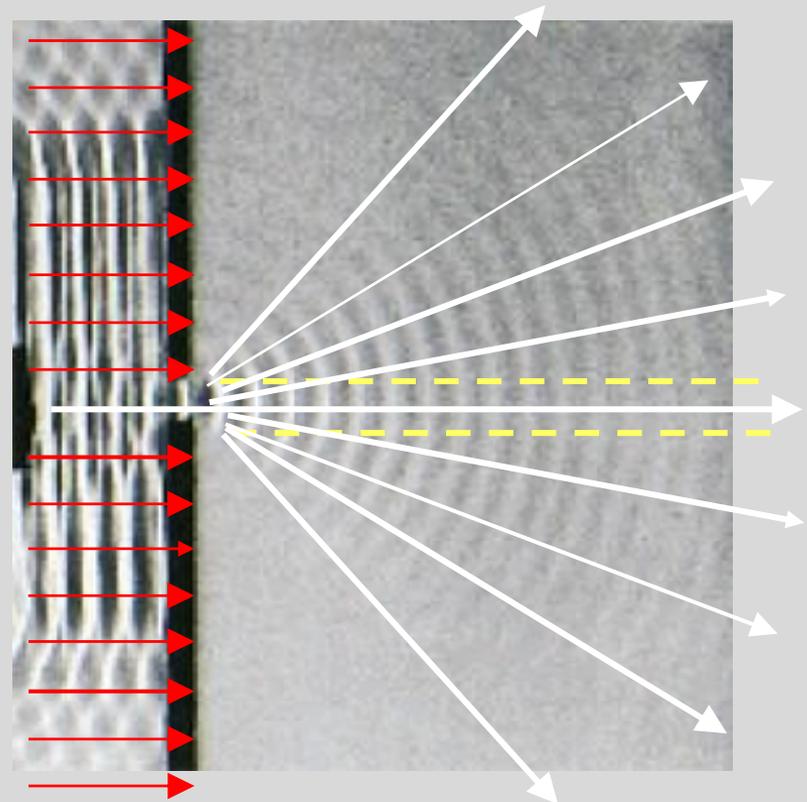
Comportamiento de la luz en nuestro alrededor ... depende de las dimensiones de los objetos..?



- La magnitud del fenómeno de la difracción depende de la **relación entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo o abertura**.
- Si la longitud de onda es pequeña en relación con la abertura entonces la difracción es pequeña.
- En cambio si la longitud de onda tiene las dimensiones de la abertura, los efectos de la difracción son grandes.

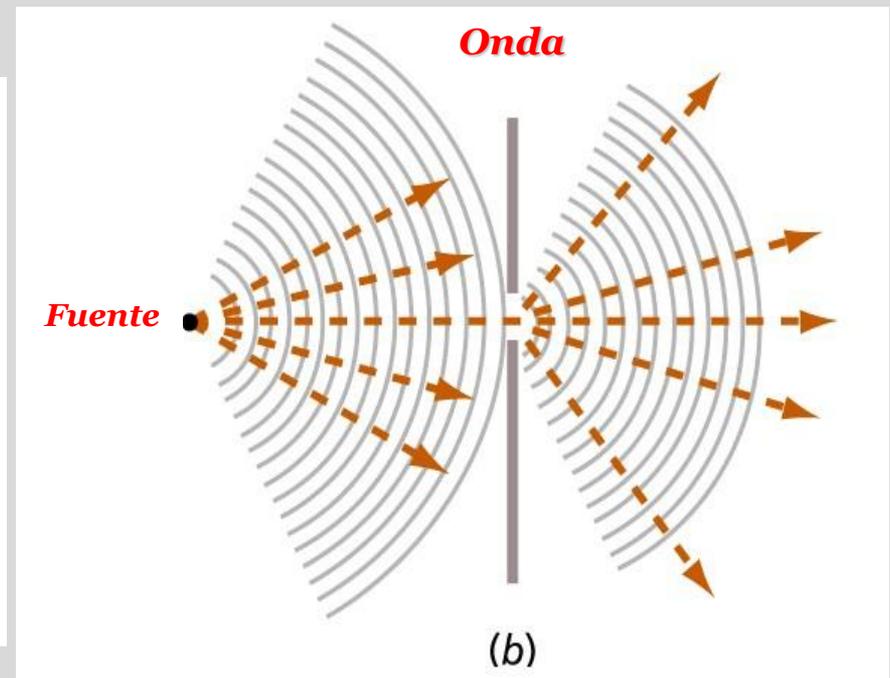
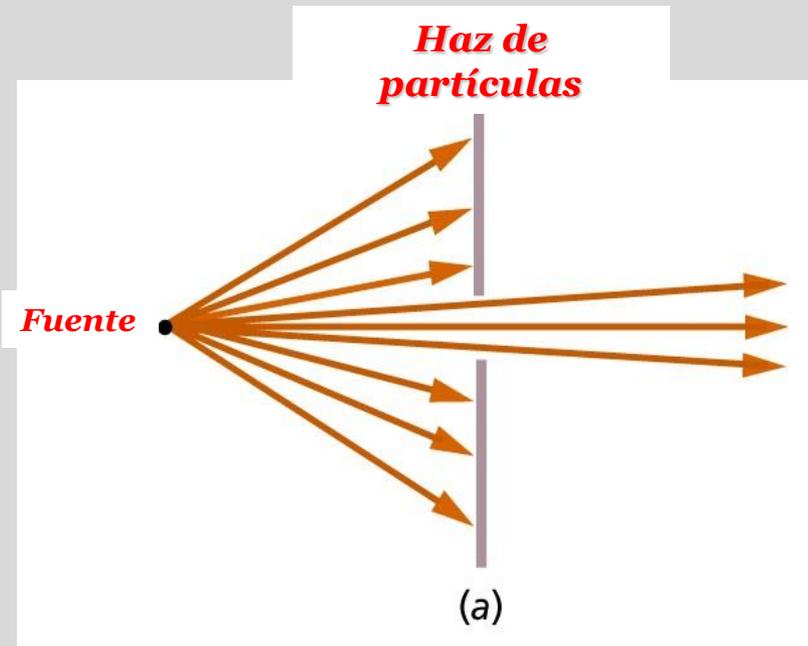


$\lambda \ll \text{tamaño abertura}$



$\lambda \approx \text{tamaño abertura}$

- Cuando un **haz de partículas** incide sobre una abertura con un obstáculo, estas partículas son detenidas por la barrera o pasan sin cambiar de dirección.
- Sin embargo cuando una **onda** encuentra un obstáculo tiende a rodearlo. Si una onda encuentra una barrera con una pequeña abertura se extiende alrededor del obstáculo en forma de onda esférica o circular. A este comportamiento se le denomina **difracción**.



http://www.colorado.edu/physics/2000/schroedinger/small_interference.html

Óptica geométrica y óptica física

- **¿Qué se entiende por Óptica Geométrica y Óptica Física?**

- La Óptica Geométrica no tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz y la representa o considera como un haz de rayos.

- La Óptica Física tiene en cuenta el carácter ondulatorio de la luz y es necesaria para explicar fenómenos como son las interferencias y la difracción de la luz.

La Óptica Geométrica es una aproximación válida siempre que la longitud de onda de la luz es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos o discontinuidades a través de los cuales se propaga.

$$\lambda \ll d$$

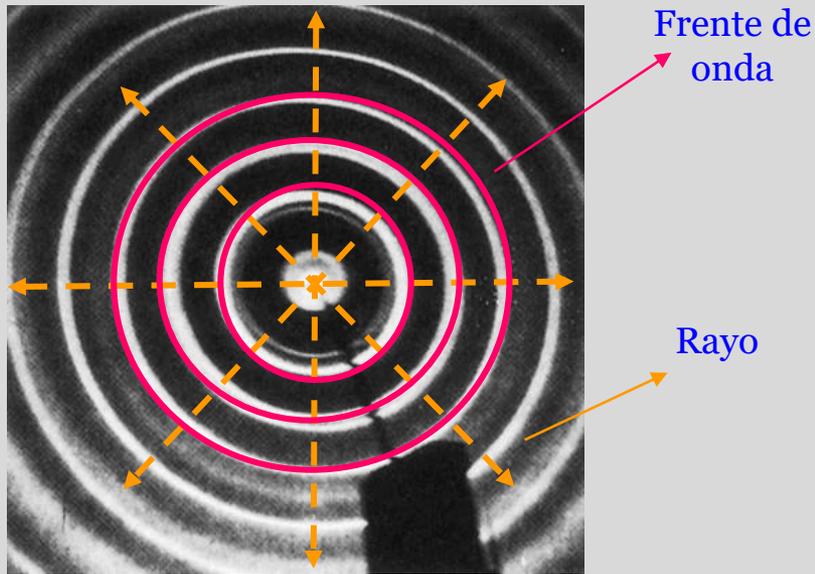
Ejemplo:

Si un haz de luz roja incide en un objeto (barrera) de 1 cm

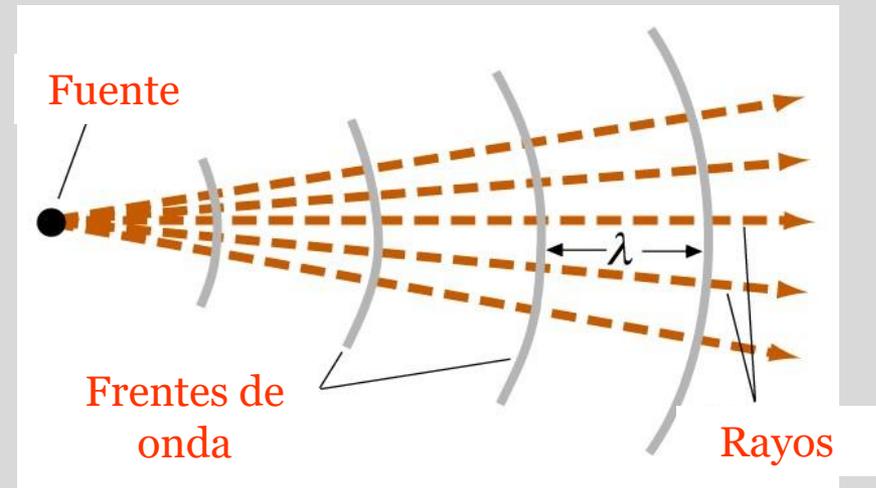
$$\lambda = 700\text{nm} = 0.7 \text{ micras} = 7 \times 10^{-3} \ll \text{que } 1 \text{ cm}$$

Frentes de onda y Aproximación del rayo

Se denomina **superficie o frente de onda** al lugar geométrico determinado por los puntos del medio que son alcanzados simultáneamente por la onda y que en consecuencia en cualquier instante dado están en el mismo estado o fase de la perturbación.



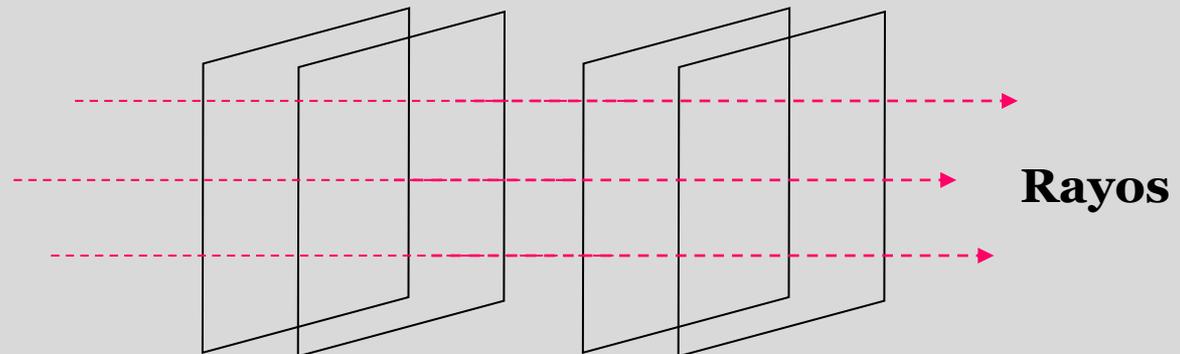
Onda en la superficie de un líquido



- La dirección de propagación de la perturbación es perpendicular al frente de onda. Una línea perpendicular a los frentes de onda, que indica la dirección y sentido de propagación de la perturbación, se denomina *rayo*.

