

Repaso de lo visto anteriormente

Las **ondas de sonido o acústicas** son ondas mecánicas longitudinales, que tienen su fuente en un objeto que vibra.

Viajan con una rapidez que depende de las propiedades del medio, haciendo vibrar los elementos del medio produciendo cambios en la densidad y presión en la dirección del movimiento de la onda.

- 1) **Ondas audibles** dentro intervalo sensibilidad oído humano (20 Hz a 20Khz)
- 2) **Ondas infrasónicas** frecuencias por abajo del intervalo audible.
- 3) **Ondas ultrasónicas** tienen frecuencias por arriba del alcance audible.

Si la fuente de las ondas sonoras vibra sinusoidalmente, las variaciones de presión también son sinusoidales.

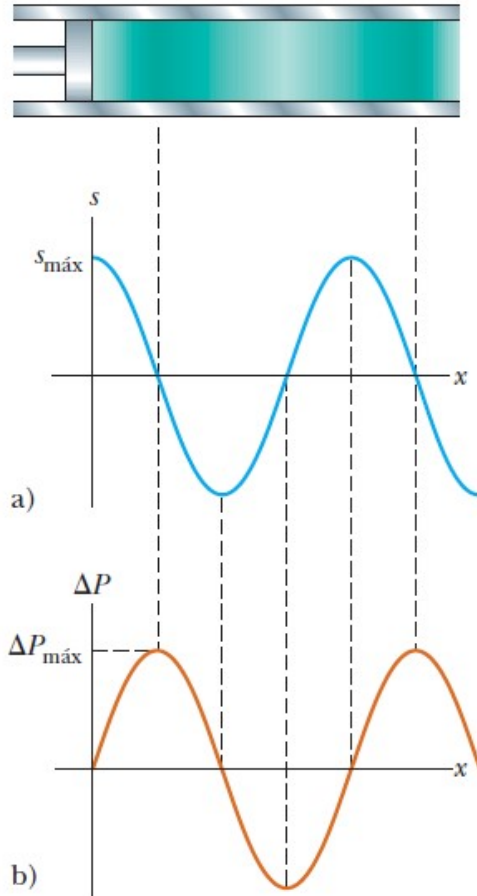
Descripción matemática de ondas sonoras sinusoidales es muy parecida a las ondas sinusoidales en cuerdas.

Cualquier elemento pequeño del medio se mueve con movimiento armónico simple paralelo a la dirección de la onda.

$s(x, t)$ posición de un elemento pequeño en relación con su posición de equilibrio:

$$s(x, t) = s_{\text{max}} \cos(kx - \omega t)$$

Repaso de lo visto anteriormente



La onda de presión está 90° fuera de fase con la onda de desplazamiento, es decir $\frac{1}{4}$ de ciclo (es decir un desfase de $\pi/2$).

ΔP es un máximo cuando el $s = 0$,
 $s = s_{\text{máx}}$ es un máximo cuando $\Delta P = 0$

Extremo de tubo cerrado: existe un nodo de desplazamiento en él porque el movimiento de aire está restringido.

Extremo abierto: los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un antinodo de desplazamiento.

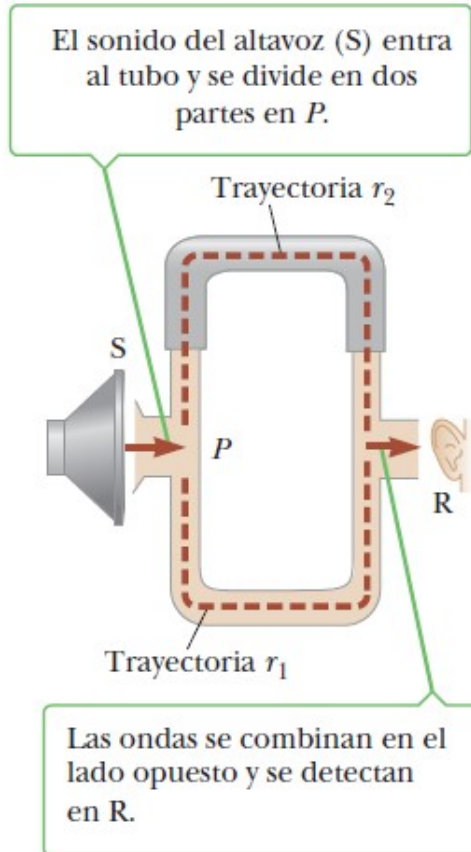
Extremo cerrado (de columna de aire): es un **nodo de desplazamiento** y **antinodo de presión** (punto de máxima variación de presión).

Extremo abierto (de columna de aire): es un **antinodo de desplazamiento** (aproximadamente) y un **nodo de presión** (la presión en este extremo permanece constante a presión atmosférica).



Repaso de lo visto anteriormente

INTERFERENCIA DE ONDAS SONORAS



interferencia constructiva:

$$|r_2 - r_1| = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

interferencia destructiva:

$$|r_2 - r_1| = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \quad y_2 = A \sin(kx + \omega t)$$

la superposición de estas dos ondas nos da:

$$y = (2A \sin kx) \cos \omega t$$

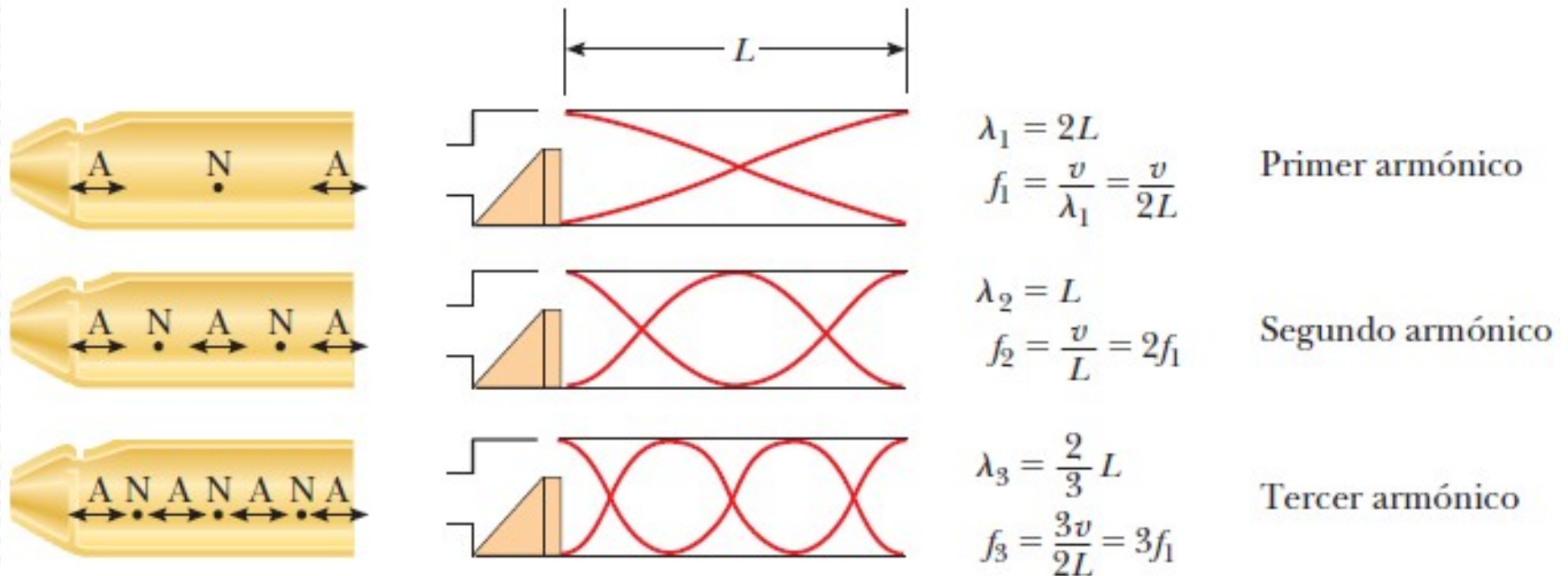
función de una **onda estacionaria**

Es posible generar ondas estacionarias en un tubo de aire mediante la interferencia de ondas acústicas que se desplazan en sentidos opuestos. La relación entre la onda incidente y la onda reflejada depende de que el extremo reflector del tubo esté abierto o cerrado. Una parte de la onda acústica es reflejada hacia el tubo incluso en un extremo abierto.



