Los fenómenos que tienen lugar en el mundo físico son captados a través del oído o la vista, pero llegan desde puntos distantes, es decir, tarda cierto tiempo en ser recibida => no vemos ni oímos lo que sucede en el preciso instante en que lo percibimos, sino lo ocurrido en un tiempo anterior.
Tanto nuestro oído como nuestra vista perciben la perturbación del medio que nos rodea, fenómeno que recibe el nombre de MOVIMIENTO ONDULATORIO, o simplemente, ONDA.
Las ONDAS SONORAS son movimientos regulares y sistemáticos de las moléculas del medio transmisor, superpuestos a sus movimientos propios, propagándose a una determinada velocidad, llegan al oído, en donde afecta a los nervios auditivos por efectos mecánicos, y el cerebro se encarga de darle la sensación de sonido.
Las ONDAS LUMINOSAS (ELECTROMAGNETICAS) ocurren por el transporte de energía por fenómenos de naturaleza no elástica.
En los últimos años se ha dado carácter ondulatorio, incluso, a las partículas (electrones, protones...).
Estas son las razones por las que es necesario realizar, en Física, el estudio del movimiento ondulatorio.
Como este movimiento es periódico, veremos, en primer lugar, el estudio de los movimientos periódicos.

Movimientos periódicos

Un cuerpo realiza un movimiento periódico cuando a intervalos regulares de tiempo, llamado PERIODO, todas las variables de su movimiento (posición, velocidad, aceleración y sus componentes) toman el mismo valor. Algunos movimientos periódicos son: un péndulo que oscila, un volante que gira con velocidad constante, el movimiento de la Tierra alrededor de su eje...
Los movimientos periódicos son OSCILATORIOS cuando su distancia al origen pasa por un valor máximo y otro mínimo, como es el caso del péndulo. En estos se llama ELONGACION a la distancia que separa al punto móvil del origen, y AMPLITUD al valor de la máxima elongación.
Se llaman MOVIMIENTOS VIBRATORIOS a los movimientos periódicos de tipo oscilatorio que tienen su origen en el punto medio de su trayectoria, es decir, amplitudes iguales a ambos lados del origen, siendo, además, su periodo muy pequeño, en general.
Debido a este pequeño valor del periodo, se introduce en Física una nueva magnitud, la frecuencia (f1), que es el número de oscilaciones por segundo, estando relacionada con el periodo a través de la fórmula:

$$f = \frac{1}{T} \qquad\qquad [f] = hertzios = Hz$$

Ejemplo de movimiento vibratorio sería un muelle elástico que se estira o contrae.
Según un teorema matemático debido a Fourier, "todo movimiento periódico puede considerarse como la suma de movimientos vibratorios armónicos de frecuencias múltiplos de la del movimiento periódico considerado, frecuencia fundamental".
Para ello veamos el oscilador armónico.

Oscilador armónico

Este movimiento se caracteriza por ser rectilíneo, siendo variable la aceleración en cada punto, y proporcional a la elongación, pero de sentido contrario.
Como ejemplo característico se suele poner el péndulo simple: "todo cuerpo capaz de oscilar alrededor de un eje horizontal que no pase por su centro de gravedad".
En el M.A.S. la ecuación de la posición es del tipo:

$$y = Asen(\omega t + \delta_0)$$

y es la ELONGACION. A es la AMPLITUD.
δ_0 es la FASE INICIAL de vibración. ω es la frecuencia angular o pulsación
$(\omega t + \delta_0)$ es la FASE de la vibración.
El periodo, la frecuencia y la pulsación están relacionados entre sí por las ecuaciones:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

1La velocidad y aceleración de las partículas sometidas a este movimiento toman la forma:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \delta_0)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 Asen(\omega t + \delta_0) = -\omega^2 y$$

Se observa que la aceleración es directamente proporcional (k es una constante) a la elongación. Todo M.A.S. debe poseer esta característica.