Los frentes de onda pueden tener formas muy diversas:

Si las ondas se propagan en una sola dirección los frentes de onda serían planos paralelos y la perturbación se denomina como una **onda plana**.



**Ondas
plana**

- Las **ondas circulares** son ondas bidimensionales que se propagan sobre una superficie, en la que se produce una perturbación en un punto que da lugar a frentes de onda circulares.

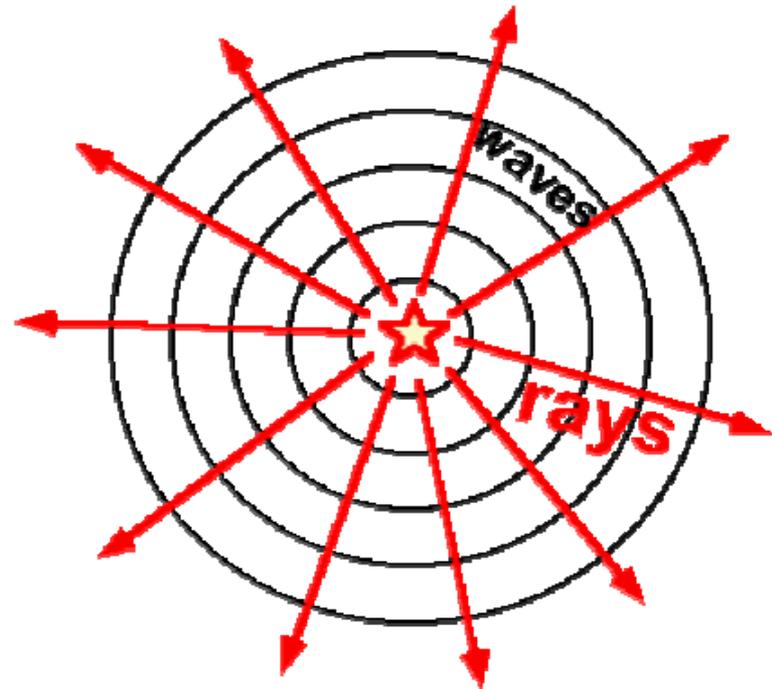
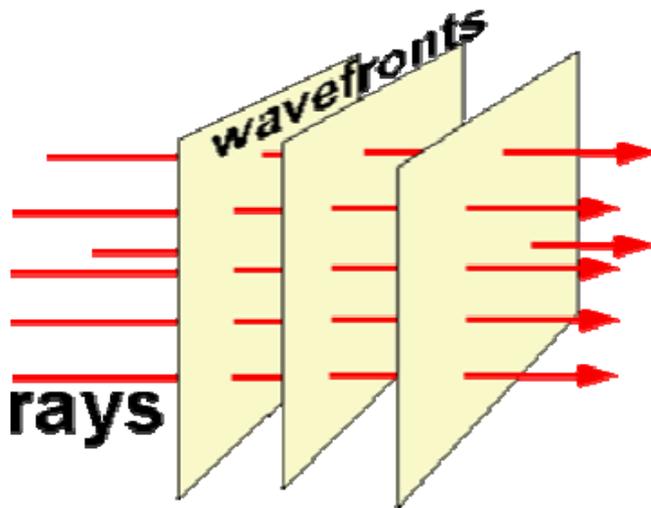


Onda circular

Aproximación del rayo

En la aproximación del rayo, asumimos que una onda que se mueve con un medio viaja en una línea recta en la dirección de sus rayos

The direction of travel of the electromagnetic wave (propagation direction) is the ray direction.



Dado que en la **Óptica Geométrica** no tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz y la representa o considera como un haz de rayos.

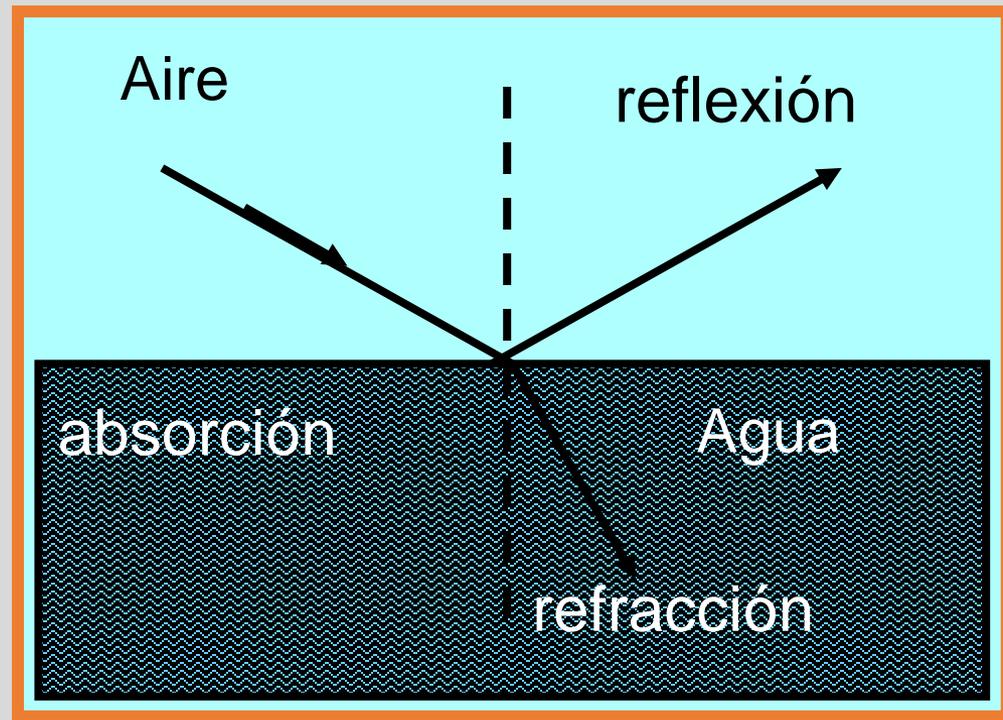
Se considera que como los **Principios de la Óptica Geométrica:**

- Trayectorias rectilíneas en medios homogéneos e isótropos.
- Se cumple la ley de la reflexión
- Se cumple la ley de la refracción
- Rayo incidente, refractado y reflejado están en un mismo plano.
- Las trayectorias de la luz son reversibles.

En el estudio de cómo se comporta la luz, es útil usar “rayos de luz” y el hecho de que la luz viaja en líneas rectas.

Cuando la luz viaja en línea recta, como se comporta cuando incide en la frontera entre dos medios, pueden ocurrir tres cosas:

- Reflexión (interface opaca)
- Refracción (interface transparente)
- Absorción

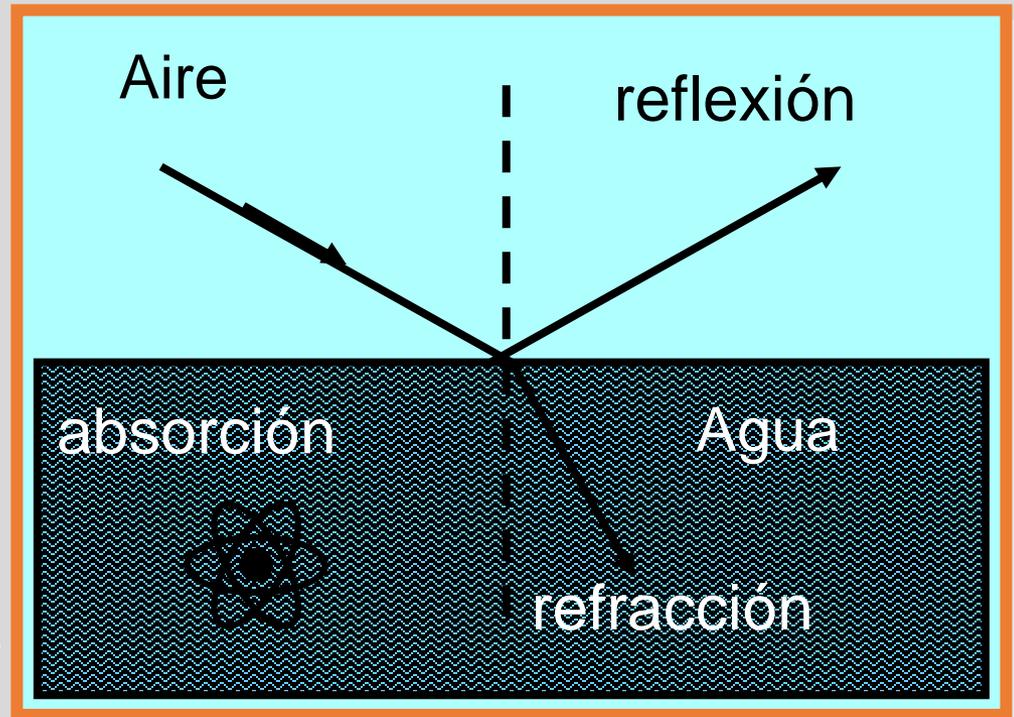


Reflexión, refracción y absorción

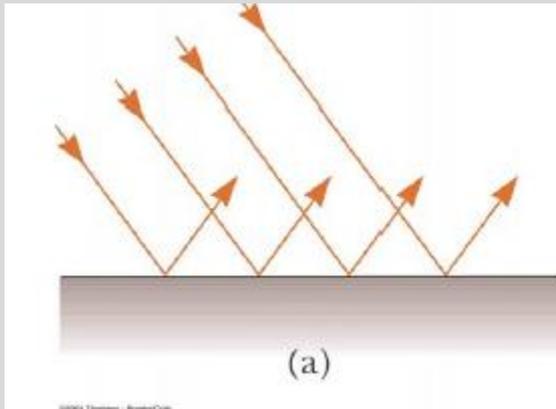
Reflexión: Un rayo desde el aire golpea el agua y regresa al aire.

Refracción: Un rayo se dobla en el agua hacia la línea normal.

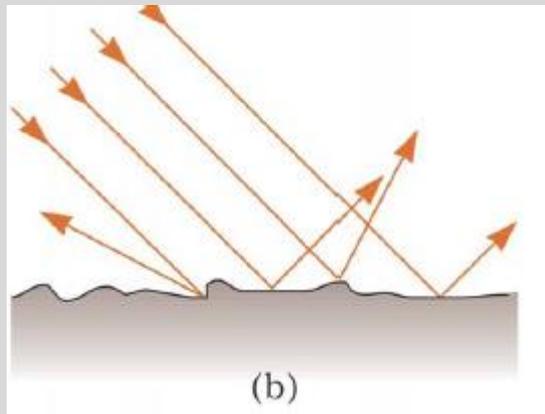
Absorción: Un rayo se absorbe atómicamente en el agua y no reaparece.



Reflexión: Cuando un rayo que viaja en un medio encuentra un límite con otro medio, la parte de la luz del incidente se refleja

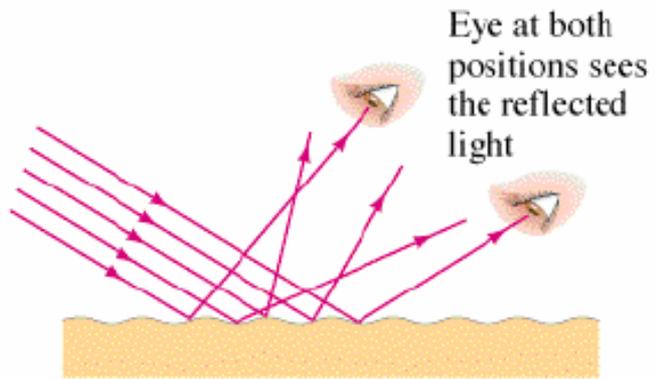


Reflexión Especular: Reflexión de la luz de una superficie lisa, cuando los rayos reflejados están paralelos

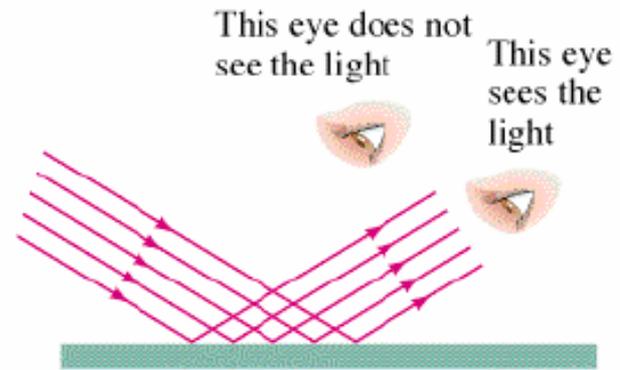


Reflexión difusa: Reflexión de cualquier superficie áspera, adonde los rayos reflejados viajan en direcciones al azar.