Repaso de lo visto anteriormente

Tubo abierto en ambos extremos



a) Abierto en ambos extremos

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad f_n = n f_1 = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad f_n = n \frac{v}{2L}$$

Las frecuencias naturales de oscilación forman una serie armónica que incluye todos los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Idéntico a las frecuencias de una cuerda con extremos fijos, pero v en esta ecuación es la rapidez del sonido en el aire.

Repaso de lo visto anteriormente

Tubo con un extremo abierto y otro cerrado



$$\lambda_1 = 4L$$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}$$

Primer armónico



$$\lambda_3 = \frac{4}{3}L$$

$$f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$

Tercer armónico



$$\lambda_5 = \frac{4}{5}L$$

$$f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$$

Quinto armónico

$$\lambda_1 = 4L; \lambda_2 = \frac{4L}{3}; \lambda_3 = \frac{4L}{5} \dots \lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}; f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{3v}{4L}; f_3 = \frac{5v}{4L} \dots f_n = \frac{(2n-1)v}{4L} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

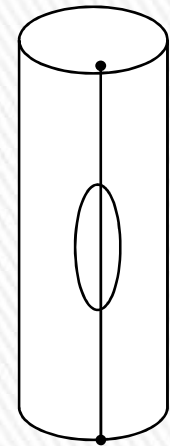
$$f_{2n-1} = (2n-1) \frac{v}{4L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Los armónicos superiores tienen frecuencias $3f_1, 5f_1, \dots$

Tubo cerrado en un extremo, frecuencias naturales forman una serie armónica que incluye sólo múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental.

EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.



a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?

La cuerda tiene sus dos extremos fijos, por lo que aparecerán ondas estacionarias cuyas frecuencias (armónicas) están dadas por:

$$f_n = n f_1 = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Debo conocer la velocidad con que se propagan las ondas en la cuerda:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Para la cuerda: $L = 0,50 \text{ m}$ $m = 10 \text{ g} = 0,010 \text{ kg}$ $T = 588 \text{ N}$

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0,010 \text{ kg}}{0,50 \text{ m}} = 0,020 \text{ kg/m}$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{588}{0,020}} = 171 \text{ m/s} \quad (171,46 \text{ m/s})$$

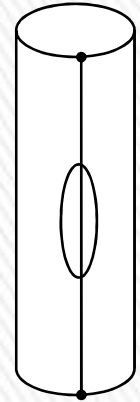
$$f_n = n \frac{v}{2L} = n \frac{171}{2(0,50)}$$

$$f_1 = 1,7 \times 10^2 \text{ Hz}; f_2 = 3,4 \times 10^2 \text{ Hz}; f_3 = 5,1 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 6,9 \times 10^2 \text{ Hz}; f_5 = 8,6 \times 10^2 \text{ Hz};$$

EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.



a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificadas de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?

Los modos normales para un tubo con ambos extremos cerrados, son iguales a los correspondientes a uno con ambos extremos abiertos, ya que tiene un nodo en c/u de los extremos, por lo que la longitud de onda del primer modo vale: $\lambda_1=2L$ (igual que cuando ambos extremos están cerrados).

Considero que la velocidad del sonido en el aire vale $v_s = 343$ m/s.

$$f_n = n \frac{v_s}{2L}$$

$$f_n = n \frac{v_s}{2L} = n \frac{343}{2(0,50)}$$

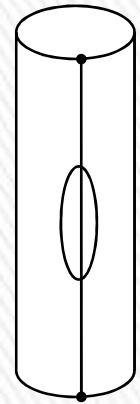
Los primeros armónicos son:

$$f_1 = 3,4 \times 10^2 \text{ Hz}; f_2 = 6,9 \times 10^2 \text{ Hz}; f_3 = 1,0 \times 10^3 \text{ Hz}$$

Se amplificarían los siguientes armónicos: $3,4 \times 10^2$ Hz, $6,9 \times 10^2$ Hz

EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.



a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?

Si ahora el tubo tiene uno de los extremos abierto, las frecuencias de los modos normales están dados por:

$$f_{2n-1} = (2n - 1) \frac{v}{4L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$f_{2n-1} = (2n - 1) \frac{v_s}{4L} = (2n - 1) \frac{343}{4(0,50)} =$$

Los primeros armónicos son:

$$f_1 = 1,7 \times 10^2 \text{ Hz}; f_3 = 5,1 \times 10^2 \text{ Hz}; f_5 = 8,6 \times 10^2 \text{ Hz} \dots$$

Se amplificarían los siguientes armónicos: $1,7 \times 10^2 \text{ Hz}$, $5,1 \times 10^2 \text{ Hz}$ y $8,6 \times 10^2 \text{ Hz}$

Repaso de lo visto anteriormente

Intensidad I de una onda:

$$I = \frac{P_{prom}}{A} = \frac{P_{prom}}{4\pi r^2}$$

NIVEL SONORO EN DECIBELES

$$\beta \equiv 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

I_0 es la intensidad de referencia (umbral de audición)
($I_0 = 1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$)

I intensidad en W/m^2 que corresponde el nivel de sonido β , donde β se mide en **decibeles (dB)**.

En esta escala, el umbral de dolor ($I = 1,00 \text{ W/m}^2$)
corresponde a un nivel sonoro de 120 dB.

Niveles sonoros	
Fuente del sonido	β (dB)
Avión jet cercano	150
Martillo hidráulico; ametralladora	130
Sirena; concierto de rock	120
Transporte subterráneo; podadora potente	100
Congestionamiento de tránsito	80
Aspiradora	70
Conversación normal	50
Zumbido de mosquito	40
Susurro	30
Hojas meciéndose	10
Umbral de audición	0

EFECTO DOPPLER

Si un vehículo se mueven mientras hacen sonar su bocina, la frecuencia del sonido que se oye es más alta (más agudo) cuando el vehículo se acerca y más baja cuando se aleja (más grave).

Este fenómeno es un ejemplo del **efecto Doppler**.

Se oye el mismo efecto si el oyente se mueve y la bocina está fija: la frecuencia es más alta cuando nos acercamos a la fuente y más baja cuando nos alejamos.

Aunque el efecto Doppler se asocia más a menudo con el sonido, es común a todas las ondas, incluyendo las de luz (corrimiento hacia el rojo de galaxias que se alejan).

Por ejemplo, el movimiento relativo de la fuente y el observador produce un corrimiento de frecuencia en las ondas luminosas.

El efecto Doppler se usa por ejemplo en los sistemas de radar policíacos para medir la rapidez de los vehículos o los astrónomos para determinar la rapidez de estrellas, galaxias y otros objetos celestes en relación con la Tierra.

Nos restringiremos al efecto Doppler aplicado al sonido y supondremos que el aire está inmóvil y que todas las medidas de la velocidad están hechas en relación con este medio inmóvil.

La velocidad v_o corresponde al observador, v_s es la velocidad de la fuente y v es la velocidad del sonido.