Dinámica del MAS

En los muelles, la fuerza recuperadora viene dada por la ecuación de Hooke:

$$F = -k\ x$$

Según el segundo principio de la dinámica, esta fuerza es igual a m a:

$$F = -k\ x = m\ a \quad ==> \quad a = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x \quad ==> \quad k = m\ \omega^2$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} = \frac{2\pi^2}{T} \quad ==> \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Energía en el movimiento armónico simple

Hemos visto anteriormente que: $E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$

Puesto que $x = A \cdot sen(\omega \cdot t + \delta_0)$, podemos establecer la variación de la energía potencial del oscilador:

$$E_P = \frac{1}{2} kA^2 sen^2(\omega t + \delta_0)$$

Por otra parte: $E_C = \frac{1}{2} mv^2$
Siendo: $v = \omega A \cos(\omega t + \delta_0)$
Relacionando ambas: $E_C = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 cos^2 (\omega t + \delta_0) = \frac{1}{2} kA^2 cos^2 (\omega t + \delta_0)$

Cuando E_C es 0 J, la E_P es máxima: $E_P = \frac{1}{2} kA^2$

Lo mismo ocurre cuando E_P es 0 J, E_C es máxima: $E_C = \frac{1}{2} kA^2$

Ambas energías varían periódicamente desde cero (0) J hasta $1/2 \cdot k \cdot A^2$.
La energía mecánica de un oscilador es la suma de la energía cinética y la potencial:

$$E = E_P + E_C = \frac{1}{2} kA^2 cos^2 (\omega t + \delta_0) + \frac{1}{2} kA^2 sen^2 (\omega t + \delta_0)$$

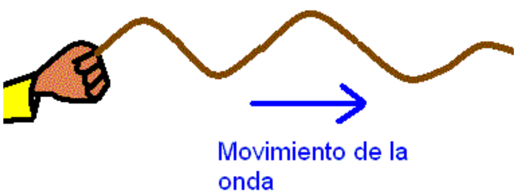
$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \left[\cos^2(\omega \cdot t + \delta_0) + sen^2(\omega \cdot t + \delta_0)\right]$$

$$E = \frac{1}{2} kA^2$$

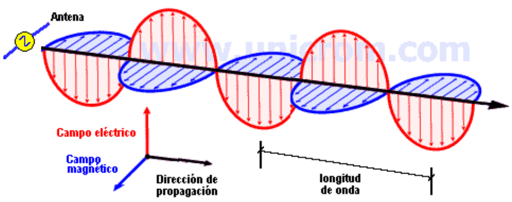
La energía del oscilador permanece constante, variando de forma conjunta las energías cinética y potencial.

Ecuación general del movimiento ondulatorio

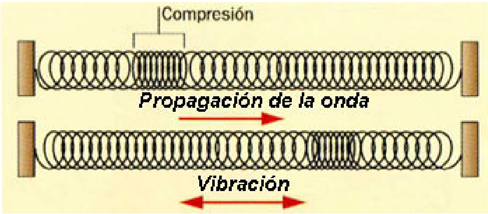
La expresión anterior nos va a ayudar a describir el **movimiento ondulatorio**, basándonos también en el teorema de Fourier.
Básicamente, el movimiento ondulatorio puede describirse como "la transmisión de una perturbación desde un punto a otro, sin que exista transporte neto de materia".
Una onda simple que se mueve a lo largo de una cuerda tiene muchas propiedades en común con una onda de luz:



El desplazamiento de la cuerda es perpendicular a la dirección del movimiento de la perturbación, es decir, la onda se propaga a lo largo de la cuerda, mientras cada elemento de la cuerda se mueve a un lado y a otro. Las ondas de esta clase se llaman **ondas transversales**.



La **luz** es una onda transversal, con sus campos eléctrico y magnético variando en una dirección perpendicular a la dirección de propagación.



Sin embargo, las ondas producidas al comprimir y dilatar un muelle tienen la misma dirección que la perturbación (compresión-dilatación): **ondas longitudinales**.

En general, la **función de onda** resulta ser solución de la ecuación de D'Alembert:

$$\frac{\delta^2\Psi}{\delta t^2} = v^2 \cdot \left(\frac{\delta^2\Psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2\Psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2\Psi}{\delta z^2}\right)$$

$\Psi(\vec{r},t)$ es la función de onda, representa la perturbación en el espacio (x,y,z) y en el tiempo t.
v es la velocidad de la onda.