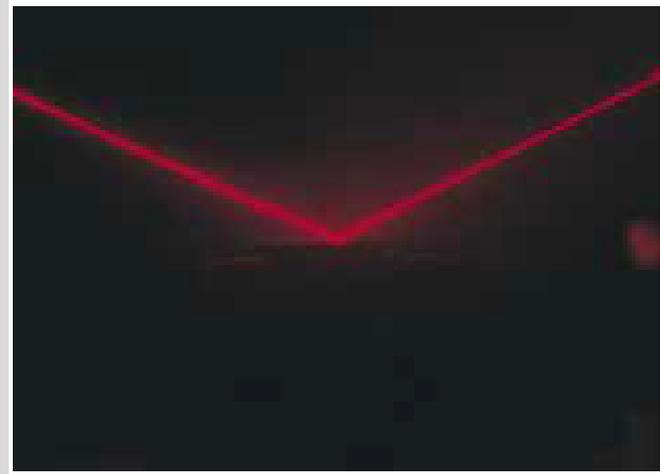
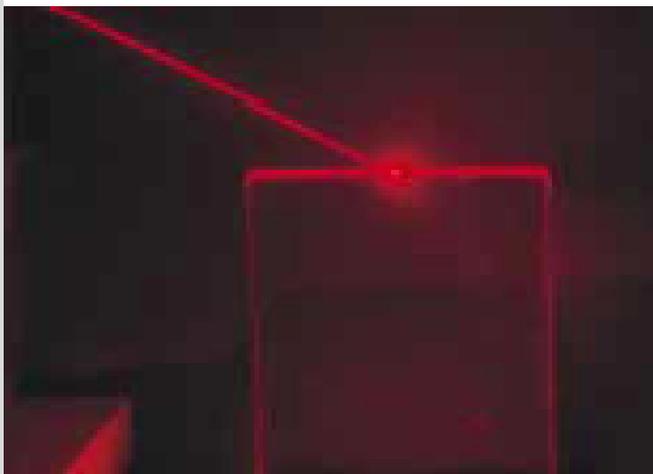
NOTA: utilizamos el termino de reflexión como sinónimo de reflexión especular



Diffusive reflection



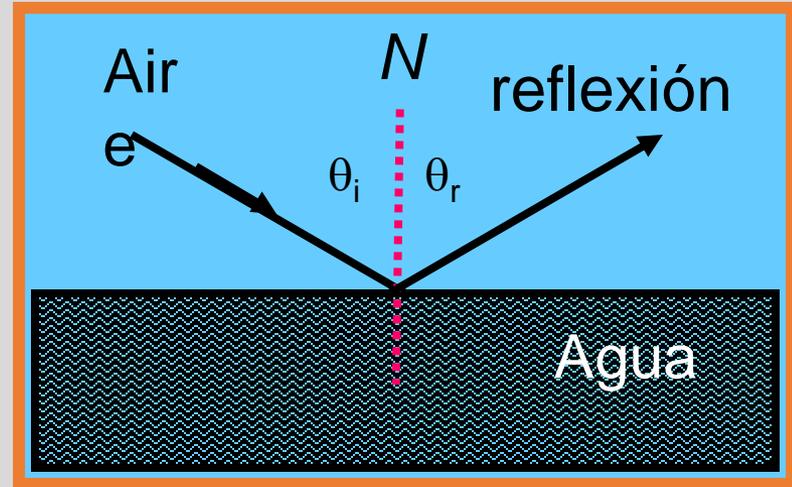
Specular reflection



Leyes de la reflexión

1. El ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflexión θ_r :

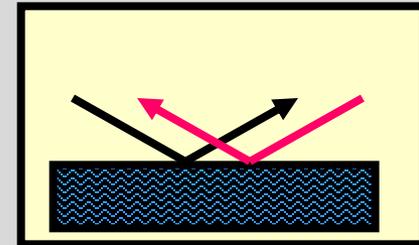
$$\theta_i = \theta_r$$



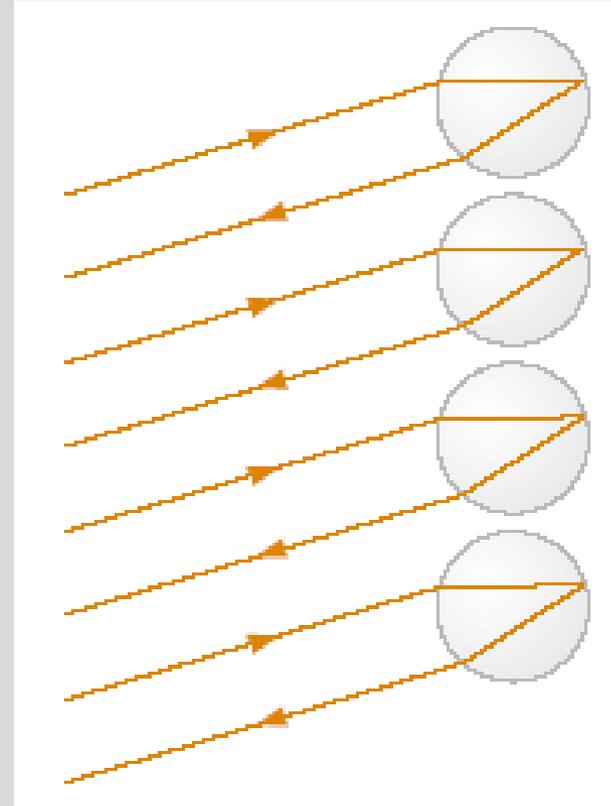
Todos los ángulos de los rayos se miden con respecto a la normal N .

2. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal N están todos en el mismo plano.

3. Los rayos son completamente reversibles.



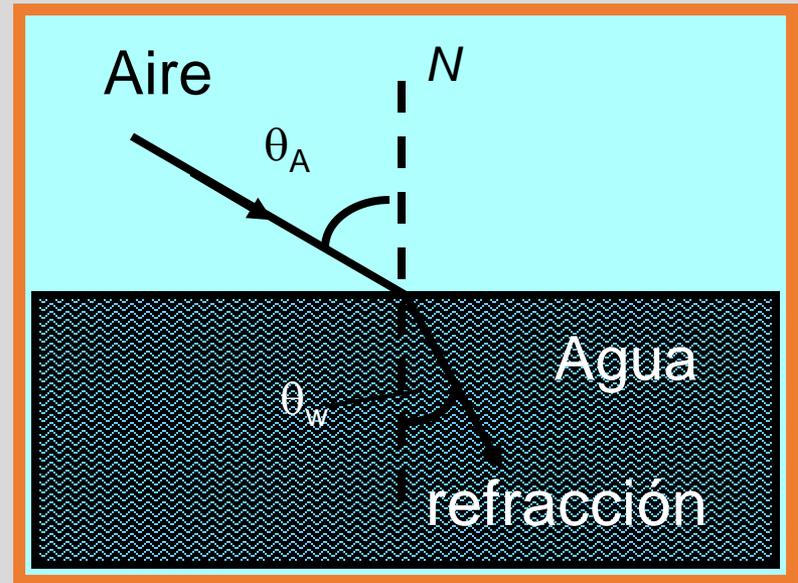
Aplicaciones: retroreflexión



Refracción

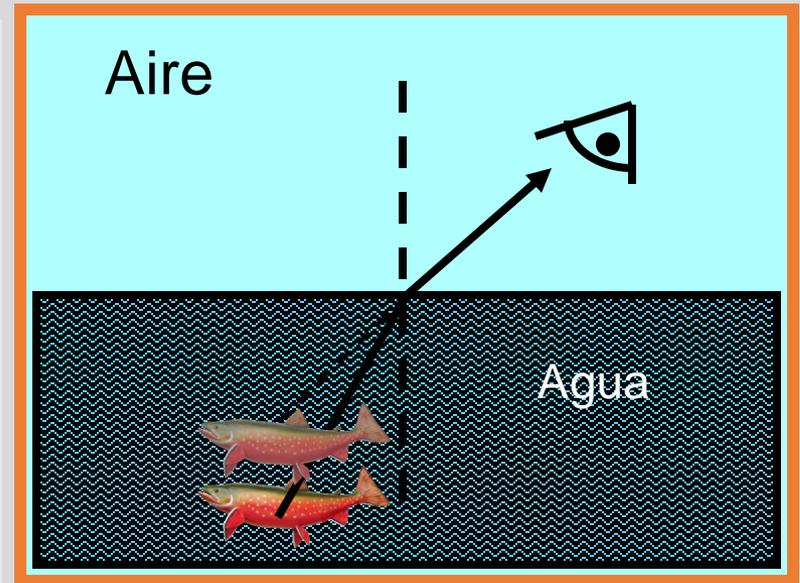
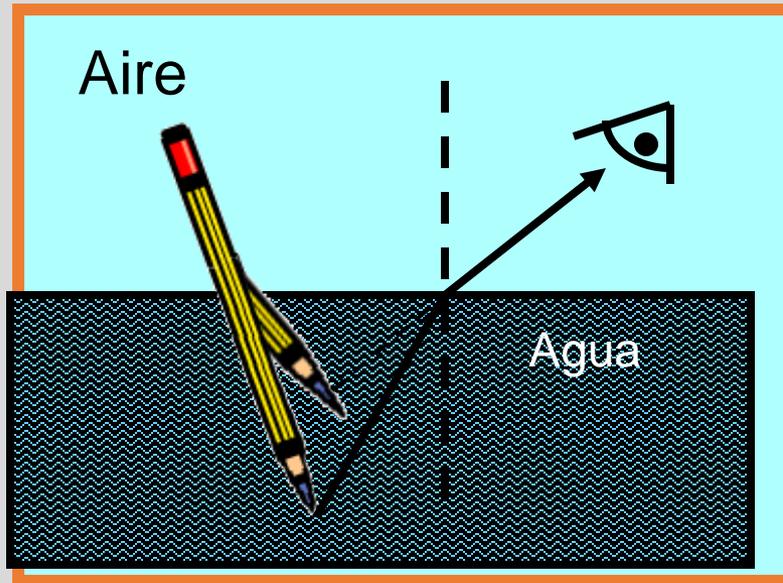
Refracción es la desviación de la luz conforme pasa de un medio a otro.

Nota: el ángulo de incidencia θ_A en aire y el ángulo de refracción θ_w en agua se miden cada uno con la normal N .



Los rayos incidente y refractado se encuentran en el mismo plano y son reversibles.

Refracción distorsiona la visión



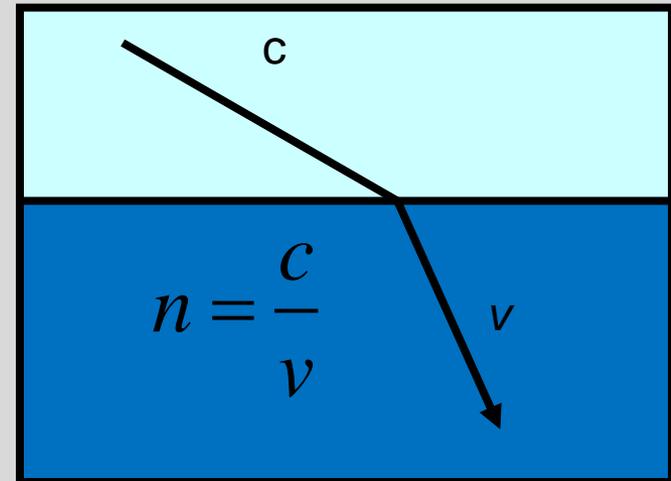
El ojo, creyendo que la luz viaja en línea recta, ve los objetos más cerca de la superficie debido a refracción. Tales distorsiones son comunes.

El índice de refracción

El índice de refracción para un material es la razón de la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s) a la velocidad a través del material.