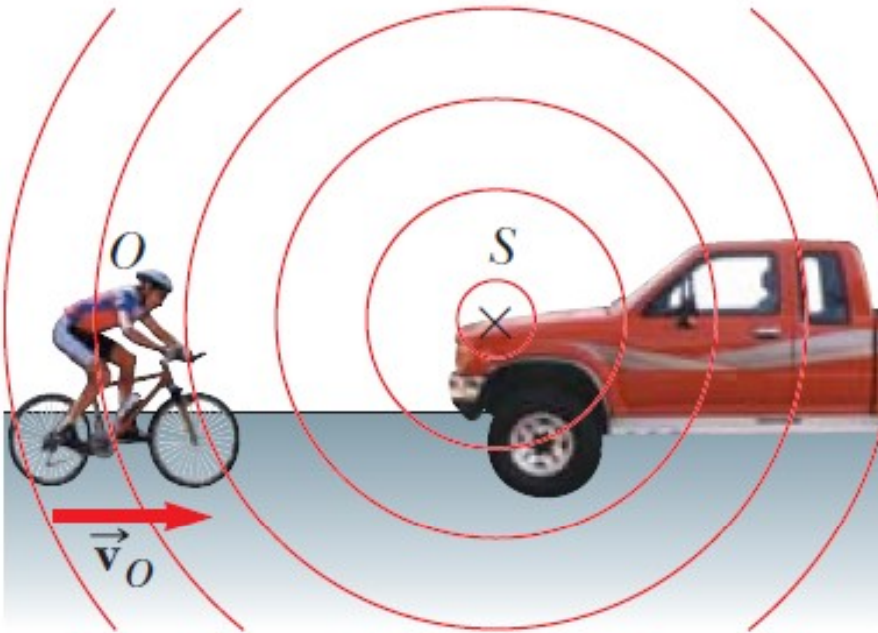
Efecto Doppler - Apps. de Física Walter Fendt:

https://www.walter-fendt.de/html5/phes/dopplereffect_es.htm



EFECTO DOPPLER

Observador se mueve hacia la fuente



Un observador O (el ciclista) se mueve con una rapidez v_0 hacia una fuente puntual estable S, la bocina de una camioneta estacionada.

El observador escucha una frecuencia f' mayor que la frecuencia de la fuente.

La longitud de onda no cambia.

Se percibe una frecuencia mayor.

Rapidez relativa de las ondas respecto al observador: $v' = v + v_0$

La longitud de onda no cambia, entonces detecta una frecuencia f' :

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\frac{v}{f}} = \frac{v + v_0}{v} f$$

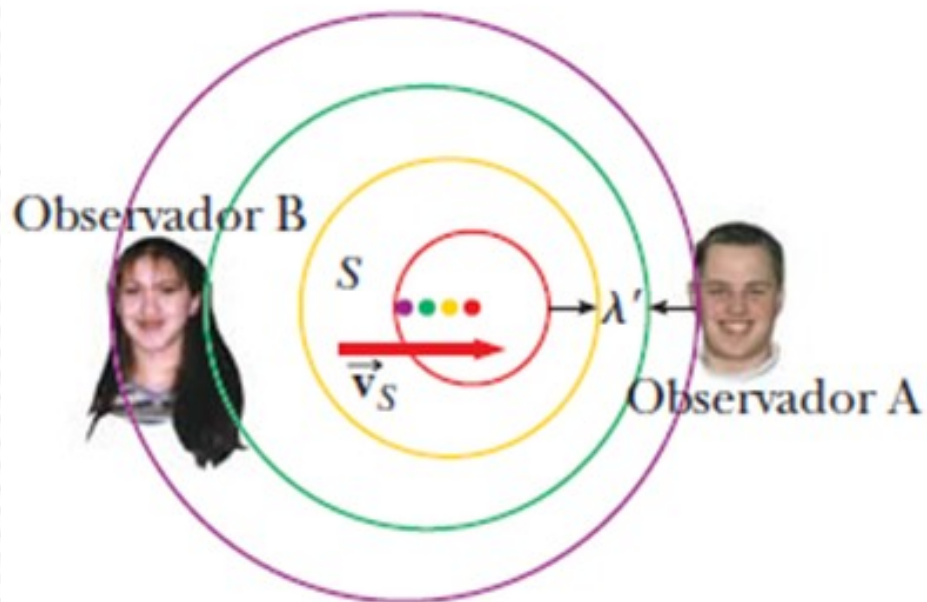
$$f' = \frac{v + v_0}{v} f$$

Si en cambio el observador se aleja de la fuente:

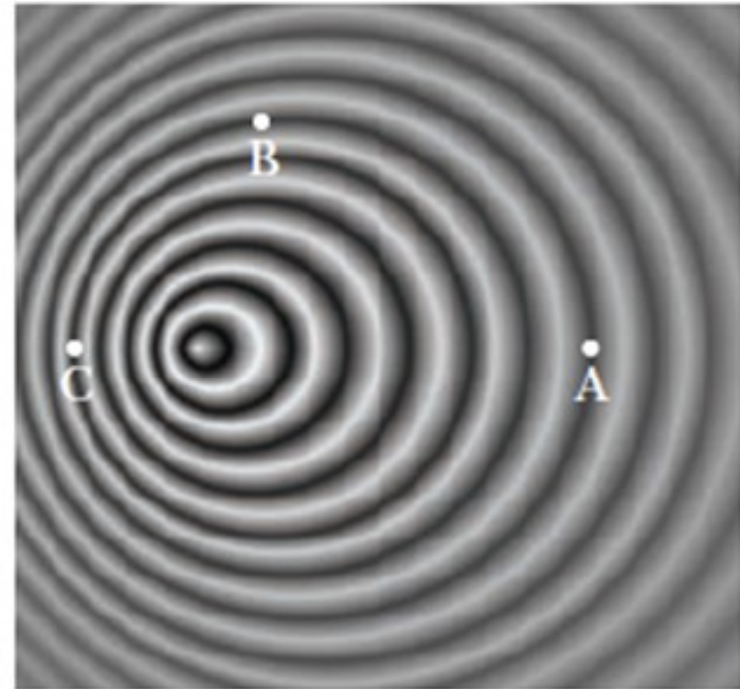
$$f' = \frac{v - v_0}{v} f$$

EFECTO DOPPLER

Fuente en movimiento (velocidad v_s) y observadores en reposo



a)



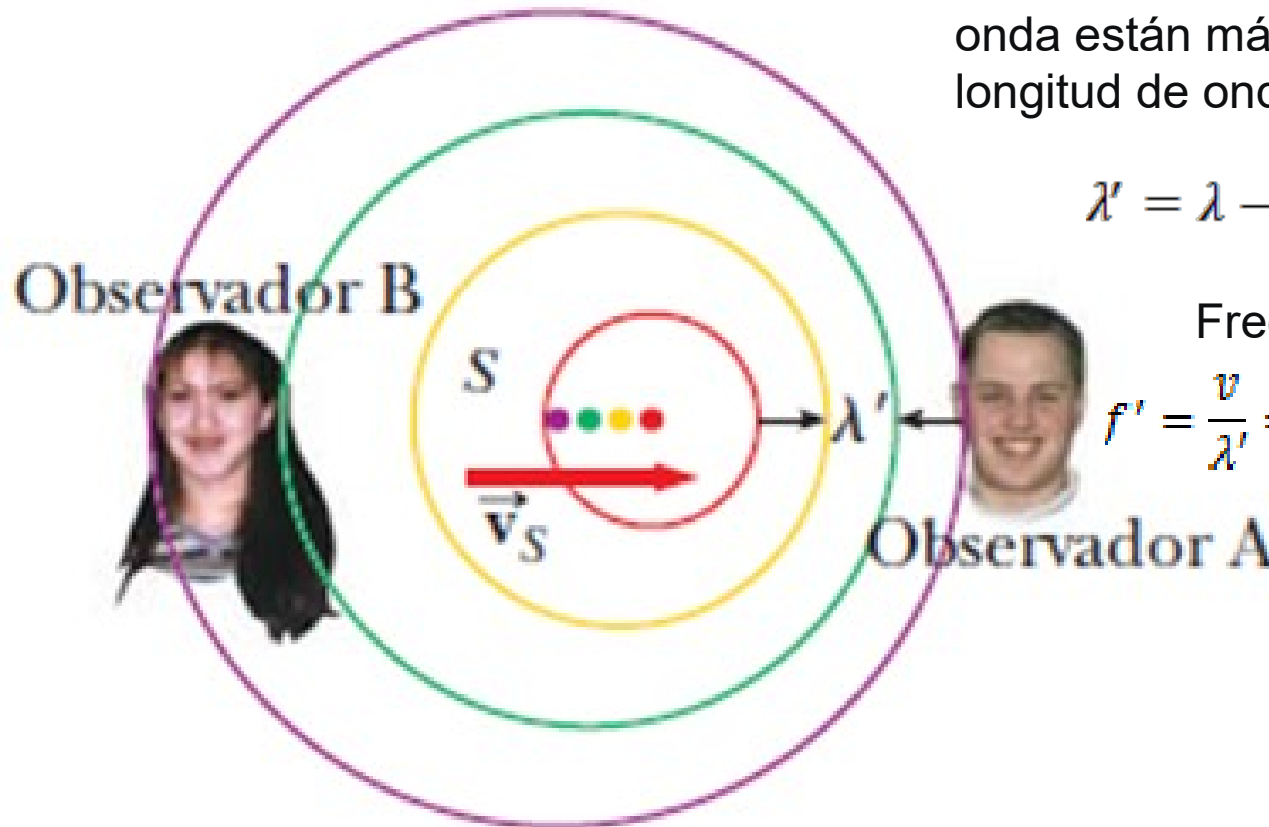
b)