Si la onda se propaga en la dirección y:

$$y\ (t,x) = \frac{\delta^2 \mathbf{y}}{\delta t^2} = v^2 \left(\frac{\delta^2 \mathbf{y}}{\delta x^2}\right)$$

En cuyo caso la solución de la ecuación de la onda tiene la forma: $y\ (x,t) = f\ (vt - x)$.
Siendo f una función arbitraria de la variable $(x - vt)$, dos veces diferenciable.
Veamos el caso en el que su perfil sea una sinusoide. Como habíamos dicho, Fourier obtuvo un teorema matemático, por el cual, cualquier vibración real puede descomponerse en suma de funciones sinusoidales:

$$y(x,0) = A \cdot sen(k \cdot x) \quad ==> \quad y(x,t) = A \cdot sen[k \cdot (v \cdot t \pm x)]$$

El argumento de la función sinusoidal tiene que ser adimensional, de ahí que se introduzca la constante positiva k, llamada **número de ondas**. La función de onda debe ser doblemente periódica:

$$\left.\begin{array}{l} 1)\ \textit{Espacialmente. A través de la longitud longitud } \lambda: \\ \qquad y(x,t) = y(x \pm \lambda, t) \\ 2)\ \textit{Temporalmente. A través de su período } T: \\ \qquad y(x,t) = y(x, t \pm T) \end{array}\right\} \quad y = A \cdot sen\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

Relacionando esta expresión de la ecuación de onda con la dada anteriormente, se obtiene:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad ==> \quad \frac{2\pi}{T} = k \cdot v = \frac{2\pi \cdot v}{\lambda} = \omega \quad ==> \quad \left\{\begin{array}{l} v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \\ \\ \omega = 2\pi \cdot f \end{array}\right.$$

Por tanto, la **ecuación fundamental** de la **onda** toma las formas:

$$y(x,t) = A \cdot sen\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right)\right] = A \cdot sen(\omega \cdot t \pm k \cdot x) = A \cdot sen[k \cdot (v \cdot t \pm x)]$$

(-) si la onda viaja hacia la derecha.
(+) si la onda viaja hacia la izquierda.

Fase y velocidad de fase

Ya hemos definido el concepto de **fase** en el movimiento armónico. En el caso general del movimiento ondulatorio, sería el argumento de la función sinusoidal: $\delta = \omega t \pm kx$.
La función de onda que posea esta fase es un caso realmente especial, puesto que para $t = 0$ s y $x = 0$ m ==> $\Psi(0,0) = 0$.

Sin embargo, no hay razón para que la magnitud de la onda no pueda tener cualquier valor para t = 0 s y x = 0 m. Esto se consigue introduciendo la fase inicial δ_0, tal que:

$$\delta = \omega\, t \pm k\, x + \delta_0$$

Habíamos visto que la velocidad de propagación de la onda venía dada por: $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$

Esta es la llamada **velocidad de fase**. Esta depende del tipo de onda que se propaga (longitudinal o transversal) y del medio en que se propaga la onda (sólido, líquido o gas):

1) **Sólidos**. En estos, las ondas transversales se propagan siempre más lentamente que las longitudinales: se utiliza, por ello, en los fenómenos sísmicos.
   En el caso de la deformación de sólidos en forma de hilos, pueden aparecer ondas longitudinales y transversales, cuyas velocidades vienen dadas por:

$$\left.\begin{array}{l} v_L = \sqrt{\dfrac{E}{\rho}} \\ v_T = \sqrt{\dfrac{T}{\mu}} \end{array}\right\} \begin{array}{c} E = \dfrac{l}{\Delta l}\dfrac{F}{S}, \text{módulo de Young} \\ \rho \text{ y } \mu \text{ so densidades volumétricas y lineal, respectivamente} \\ T \text{ es la tensión del hilo} \end{array}$$

2) **Líquidos y Gases**. En estos sólo puede ocurrir compresión y dilatación volumétricas (presiones) => sólo cabe esperar en ellos la propagación de ondas longitudinales.