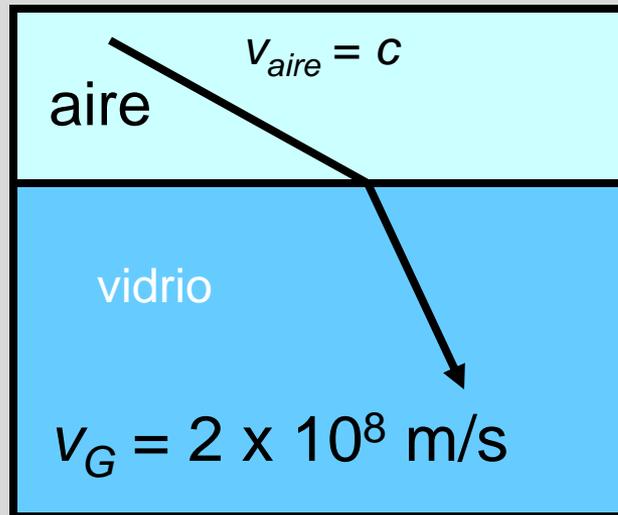
Índice de refracción

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



Ejemplos: aire $n = 1$; vidrio $n = 1.5$; agua $n = 1.33$

Ejemplo 1. La luz viaja de aire ($n = 1$) a vidrio, donde su velocidad se reduce a sólo 2×10^8 m/s. ¿Cuál es el índice de refracción del vidrio?

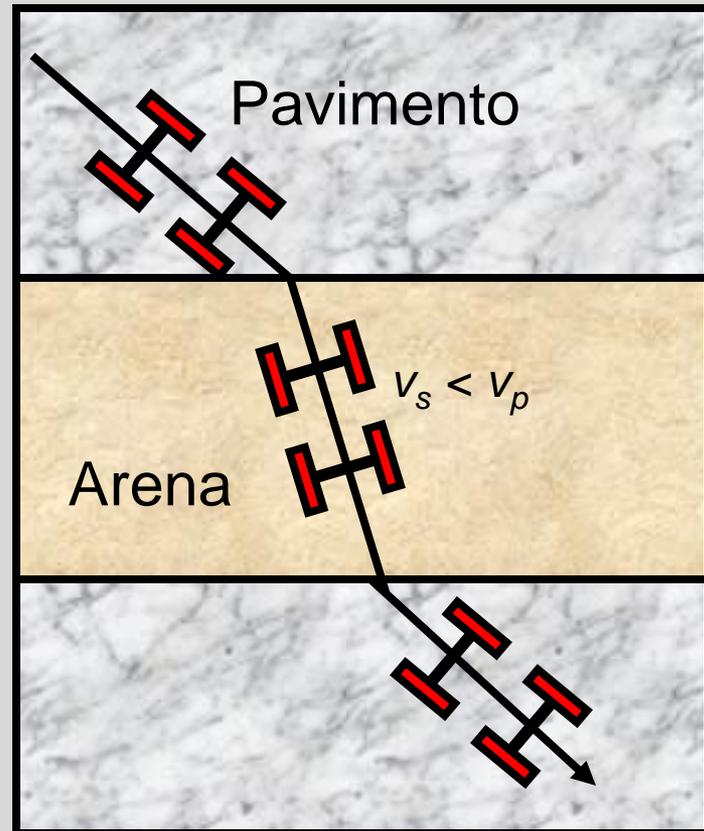
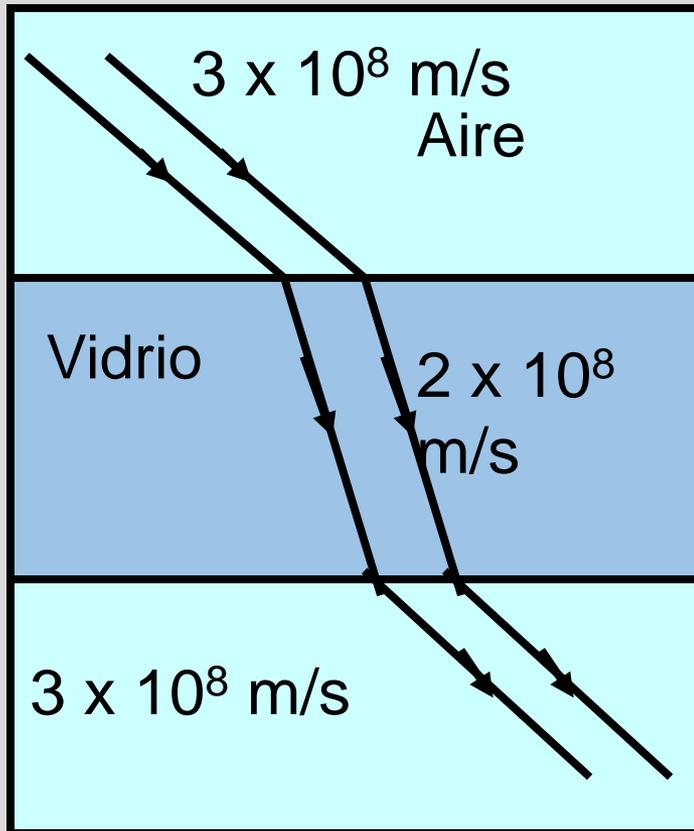


$$n = \frac{c}{v} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 10^8 \text{ m/s}}$$

Para vidrio: $n = 1.50$

Si el medio fuese agua: $n_W = 1.33$. Entonces debe demostrar que la velocidad en el agua se reduciría de c a 2.26×10^8 m/s.

Analogía para refracción

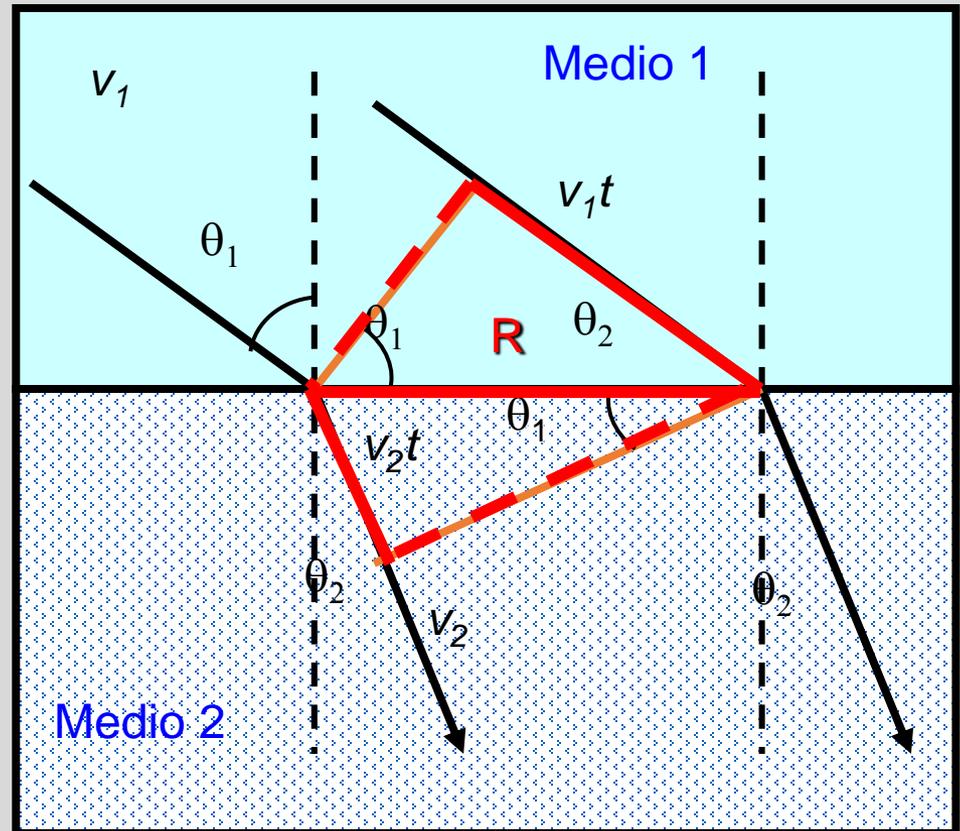


La luz se desvía en el vidrio y luego regresa a lo largo de la trayectoria original en forma muy parecida a como lo haría un eje rodante cuando encuentra una franja de lodo.

Derivación de la ley de Snell

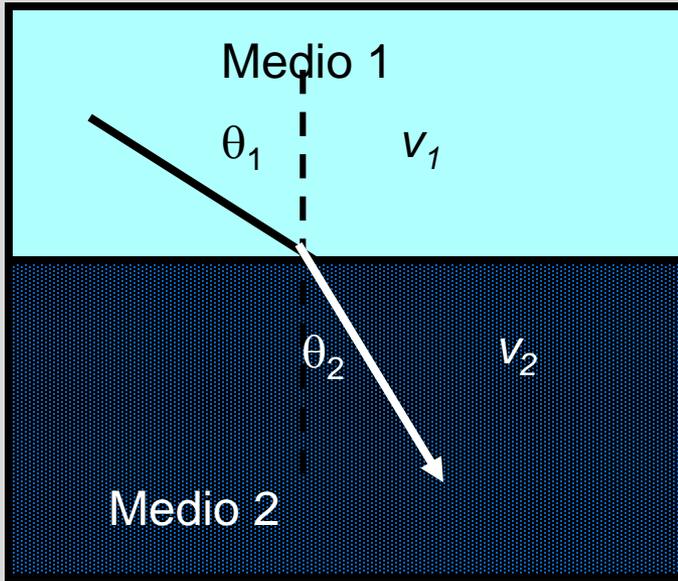
Considere dos rayos de luz cuyas velocidades son v_1 en el medio 1 y v_2 en el medio 2.

El segmento **R** es la hipotenusa común a dos triángulos rectos. Verifique con geometría los ángulos mostrados.



$$\sin \theta_1 = \frac{v_1 t}{R}; \quad \sin \theta_2 = \frac{v_2 t}{R} \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1 t / R}{v_2 t / R} = \frac{v_1}{v_2}$$

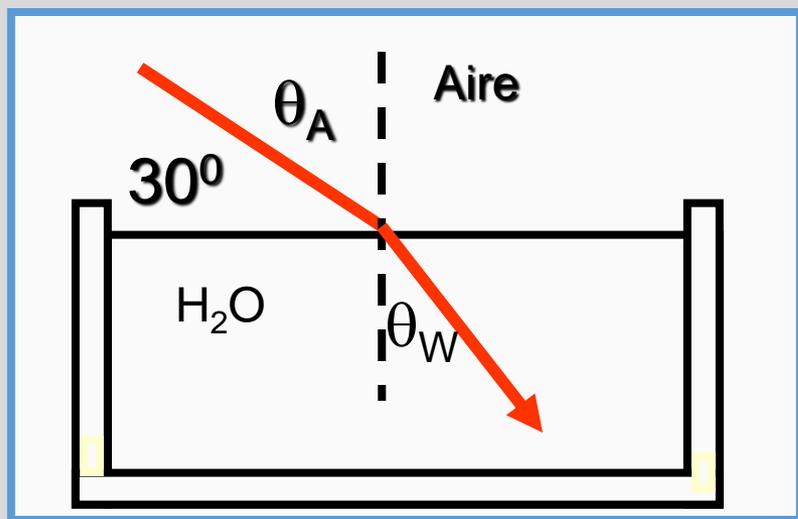
Ley de Snell



La razón del seno del ángulo de incidencia θ_1 al seno del ángulo de refracción θ_2 es igual a la razón de la velocidad incidente v_1 a la velocidad refractada v_2 .

Ley de Snell:
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ejemplo 2: Un haz láser en un cuarto oscuro golpea la superficie del agua a un ángulo de 30° . La velocidad en el agua es 2.26×10^8 m/s. ¿Cuál es el ángulo de refracción?