a) Una fuente S se mueve con una rapidez v_s hacia un observador estable A y se aleja de un observador estable B . El observador A escucha una frecuencia mayor y el observador B una frecuencia reducida.

b) El efecto Doppler en el agua, observado en un tanque de ondas. Una fuente puntual se mueve hacia la derecha con rapidez v_s .

EFECTO DOPPLER

Fuente en movimiento (velocidad v_s) y observadores en reposo



Para el observador A los frentes de onda están más juntos y se acorta la longitud de onda en un valor $\Delta\lambda = v_s \cdot T$

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - v_s T = \lambda - \frac{v_s}{f}$$

Frecuencia percibida por A

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{\frac{v}{f} - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{v - v_s} f$$

$$f' = \frac{v}{v - v_s} f$$

(fuente acercándose)

Si la fuente se aleja del observador estacionario (B) que mide una λ' mayor que λ y escucha una frecuencia:

$$f' = \frac{v}{v + v_s} f$$

EFECTO DOPPLER

Se pueden combinar los dos casos, para usar una única ecuación:

$$f' = \frac{v + v_0}{v - v_s} f$$

En esta expresión se deben usar los signos de las velocidades de la siguiente forma:

v_0 es positiva si el observador se acerca a la fuente, si se aleja es negativa

v_s es positiva si la fuente se acerca al observador, si se aleja es negativa

El valor positivo se usa para el movimiento del observador o de la fuente hacia el otro acercándose, asociada con el aumento de la frecuencia percibida.

El valor negativo se usa para el movimiento de uno alejándose del otro, asociada con una disminución de la frecuencia percibida.

Ejercicio 4.2.9

Un auto de policía que suena una sirena con una frecuencia de 1200 Hz viaja a 126 km/h . Otro automóvil viaja en sentido contrario a una velocidad de 72,0 km/h. Considere que la velocidad del sonido en el aire vale 343 m/s. ¿Cuánto vale, en Hz, la diferencia entre la frecuencia que percibe el conductor del auto antes y después de que lo pase el auto de policía?

$$v = 343 \text{ m/s}$$

$$f = 1.200 \text{ Hz}$$

$$v_s = 126 \text{ km/h} = 35,0 \text{ m/s}$$

$$v_o = 72,0 \text{ km/h} = 20,0 \text{ m/s}$$

Antes de cruzarse, se están aproximando por lo que la frecuencia que percibe el conductor del auto f_A estará dada por:

$$f_A = \frac{v + v_o}{v - v_s} f = \frac{343 + 20,0}{343 - 35,0} (1.200 \text{ Hz}) = 1.414,29 \text{ Hz}$$

Después de cruzarse, el conductor del auto percibe una frecuencia f_D que estará dada por:

$$f_D = \frac{v - v_o}{v + v_s} f = \frac{343 - 20,0}{343 + 35,0} (1.200 \text{ Hz}) = 1.025,40 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = f_A - f_D = 1414,29 - 1025,40 = 388,89 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = 389 \text{ Hz}$$

05-NATURALEZA DE LA LUZ Y LEYES DE ÓPTICA GEOMÉTRICA



Esta fotografía muestra un arco iris secundario con los colores invertidos. La aparición del arco iris depende de tres fenómenos ópticos: reflexión, refracción y dispersión



Christiaan Huygens

Físico y astrónomo holandés (1629-1695). Es conocido por sus aportaciones a los campos de la óptica y la dinámica. Para él, la luz consistía en un tipo de movimiento vibratorio que se dispersa y produce la sensación de luz cuando incide en los ojos. Con base en esta teoría, dedujo las leyes de la reflexión y la refracción y explicó el fenómeno de doble refracción.

NATURALEZA DE LA LUZ

Galileo y otros científicos intentaron (sin éxito) medir la rapidez de la luz.

Ole Roemer en 1676 obtuvo un valor de 214.000 km/s, Bradley en 1728: 301.000 km/s (métodos astronómicos) y luego Fizeau en 1849: 315.000 km/s.

Hasta la época de Newton, la mayoría de los científicos, incluyéndolo, pensaban que la luz consistía en corrientes de partículas *emitidas por las fuentes luminosas* (**teoría corpuscular**). Explicaba la reflexión y la refracción.

Hacia fines del siglo XVII aparecen evidencias de las propiedades *ondulatorias de la luz* (**teoría ondulatoria**): 1678 Christian Huygens: demostró que una teoría de ondas de luz podría también explicar la reflexión y la refracción...

A principios del siglo XIX, la evidencia de que la luz es una onda se había vuelto muy convincente.

1801, Thomas Young demostró que, bajo condiciones apropiadas, los rayos de luz se interfieren unos con otros: comportamiento que no podía ser explicado en aquel tiempo por una teoría de partículas.

1847- Faraday supone a la luz como una “vibración electromagnética”

En 1873 James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación, como vimos.

Esto junto con el trabajo experimental que inició en 1887 Hertz, demostró en forma concluyente que la luz en verdad es una onda electromagnética.



NATURALEZA DE LA LUZ

Modelo ondulatorio y la teoría clásica del electromagnetismo explicaban la mayoría de las propiedades de la luz, no podían explicar otros experimentos posteriores, como el **efecto fotoeléctrico** (Hertz): cuando incide luz sobre una superficie metálica, a veces se expulsan electrones de la superficie.

Entre las dificultades que surgieron mostraban que la energía cinética de un electrón expulsado es independiente de la intensidad de la luz.

Einstein (1905) **teoría del efecto fotoeléctrico** aplicando modelo de acuerdo con el **concepto de Cuantización de Planck** (1900)

El modelo de cuantización supone que la energía de una onda luminosa está presente en **“partículas” llamadas fotones**; *por tanto, se dice que la energía está cuantizada. Según la teoría de Einstein, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética: $E = hf$ donde la constante de proporcionalidad $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ es la constante de Planck.*

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 las corpusculares.

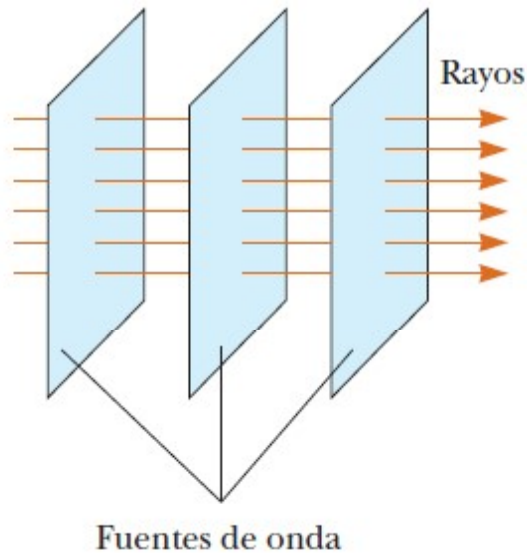
La propagación de la luz se describe mejor con el modelo ondulatorio, pero para comprender la emisión y la absorción se requiere un enfoque corpuscular.