No debemos confundir la velocidad de fase con la velocidad de las partículas que componen el medio:

$$y(x,t) = A \cdot sen\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

$$v_P = \frac{dy}{dt} = A \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

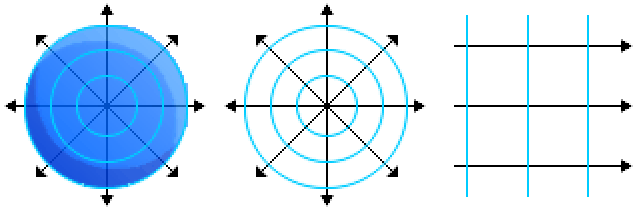
Siendo la aceleración de dichas partículas:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -A \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot sen\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

$$a = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot y \quad ==> \quad F = -m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot y = -k \cdot y$$

Frentes de ondas

De forma general, una superficie sobre la cual la fase de una onda es constante se llama **frente de onda**. Los frentes de onda pueden ser circulares, planos, esféricos... Ejemplos:



Frentes esféricos Frentes circulares Frentes planos

Energía e intensidad del movimiento ondulatorio

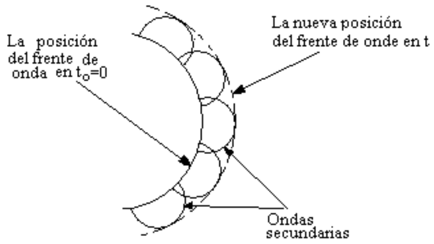
Como hemos visto anteriormente, el movimiento ondulatorio consiste en la propagación de una perturbación de un punto del espacio a otro, sin transporte neto de materia. Por tanto, en dicho movimiento lo que ocurre es la transmisión de energía y cantidad de movimiento de un punto a otro.
El valor que toma la energía en un movimiento ondulatorio es:

$$W = \frac{1}{2}\, m\, A^2\, \omega^2 = 2\pi^2\, m\, A^2\, f^2$$

La energía transmitida de una partícula a otra, energía de la onda, es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia del movimiento.

Principio de Huygens

Este supone que cada punto del frente de ondas alcanzado por la perturbación se convierte en "fuente secundaria" de emisión: cada punto del frente emite nuevas ondas con las mismas características que la onda original:



El nuevo frente de ondas es la curva que une los puntos alcanzados por las ondas secundarias (creadas en el frente de ondas a, b, c...).

Esta interpretación es adecuada en ondas materiales (las vibraciones se transmiten de una partícula a otra del medio), pero inadecuada en ondas electromagnéticas, que se propagan por el vacío.
Tampoco contempla Huygens la posibilidad de propagación hacia atrás de la onda, que aunque no ocurre realmente, no sería descartable en su teoría. Por ello, Kirchoff hizo unas modificaciones en la teoría:

1) El principio es válido para cualquier tipo de ondas.
2) Las ondas de retroceso poseen energía negativa, y por tanto, no existen.

Principio de superposición

Hemos visto el comportamiento de ondas aisladas, pero muchas veces, las ondas se encuentran en un punto.
Como característica general de las ondas está el hecho de no alterar su naturaleza al cruzarse, al contrario de los objetos, que varían sus movimientos al chocar. Así, podemos enunciar el **principio de superposición** como: "cuando se propagan dos o más ondas por un medio, la perturbación resultante en cada punto del medio es igual a la suma de las perturbaciones que producirían cada una de las ondas por separado" (semejante a la composición de movimientos).
Cuando dos o más ondas coinciden en un punto del medio se habla de **interferencia**.

Interferencia entre ondas. Ondas estacionarias

Hemos visto que la interferencia es el fenómeno físico que resulta al superponerse dos o más trenes de ondas. Vamos a estudiar el caso de dos ondas que viajan en sentidos contrarios, eje OX, encontrándose en fase:

$$\left.\begin{array}{l} y_1 = A \cdot sen\,(\omega \cdot t - k \cdot x) \\ \\ y_2 = A \cdot sen\,(\omega \cdot t + k \cdot x) \end{array}\right\} \quad y = 2A \cdot sen(\omega \cdot t) \cdot \cos(k \cdot x)$$

En este caso se produce el fenómeno de **ondas estacionarias**. La amplitud resultante tiene la forma:

$$A_r = 2A \cdot \cos\,(k \cdot x) = 2A \cdot \cos\,(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda})$$

La amplitud es, pues, función de la distancia, adquiriendo valores máximos cuando:

$$\cos(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}) = \pm 1 => 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda} = n \cdot \pi => \quad x = n \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad \textbf{(VIENTRES)}$$

La amplitud es cero cuando:

$$\cos(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}) = 0 => 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda} = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2} => \quad x = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{4} \qquad \textbf{(NODOS)}$$

Distancia entre vientres consecutivos:	Distancia entre nodos consecutivos:
$d_V = (n+1) \cdot \frac{\lambda}{2} - n \cdot \frac{\lambda}{2} => \quad d_V = \frac{\lambda}{2}$	$d_N = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{4} - (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{4} => \quad d_N = \frac{\lambda}{2}$