El ángulo incidente es:

$$\theta_A = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$$

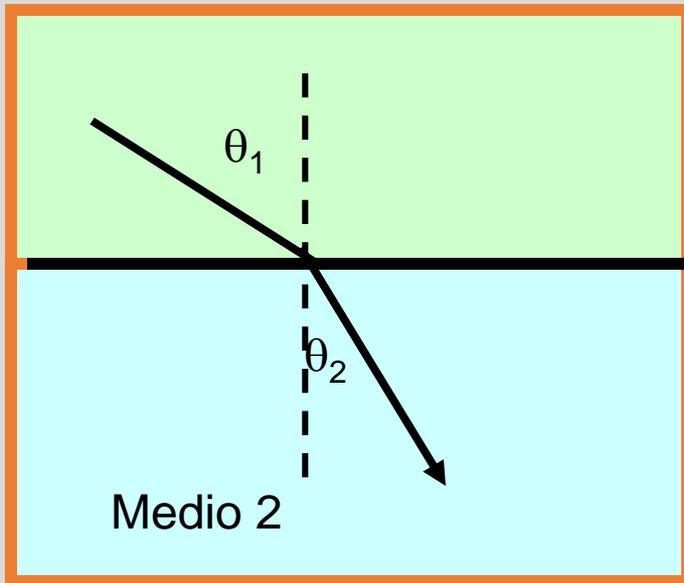
$$\frac{\text{sen } \theta_A}{\text{sen } \theta_W} = \frac{v_A}{v_W}$$

$$\text{sen } \theta_W = \frac{v_W \text{ sen } \theta_A}{v_A} = \frac{(2 \times 10^8 \text{ m/s}) \text{ sen } 60^\circ}{3 \times 10^8 \text{ m/s}}$$

$$\theta_W = 35.3^\circ$$

Ley de Snell e índice de refracción

Otra forma de la ley de Snell se puede derivar de la definición del índice de refracción:



$$n = \frac{c}{v} \quad \text{de donde} \quad v = \frac{c}{n}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}; \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Ley de Snell para velocidades e índices:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

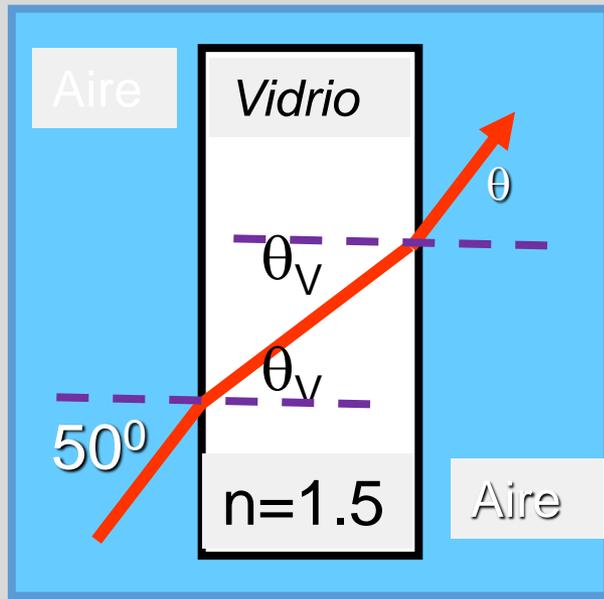
Forma simplificada de la ley

Dado que usualmente están disponibles los índices de refracción para muchas sustancias comunes, con frecuencia la ley de Snell se escribe de la forma siguiente:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \longrightarrow \quad n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

El producto del índice de refracción y el seno del ángulo es el mismo en el medio refractado y en el medio incidente.

Ejemplo 3. La luz viaja a través de un bloque de vidrio y luego sale nuevamente al aire. Encuentre el ángulo de salida con la información dada.



De la geometría, note que el ángulo θ_v es igual para la siguiente interfaz.

Primero encuentre θ_v dentro del vidrio:

$$n_A \sin \theta_A = n_V \sin \theta_V$$

$$\sin \theta_V = \frac{n_A \sin \theta_A}{n_V} = \frac{(1.0) \sin 50^\circ}{1.50}$$

$$\theta_V = 30.7^\circ$$

Aplique a cada interfaz:

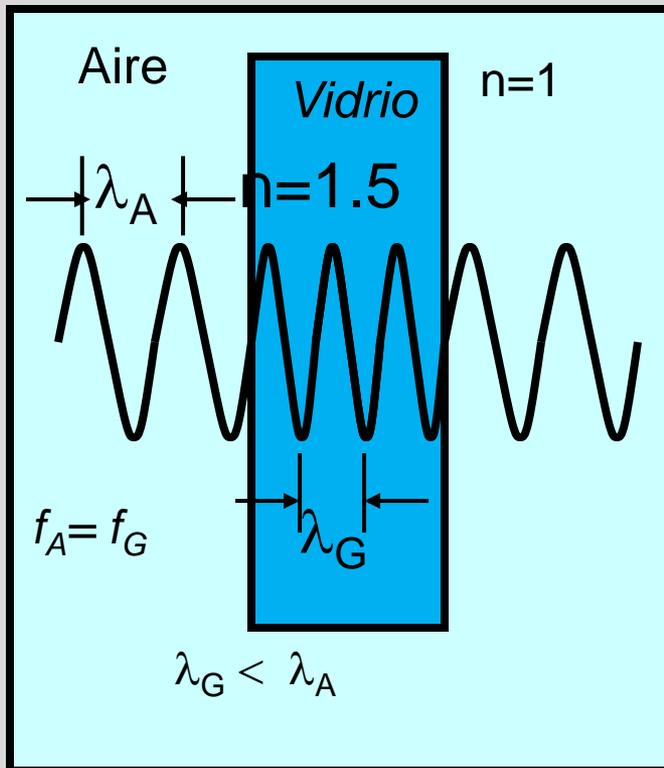
$$n_A \sin \theta_A = n_G \sin \theta_G = n_A \sin \theta_A$$

$$\theta_s = 50^\circ$$

¡Igual que el ángulo de entrada!

Longitud de onda y refracción

La energía de la luz se determina por la frecuencia de las ondas EM, que permanece constante conforme la luz pasa adentro y afuera de un medio. (Recuerde: $v = f\lambda$.)



$$v_A = f_A \lambda_A; \quad v_G = f_G \lambda_G$$

$$\frac{v_A}{v_G} = \frac{f \lambda_A}{f \lambda_G}; \quad \frac{v_A}{v_G} = \frac{\lambda_A}{\lambda_G};$$

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Formas de expresar la ley de Snell:

El índice de refracción, la velocidad y la longitud de onda afectan a la refracción. En general:

Ley de Snell:

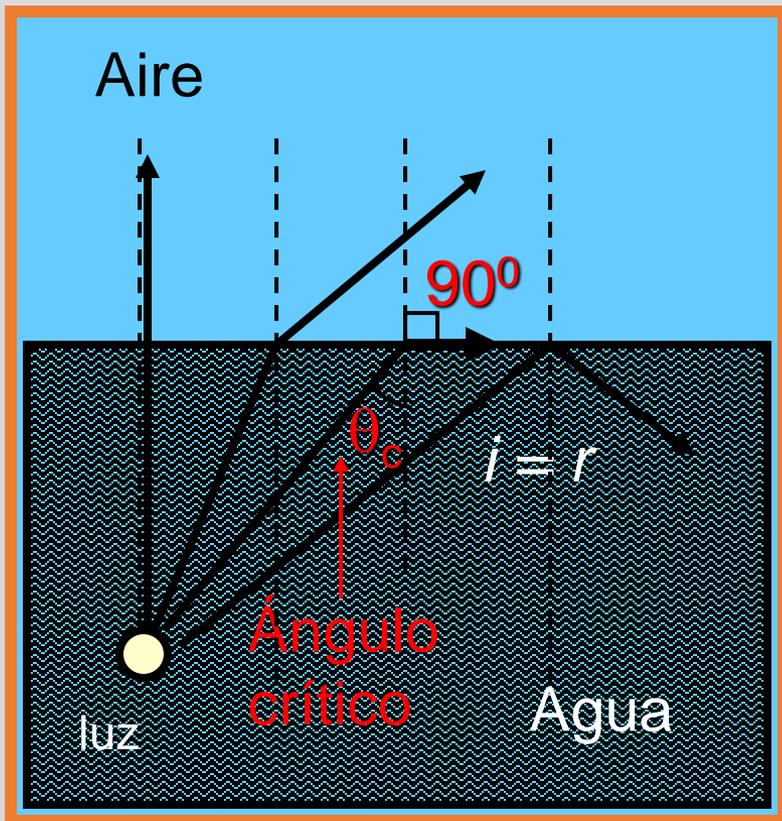
Todas las expresiones son equivalentes, pero es útil resaltar que sólo el subíndice de n tiene un orden diferente en la razón.

Indices of Refraction^a

Substance	Index of Refraction	Substance	Index of Refraction
<i>Solids at 20°C</i>		<i>Liquids at 20°C</i>	
Cubic zirconia	2.20	Benzene	1.501
Diamond (C)	2.419	Carbon disulfide	1.628
Fluorite (CaF ₂)	1.434	Carbon tetrachloride	1.461
Fused quartz (SiO ₂)	1.458	Ethyl alcohol	1.361
Gallium phosphide	3.50	Glycerin	1.473
Glass, crown	1.52	Water	1.333
Glass, flint	1.66		
Ice (H ₂ O)	1.309	<i>Gases at 0°C, 1 atm</i>	
Polystyrene	1.49	Air	1.000 293
Sodium chloride (NaCl)	1.544	Carbon dioxide	1.000 45

Reflexión interna total

Cuando la luz pasa en un ángulo de un medio de mayor índice a uno de menor índice, el rayo saliente se dobla alejándose de la normal.



Cuando el ángulo llega a cierto máximo, se reflejará internamente.

El **ángulo crítico** θ_c es el ángulo límite de incidencia en un medio más denso que resulta en un ángulo de refracción igual a 90° .

Ejemplo 5. Encuentre el ángulo de incidencia crítico de agua a aire.

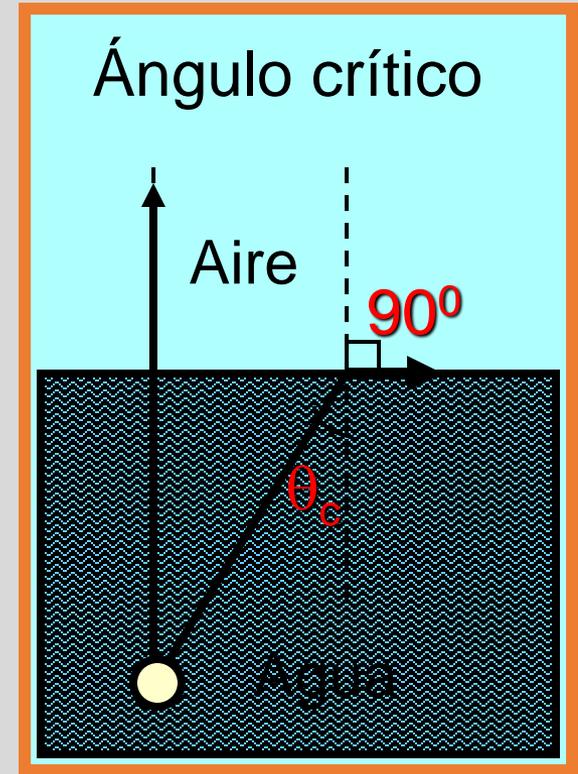
Para ángulo crítico, $\theta_A = 90^\circ$

$$n_A = 1.0; n_W = 1.33$$

$$n_W \sin \theta_C = n_A \sin \theta_A$$

$$\sin \theta_C = \frac{n_A \sin 90^\circ}{n_W} = \frac{(1)(1)}{1.33}$$

$$\text{Ángulo crítico: } \theta_c = 48.8^\circ$$



En general, para medios donde $n_1 > n_2$ se tiene que:

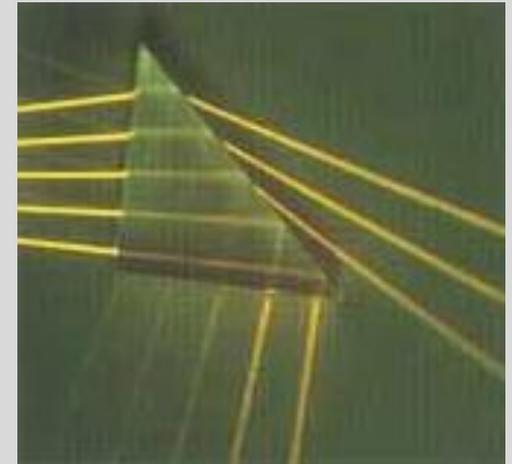
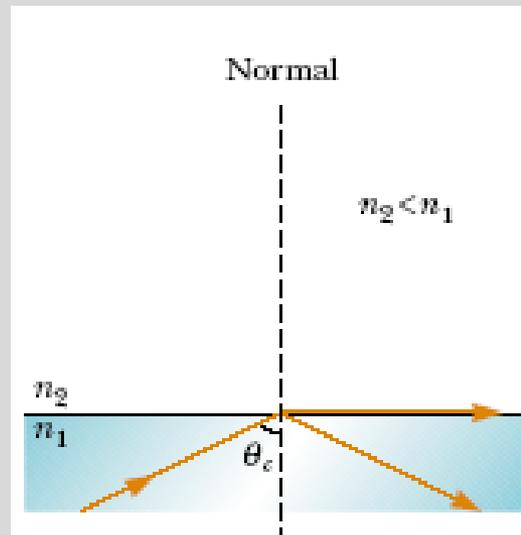
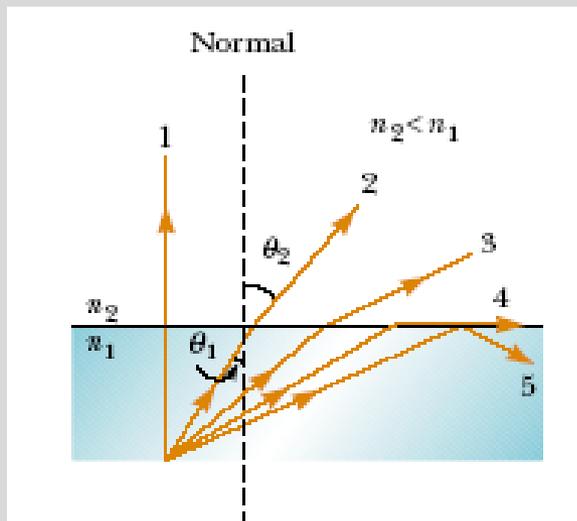
$$\sin \theta_c = \frac{n_1}{n_2}$$

Reflexión Total Interna

Cuando $n_2 < n_1$ hay un cierto ángulo de incidencia θ_i para el cual el ángulo de refracción θ_r es $\pi/2$. A este ángulo de incidencia se le llama *ángulo crítico* θ_c . Así si el *ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico*, solo habrá onda reflejada y no refractada.