Doble naturaleza de la luz: en algunos casos exhibe características de una onda y en otras de una partícula.

APROXIMACIÓN DE UN RAYO EN ÓPTICA GEOMÉTRICA

Para describir las direcciones en las que se propaga la luz, a menudo conviene representar una onda luminosa por medio de **rayos**.

En la teoría corpuscular de la luz, los rayos son las trayectorias de las partículas, en el ondulatorio, es **una línea imaginaria a lo largo de la dirección de propagación de la onda**.



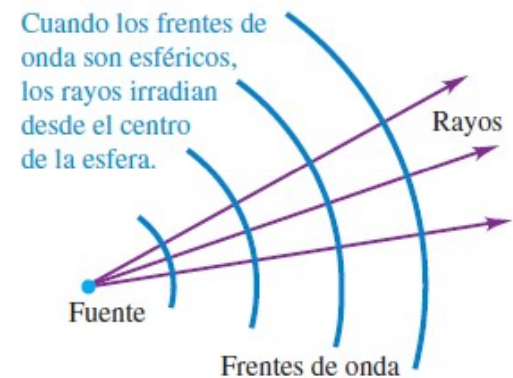
Óptica geométrica: modelo de propagación de la luz: -

se desplaza en una dirección fija y en línea recta cuando pasa por un medio uniforme, y cambia su dirección cuando se encuentra con un medio diferente o si las propiedades ópticas del medio no son uniformes.

Aproximación de un rayo: los rayos de una onda determinada son líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda, para una onda plana.

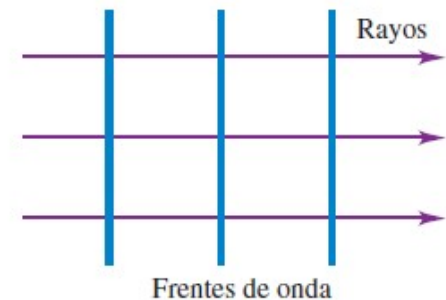
$c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s (valor adoptado como exacto, define el metro) en el vacío para cualquier frecuencia.

a)



b)

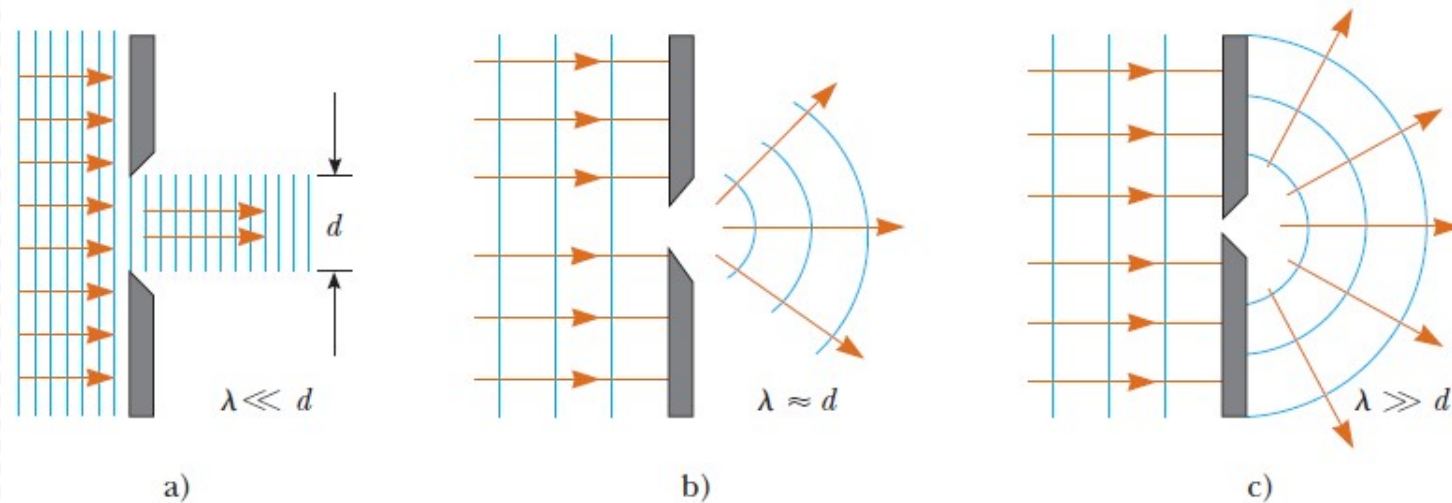
Cuando los frentes de onda son planos, los rayos son perpendiculares a los frentes de onda y paralelos entre sí.



APROXIMACIÓN DE UN RAYO EN ÓPTICA GEOMÉTRICA

Comportamiento de la onda al encontrar barrera con abertura circular (d) según tamaño relativo con λ .

Óptica geométrica: aproximación del rayo y suposición de que $\lambda \ll d$. Muy buena aproximación para estudio de espejos, lentes, prismas e instrumentos ópticos asociados, por ejemplo telescopios, cámaras y anteojos.



Onda plana de longitud λ incide sobre barrera en la que hay una abertura de diámetro d .

a) Cuando $\lambda \ll d$, los rayos siguen en una trayectoria en línea recta, y la aproximación de rayo continúa siendo válida. Existen sombras nítidas.

b) Cuando $\lambda \approx d$, los rayos se extienden después de pasar por la abertura (**difracción**), sin “respetar” una trayectoria rectilínea..

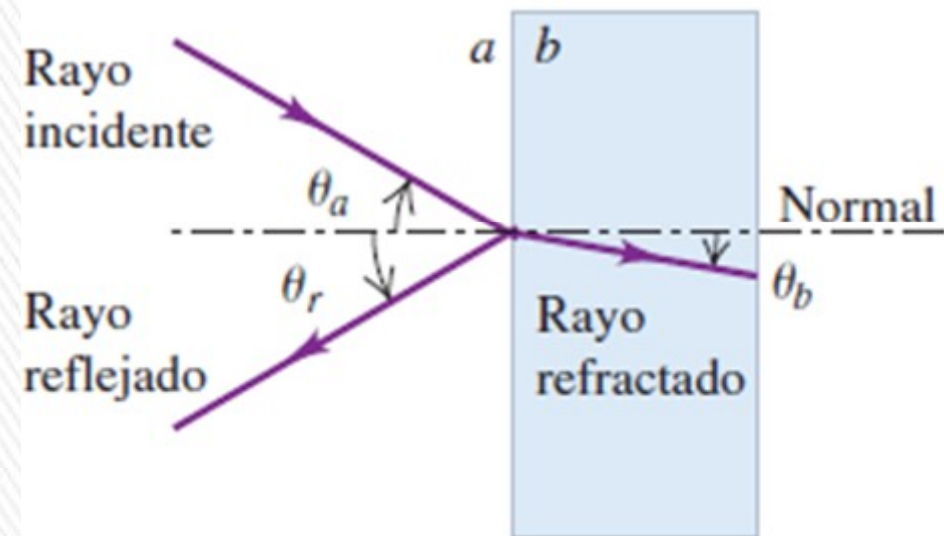
c) Cuando $\lambda \gg d$, la abertura se comporta como fuente puntual que emite ondas esféricas.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

Usamos modelo de la luz basado en *rayos para analizar* la propagación de la luz y su **reflexión y refracción**.

Cuando la luz incide en una interfase lisa que separa dos materiales transparentes (aire-vidrio, o agua-vidrio), en general se *refleja parcialmente y también se refracta (se transmite) parcialmente hacia el segundo material*.

Direcciones de todos los rayos incidente, reflejado y refractado (transmitido) en interfase lisa entre dos materiales ópticos se describen a través de los ángulos que forman con la *normal (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia*.

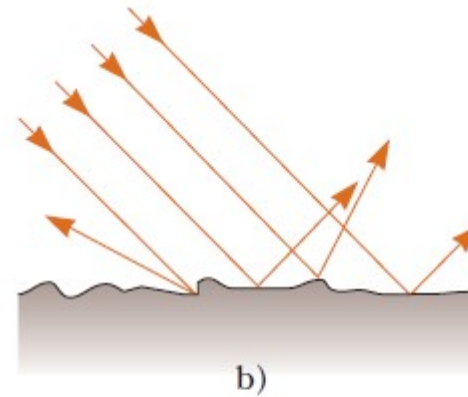
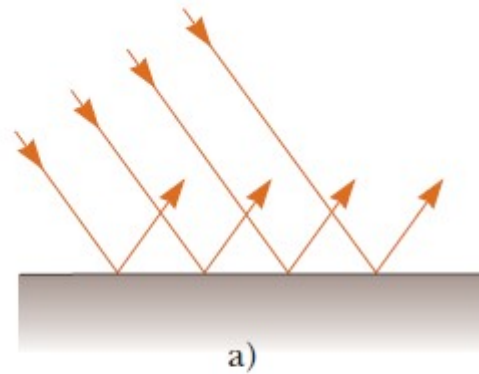


Reflexión especular: incidencia sobre superficie lisa (espejo) y los rayos reflejados son paralelos entre sí.

Reflexión difusa: si la superficie reflectora es rugosa, la superficie refleja los rayos no como un conjunto paralelo sino en varias direcciones.

Una superficie se comporta como superficie lisa mientras las variaciones de superficie son mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman.



a) reflexión especular, todos los rayos reflejados son paralelos entre sí, y
b) reflexión difusa, los rayos reflejados viajan en direcciones aleatorias.
c) y d) Fotografías de reflexión especular y difusa con luz láser.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

El **índice de refracción** de un material óptico (también llamado **índice refractivo**), denotado con n , es la razón entre la rapidez c de la luz en el vacío y la rapidez v de la luz en el material:

$$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$n \equiv \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}} \equiv \frac{c}{v}$$

La rapidez de la luz en cualquier material es *menor que en el vacío y depende de la frecuencia... disminuye en gral. con la frecuencia*
 La luz se desplaza a su máxima rapidez en el vacío (c) y no depende de la frecuencia.

Índices de refracción

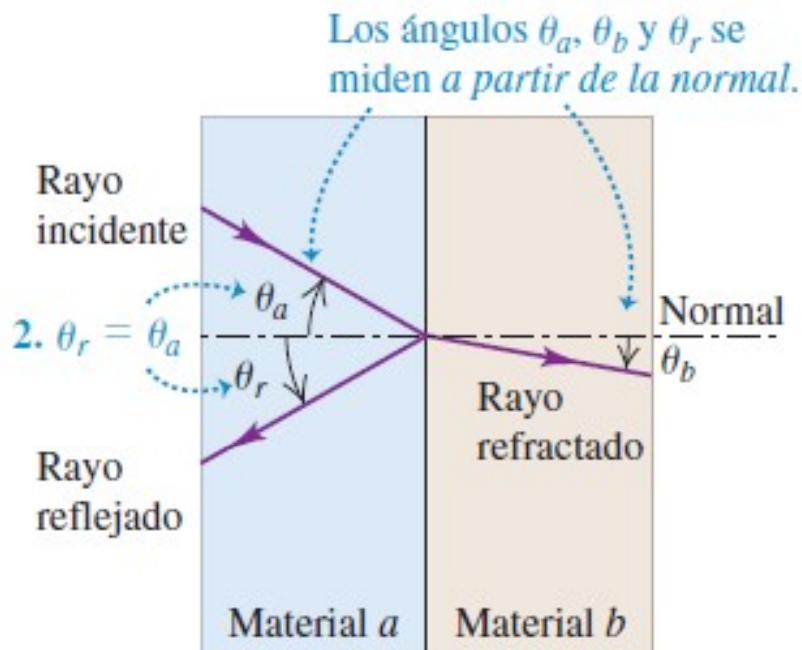
Sustancia	Índice de refracción	Sustancia	Índice de refracción
<i>Sólidos a 20°C</i>		<i>Líquidos a 20°C</i>	
Circonio cúbico	2.20	Benceno	1.501
Diamante (C)	2.419	Disulfuro de carbono	1.628
Fluorita (CaF ₂)	1.434	Tetracloruro de carbono	1.461
Cuarzo fundido (SiO ₂)	1.458	Alcohol etílico	1.361
Fosfato de galio	3.50	Glicerina	1.473
Vidrio, sin plomo	1.52	Agua	1.333
Vidrio, con plomo	1.66		
Hielo (H ₂ O)	1.309	<i>Gases a 0°C, 1 atm</i>	
Poliestireno	1.49	Aire	1.000 293
Cloruro de sodio (NaCl)	1.544	Dióxido de carbono	1.000 45

Nota: Todos los valores son para luz cuya longitud de onda sea de 589 nm en el vacío.



REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, se encuentran en el mismo plano.



3. Cuando un rayo de luz monocromática cruza la interfase entre dos materiales dados a y b , los ángulos θ_a y θ_b se relacionan con los índices de refracción de a y b por medio de

$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

Leyes de reflexión y refracción

Experimentalmente se probó que:

1. Los **rayos incidente, reflejado y refractado**, y la **normal** se encuentran todos en el **mismo plano (plano de incidencia)**, que es perpendicular al plano de la superficie de frontera entre los dos materiales.
2. Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, a y b , en *lados* opuestos de la interfase, se cumple que:

$$\theta_r = \theta_a \quad \text{Ley de reflexión}$$

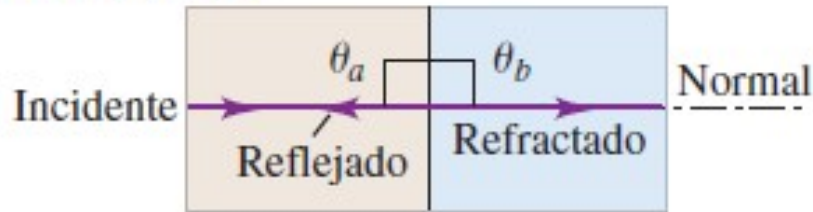
3. Para la luz monocromática y para un par dado de materiales, a y b , en *lados* opuestos de la interfase,

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

Ley de refracción o de Snell

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

c) Un rayo orientado a lo largo de la normal no se desvía, sin importar cuáles sean los materiales.



Sin importar cuáles sean los materiales a cada lado de la interfase, en el caso de incidencia *normal* el rayo transmitido no se desvía en absoluto.