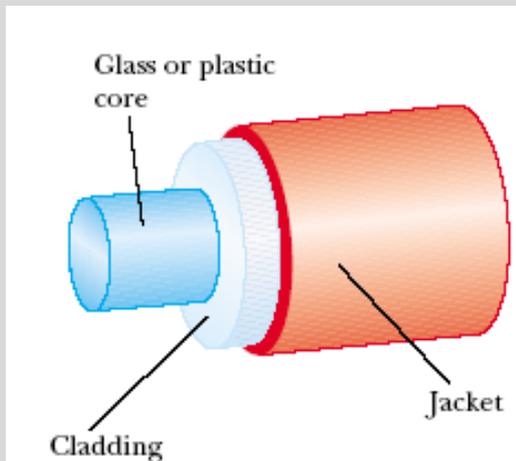
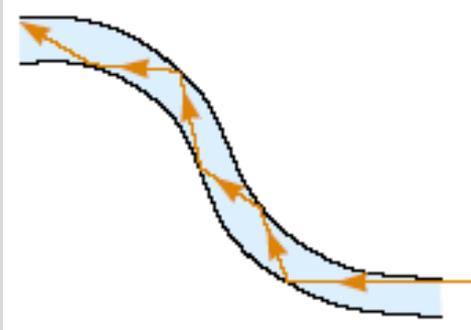
$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{for } n_1 > n_2)$$

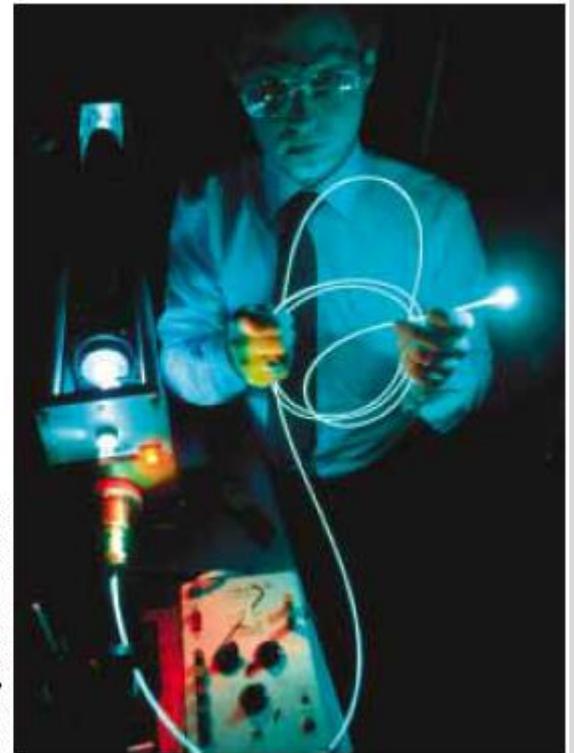




Fibras ópticas

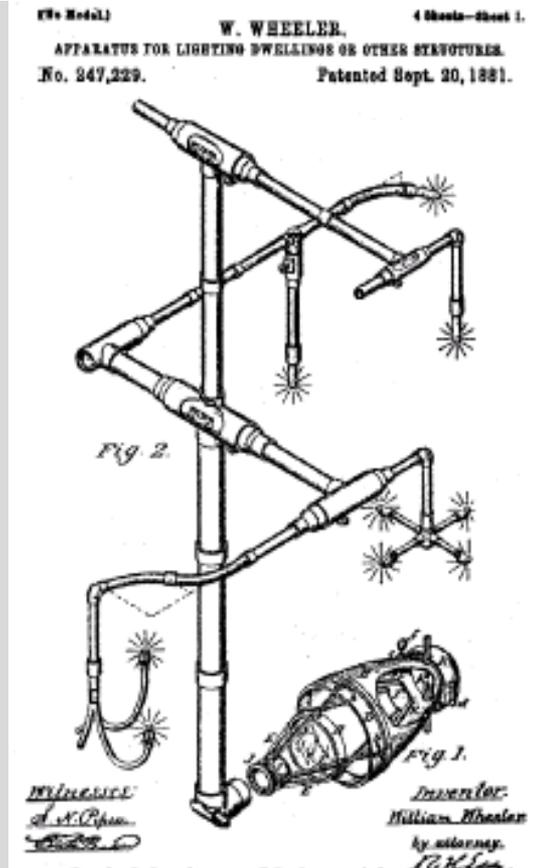


Hank Morgan/Photo Researchers, Inc.

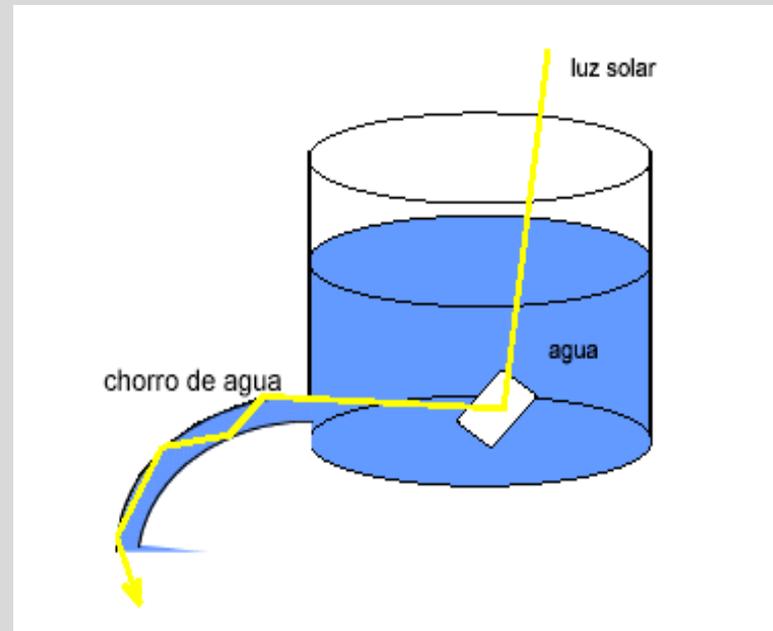


Primeros experimentos con transmisión de luz

J. Wheeler transporte de luz (1880)



1870, John Tyndall



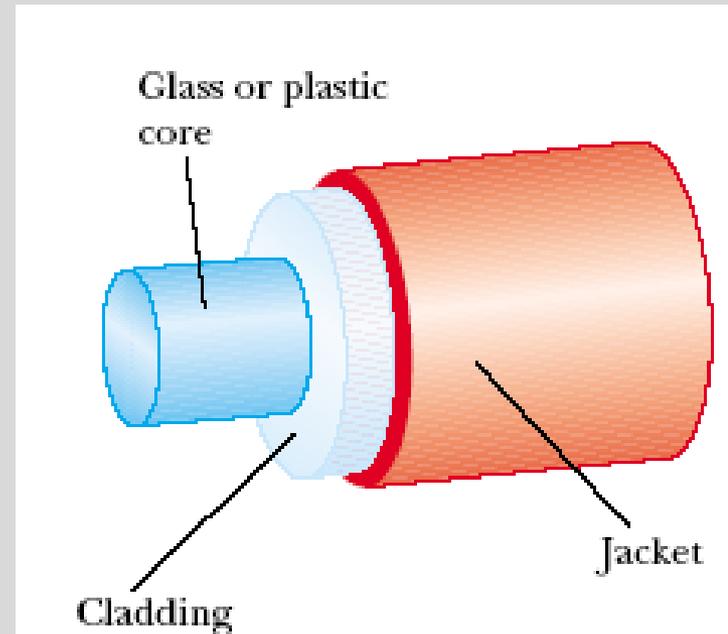
Composición básica de una fibra óptica

La fibra óptica básica esta compuesto de tres capas concéntricas que difieren en propiedades:

Núcleo (Core): *La parte interna que conduce la luz.*

Revestimiento (Cladding): *la capa media que sirve para con-finar la luz en el centro.*

Buffer ó Recubrimiento: *la capa exterior que sirve como un "amortiguador" para proteger al núcleo y al cladding de algún daño.*



Las capas concéntricas de una fibra óptica incluye al núcleo que lleva la luz, el cladding y el buffer de protección

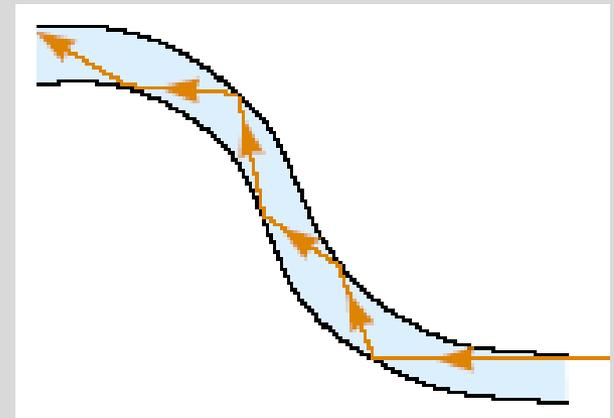
¿Como se propaga la información (luz) en la fibra óptica?

La fibra óptica está compuesta por dos capas de vidrio, cada una con distinto índice de refracción.

El índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento, razón por la cual, y debido a la diferencia de índices de refracción, la luz introducida al interior de la fibra se mantiene y propaga a través del núcleo

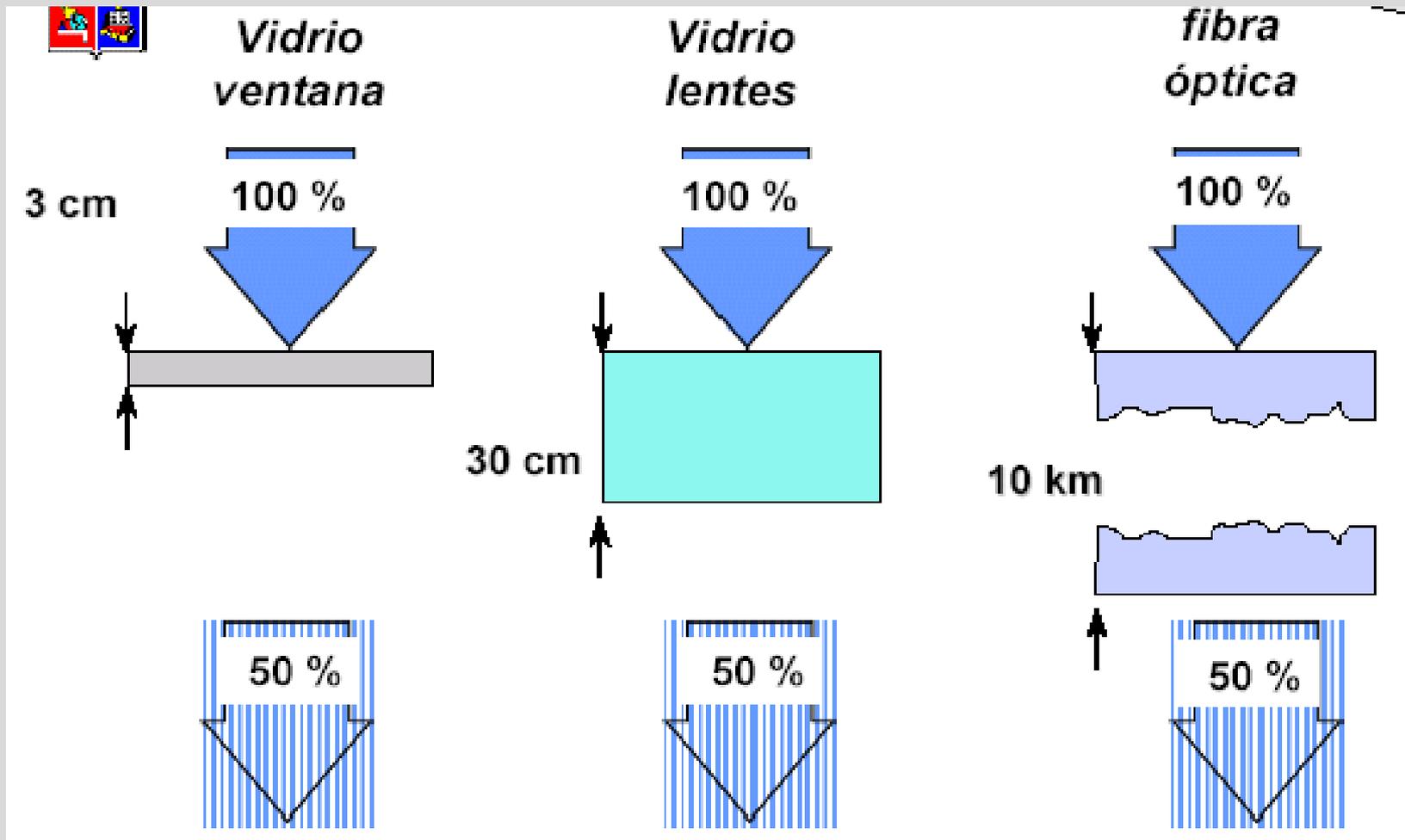
Se produce por ende el efecto denominado de **Reflexión Total**

- La luz inyectada en el núcleo choca en las interfaces nucleo-cladding con un ángulo mayor que el ángulo crítico reflejándose hacia el núcleo
- Desde que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, el rayo de luz continúa en zigzag sobre toda la longitud de la fibra.



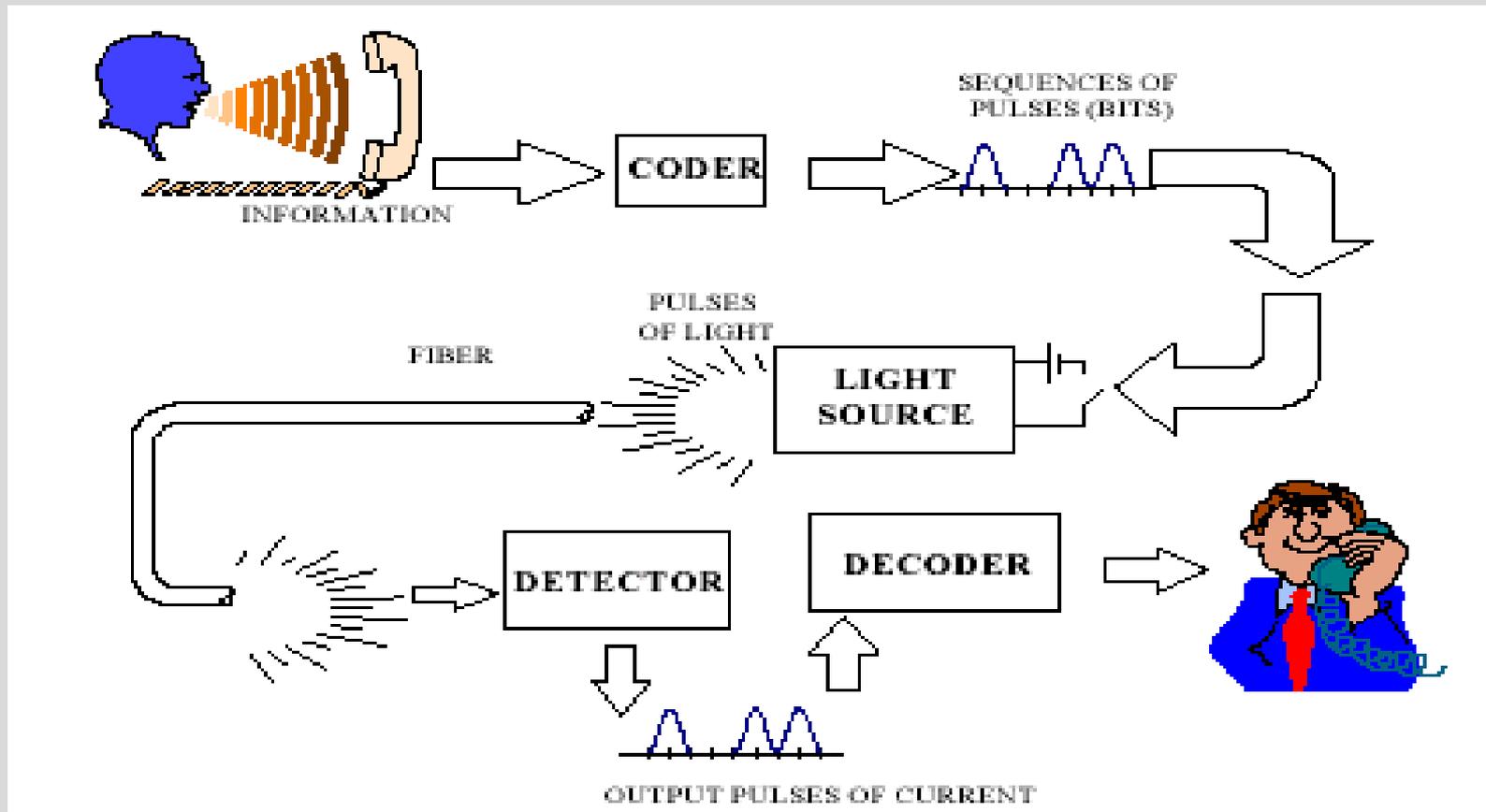
El hecho es que, hoy, la tecnología de fibra óptica supera de lejos a la del cobre, pero realmente es más fácil trabajar con ella.

Perdida de señal por longitud



La fibra óptica se usó inicialmente en las plataformas principales de las redes de Telecomunicaciones, hoy se está instalando rápidamente en las redes de distribución y ya está llegando al consumidor.

Diagrama en bloques de un sistema de comunicación por fibra óptica

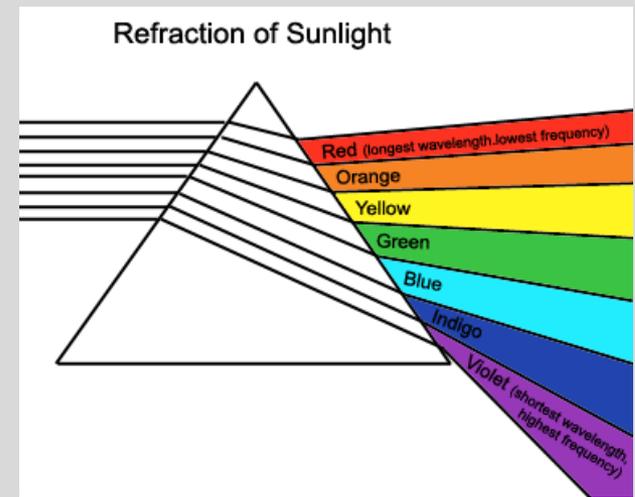


Dispersión y prismas



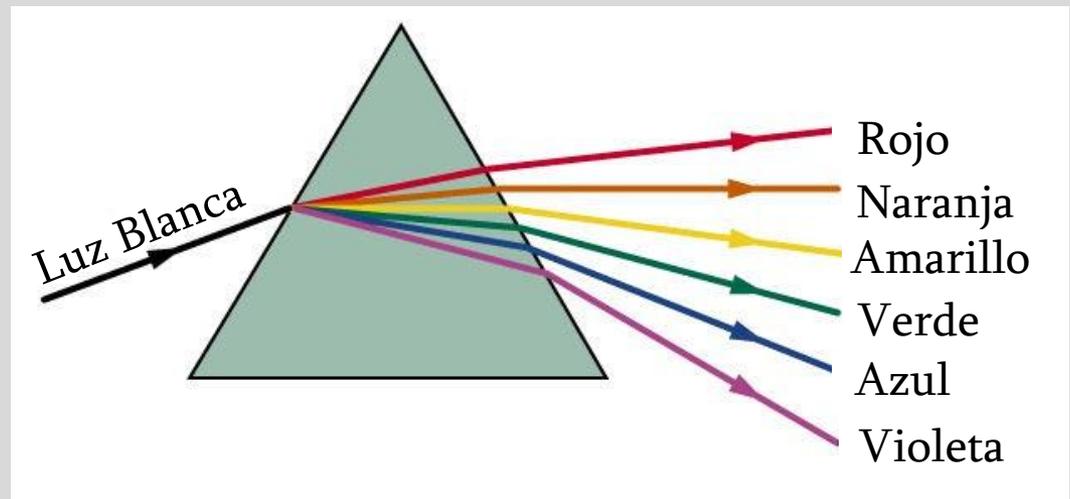
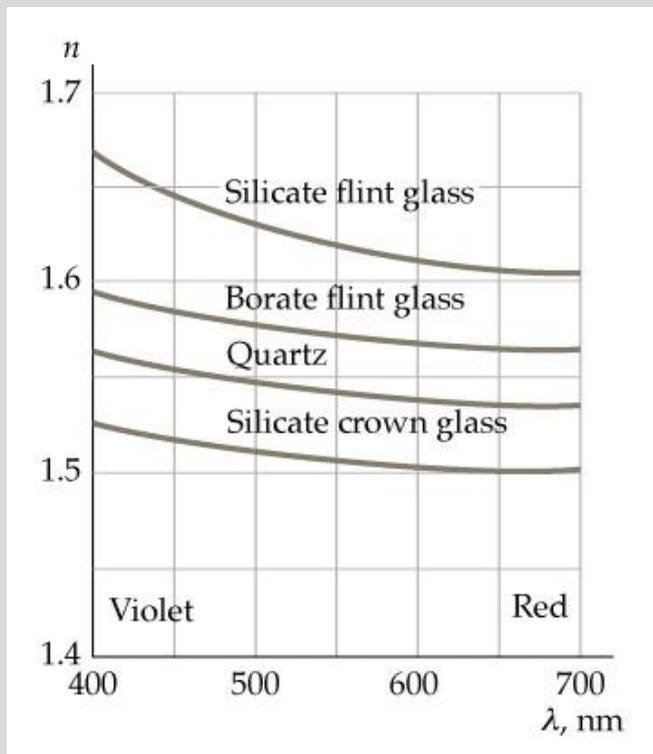
Dispersión

Estudiando el paso de la luz a través de un prisma, Newton encontró que la luz blanca estaba compuesta de varios colores. Para ello hizo un sencillo experimento en el que la luz blanca, hizo pasar a través de un prisma. Observó que la luz que emergía del otro lado del prisma estaba compuesta de rayos que tenían los colores del arco iris, es decir, todos los colores visibles. Así encontró que cada color se refracta de manera distinta a la de otro color.



Dispersión de la luz en un prisma

El índice de refracción de un material depende de la longitud de onda de la luz (λ). Para muchos materiales n disminuye a medida que aumenta λ .