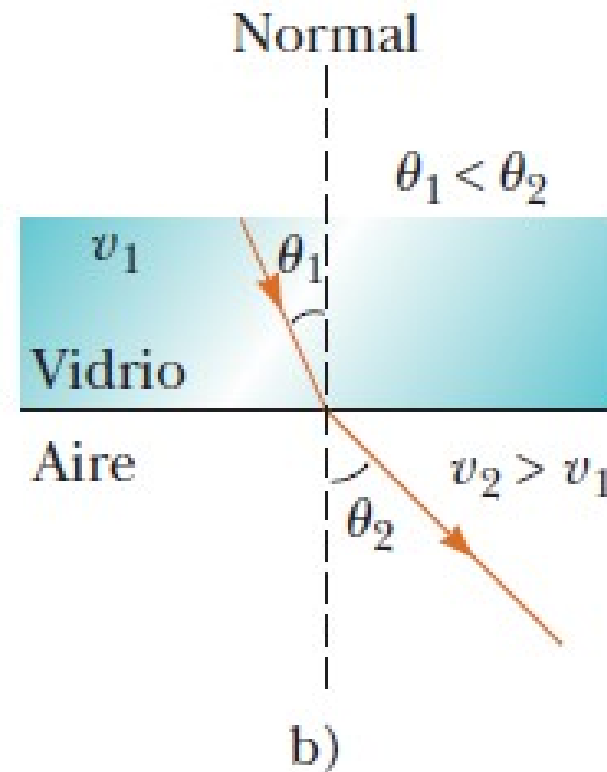
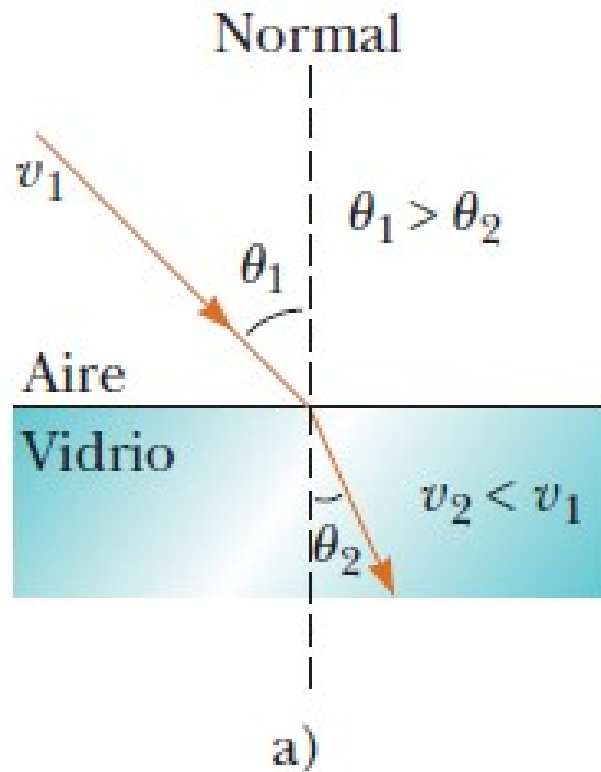
Cuando un rayo pasa de un material *a* hacia otro material *b* que tiene un mayor índice de refracción ($n_b > n_a$) y, por lo tanto, una menor rapidez de onda, el ángulo θ_b que forma con la normal es más pequeño en el segundo material que el ángulo θ_a en el primero; por consiguiente, el rayo se desvía hacia la normal.

Cuando el segundo material tiene un menor índice de refracción que el primero ($n_b < n_a$) y, por lo tanto, una mayor rapidez de onda, el rayo se desvía alejándose de la normal.

La ley de la refracción explica por qué una regla o una pajilla parcialmente sumergidos parecen estar doblados; los rayos de luz que provienen de un lugar por debajo de la superficie cambian de dirección al pasar por la interfase aire-agua, de manera que los rayos parecen provenir de una posición por arriba de su punto de origen real. Un efecto similar explica la apariencia de los atardeceres.



REFRACCIÓN DE LA LUZ



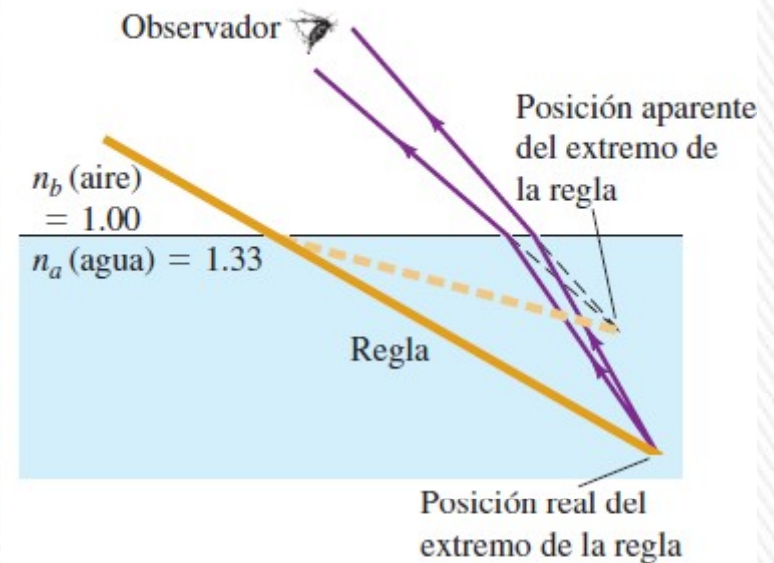
- a) Cuando un haz de luz pasa del aire al vidrio, la luz disminuye su velocidad al entrar a éste y su trayectoria se dobla hacia la normal.
- b) Cuando el haz se mueve del vidrio al aire, la luz aumenta su velocidad al entrar al aire y su trayectoria se dobla alejándose de la normal.

REFRACCIÓN DE LA LUZ

a) Una regla recta sumergida a la mitad en agua



b) ¿Por qué se ve doblada la regla?



a) La regla en realidad es recta, pero parece que se dobla al entrar en la superficie del agua.

b) Los rayos de luz provenientes de cualquier objeto sumergido se desvían alejándose de la normal cuando salen al aire. Desde el punto de vista de un observador situado afuera de la superficie del agua, el objeto parece estar mucho más cerca de la superficie de lo que en realidad está.

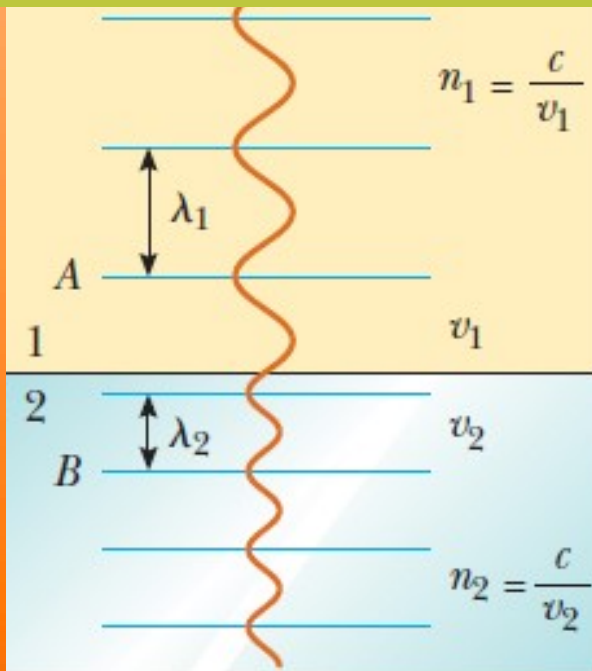
REFRACCIÓN DE LA LUZ



a) El índice de refracción del aire es ligeramente mayor que 1; por esta razón, los rayos luminosos del Sol cuando se oculta se desvían hacia abajo cuando entran a la atmósfera. (El efecto se exagera en esta figura.)

b) La luz que proviene del extremo inferior del Sol (la parte que parece estar más cerca del horizonte) sufre una refracción más intensa, pues pasa a través del aire más denso en las capas bajas de la atmósfera. Como resultado, cuando el Sol se oculta, se ve achatado en la dirección vertical.

Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz



n el índice de refracción, es un número sin dimensiones mayor que 1 porque $v < c$.
 n es igual a la unidad para el vacío.

Cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pero sí lo hace su longitud de onda.

El número de ciclos de la onda que llegan por unidad de tiempo debe ser igual al número de ciclos que salen por unidad de tiempo; esto significa que la superficie de frontera no puede crear ni destruir ondas.

La longitud de onda λ , en general, es diferente en distintos materiales.

Esto se debe a que en cualquier material, $v = \lambda f$; como f es la misma en cualquier material que en el vacío y v siempre es menor que la rapidez c de la onda en el vacío, λ también se reduce en forma correspondiente.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Un medio se dice que es ópticamente más denso que otro si su índice de refracción es mayor.

REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

PHET: https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_es.html

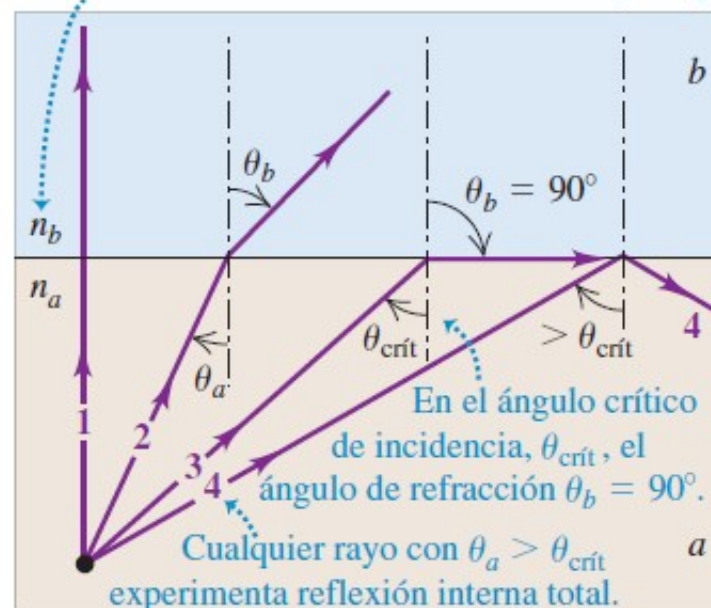
La luz es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida en una interfase entre dos materiales con distintos índices de refracción.

Sin embargo, en ciertas circunstancias, *toda la luz se puede reflejar en la interfase, sin que se transmita nada de ella*, aun si el segundo material es transparente.

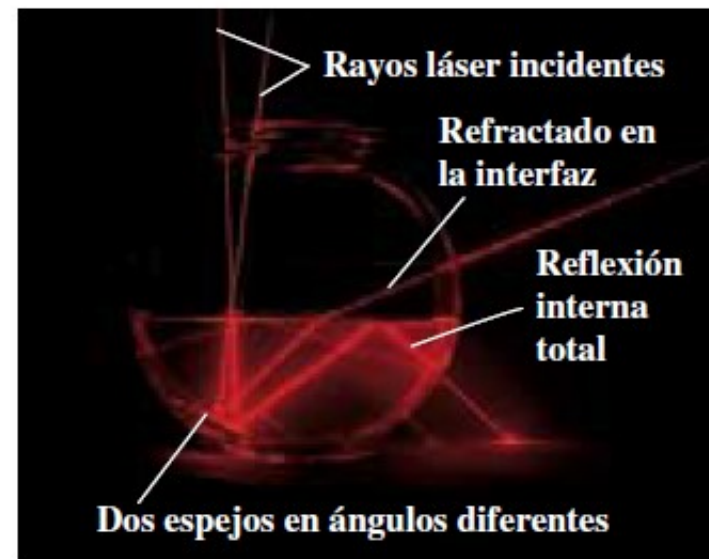
Los rayos inciden en la superficie del segundo material b con índice n_b , donde $n_a > n_b$.
Los materiales a y b podrían ser agua y aire, respectivamente: $\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$

a) Reflexión interna total

La reflexión interna total ocurre sólo si $n_b < n_a$.



b) Reflexión interna total demostrada con un láser, espejos y agua en una pecera



REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a$ como $n_a / n_b > 1$, $\sin \theta_b > \sin \theta_a$;
el rayo se desvía apartándose de la normal.

Hay un valor de θ_a menor que 90° para el cual $\sin \theta_b = 1$ y $\theta_b = 90^\circ$.

El ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge en forma tangencial a la superficie se llama **ángulo crítico** ($\theta_{crít.}$).

La intensidad transmitida tiende a cero.

Si el ángulo de incidencia es *mayor* que el ángulo crítico, el seno del ángulo de refracción, de acuerdo con la ley de Snell, tendría que ser mayor que la unidad, lo cual es imposible.

Más allá del ángulo crítico, el rayo no puede pasar hacia el material ubicado en la parte superior: queda atrapado en el material de la parte inferior y se refleja por completo en la frontera de la superficie: reflexión interna total.

Solo ocurre si la incidencia del rayo es desde un material con mayor índice de refracción: $n_b < n_a$ (por ejemplo del agua al aire, pero nunca al revés)

$$\sin \theta_{crít.} = \frac{n_b}{n_a}$$

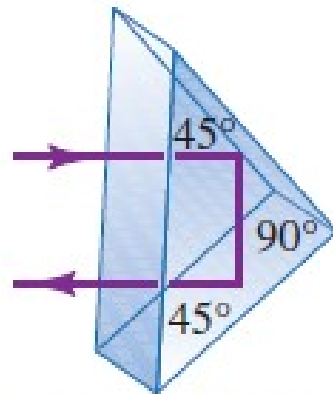
La reflexión interna total ocurrirá si el ángulo de incidencia θ_a es *mayor* o *igual* que $\theta_{crít.}$

Aplicaciones de la reflexión interna total

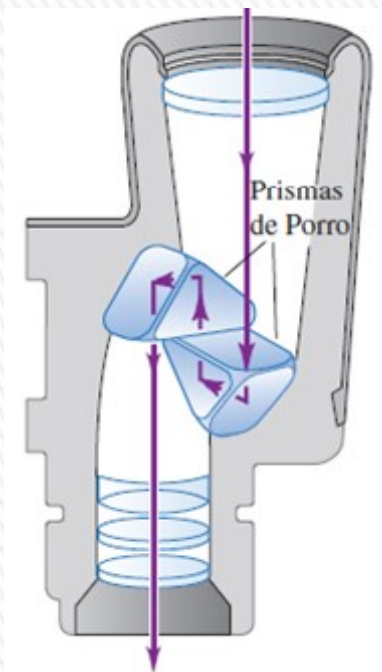
Vidrio de índice de refracción es $n = 1,52$,
la luz que se propaga dentro de este vidrio encuentra una interfase vidrio-aire, el ángulo crítico es

$$\text{sen } \theta_{\text{crít}} = \frac{1}{1.52} = 0.658 \quad \theta_{\text{crít}} = 41.1^\circ$$

La luz se reflejará totalmente si incide en la superficie vidrio-aire con un ángulo de $41,1^\circ$ o mayor. Puesto que el ángulo crítico es un poco menor de 45° , es posible usar un prisma con ángulos de $45^\circ - 45^\circ - 90^\circ$ como superficie totalmente reflectante.

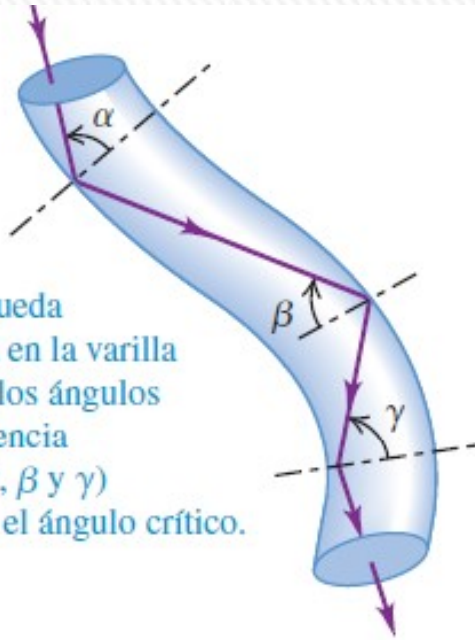


Si el rayo incidente está orientado como se ilustra, la reflexión interna total ocurre en las caras a 45° (porque para una interfase vidrio-aire, $\theta_{\text{crít}} = 41.1$).



Aplicaciones de la reflexión interna total

FIBRAS ÓPTICAS -ENDOSCOPIOS



La luz queda atrapada en la varilla si todos los ángulos de incidencia (como α , β y γ) exceden el ángulo crítico.

33.16 Transmisión de imágenes por un haz de fibras ópticas.