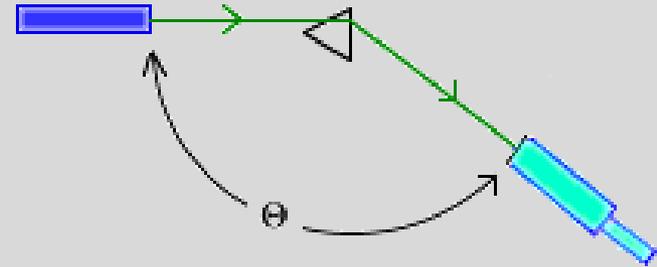
E s p e c t r ó m e t r o d e p r i s m a

El espectrómetro de prisma es un instrumento que se utiliza para estudiar las longitudes de onda emitidas por una fuente luminosa.

La luz se envía por una ranura (o colimador) hacia el prisma, al pasar a través de él esta se dispersa en un espectro.

La luz dispersada se observa con un telescopio que se puede mover, de modo que se pueden ver las diferentes imágenes formadas por las diferentes longitudes de onda.

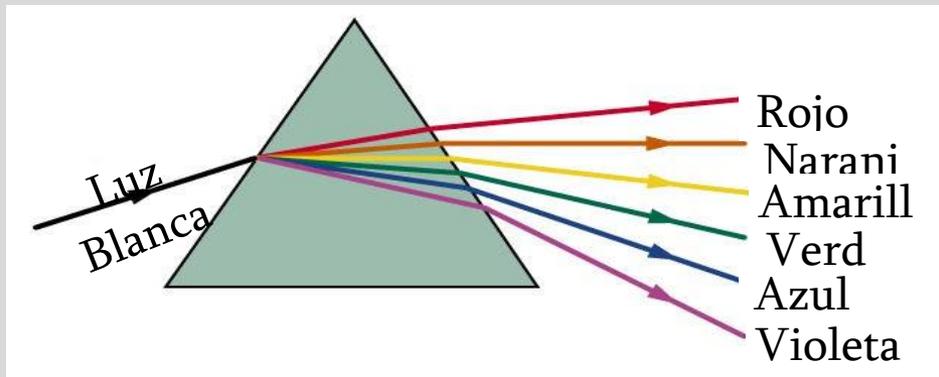
Al medir el ángulo de dispersión, y conociendo el material del prisma, se puede conocer la longitud de onda de la luz dispersada.



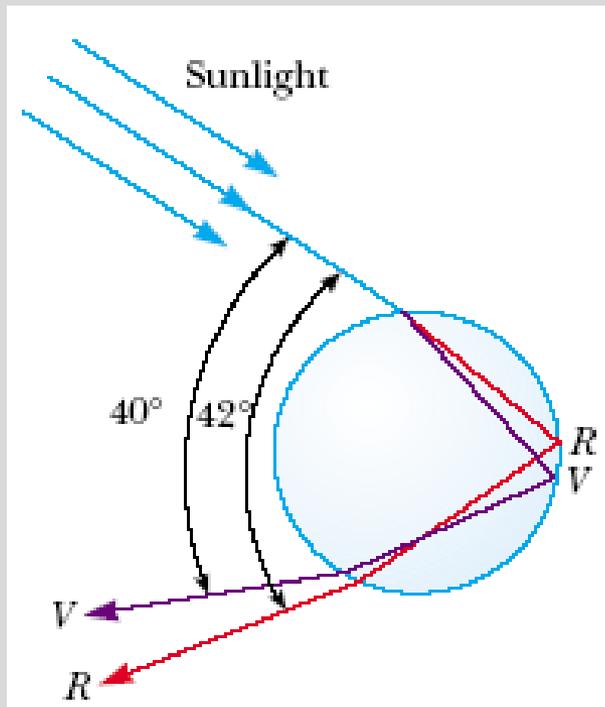
El arco iris

Un fenómeno atmosférico donde se pone de manifiesto la dispersión de la luz es la formación del arco iris.

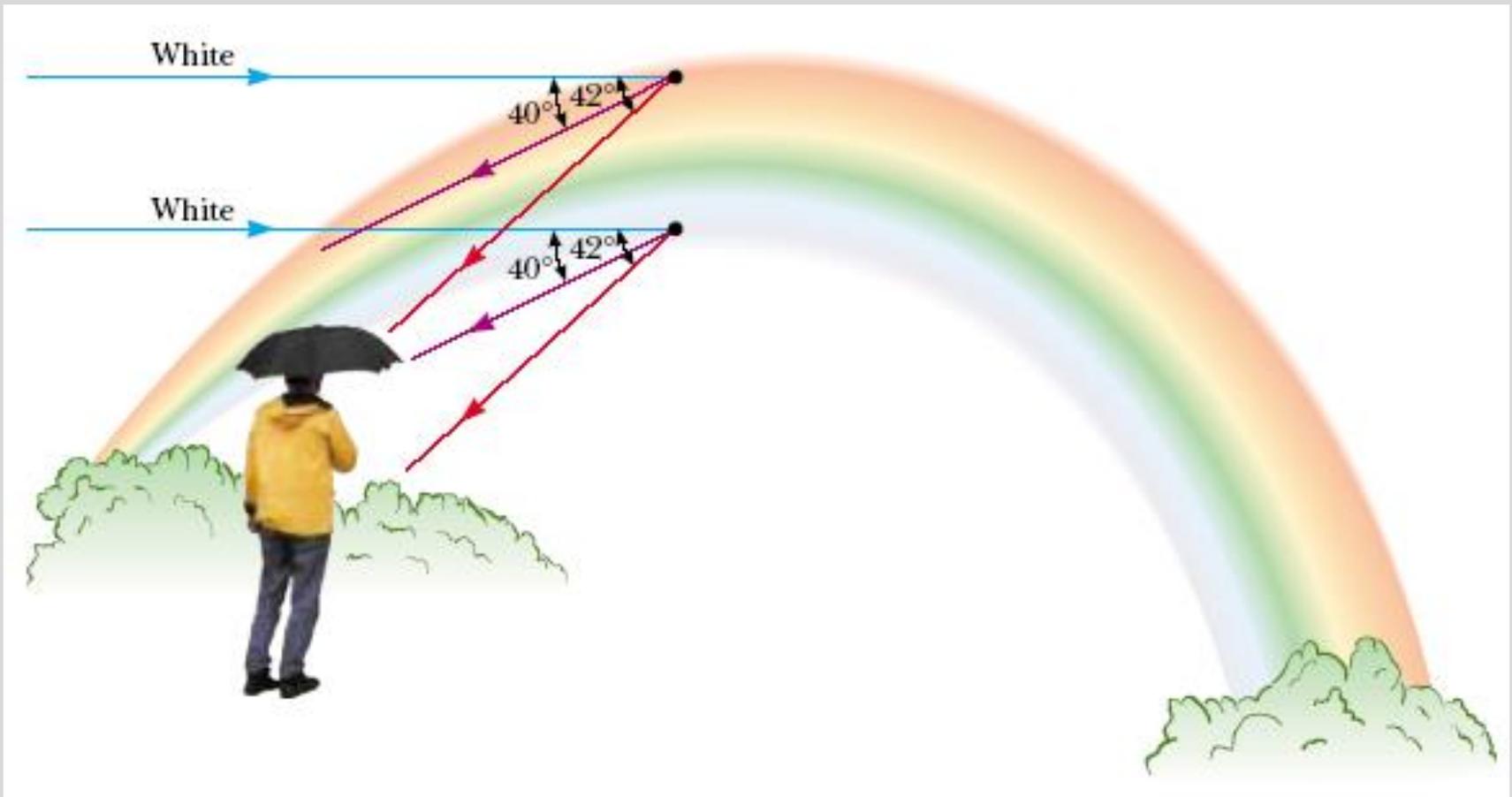




Dispersión en un prisma.



Dispersión en una gota de agua

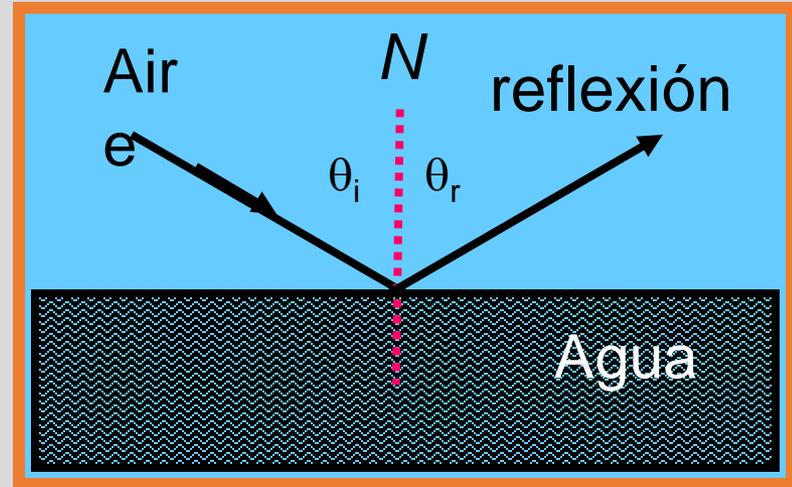


Formación del arco iris visto por un observador parado y el sol detrás de él

Resumen: Leyes de la reflexión

1. El ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflexión θ_r :

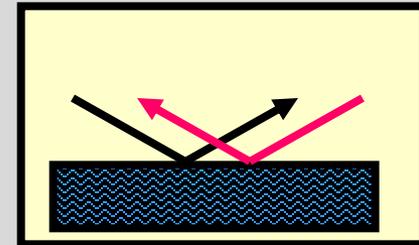
$$\theta_i = \theta_r$$



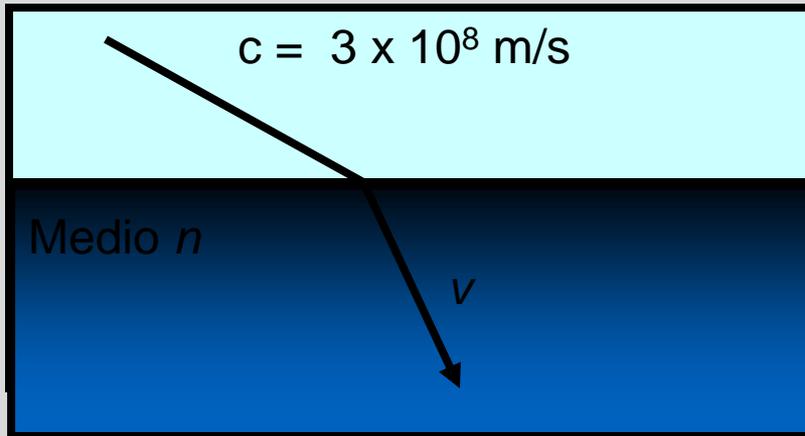
Todos los ángulos de los rayos se miden con respecto a la normal N .

2. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal N están todos en el mismo plano.

3. Los rayos son completamente reversibles.



Resumen



Índice de refracción

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

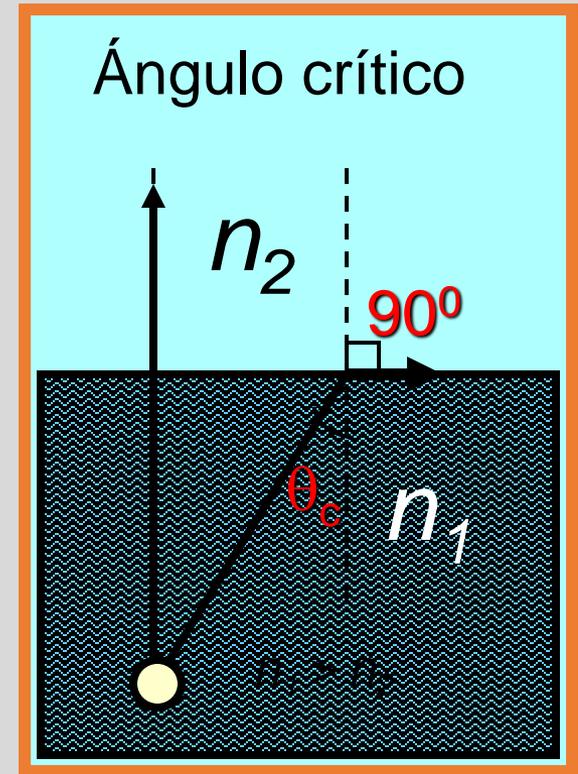
El índice de refracción, la velocidad y la longitud de onda afectan la refracción.
En general:

Ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Resumen (Cont.)

El **ángulo crítico** θ_c es el ángulo de incidencia límite en un medio más denso que resulta en un ángulo de refracción igual a 90° .



En general, para medios donde $n_1 > n_2$ se tiene que:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_1}{n_2}$$