Centrándonos en los nodos, como poseen amplitud nula, permanecen constantemente en reposo. Es el caso de las cuerdas de una guitarra, en donde interfieren ondas idénticas que se propagan en sentidos contrarios, ondas estacionarias. En ella, todos sus puntos se mueven con movimiento armónico simple, con la misma frecuencia y amplitud variable, excepto los **NODOS**, que permanecen en reposo, no dejando que se propague la onda (ni la energía, por tanto). Por ello, estas ondas reciben el nombre de **ONDAS ESTACIONARIAS**. Las posibles frecuencias de vibración de la cuerda (de longitud L y unida por sus extremos) viene dada por:

$$\left. \begin{array}{l} L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \\ f = \frac{v}{\lambda} \end{array} \right\} \quad f = n \cdot \frac{v}{2L}$$

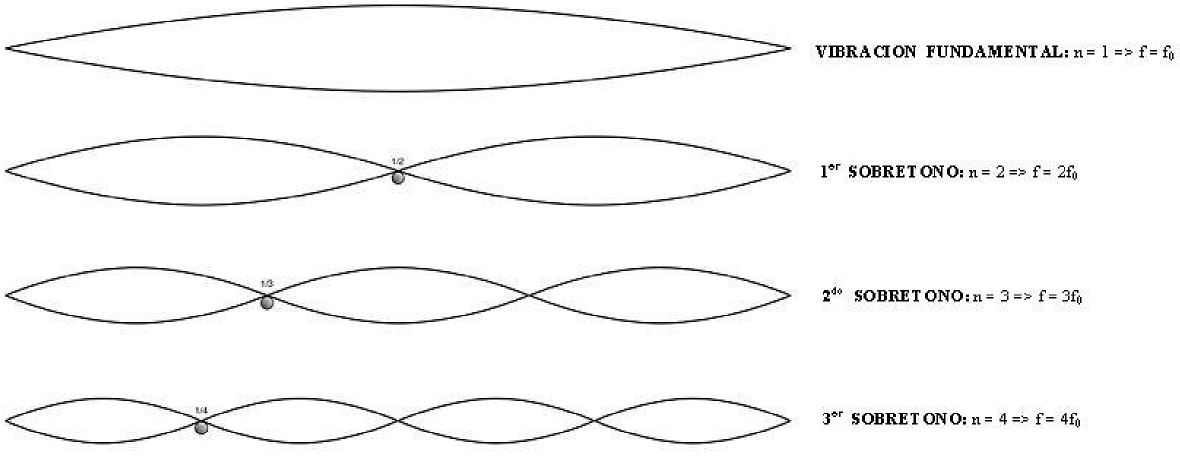
Se denomina **FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN** a:

$$f_0 = \frac{v}{2L}$$

Cualquier frecuencia f será, pues, múltiplo entero de la fundamental:

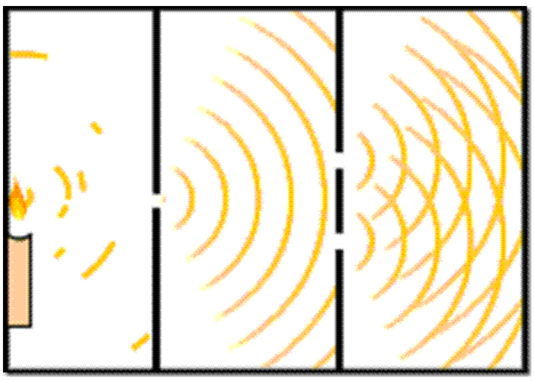
$$f = n f_0$$

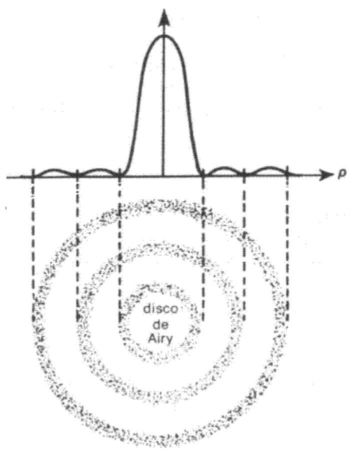
Este hecho introduce el fenómeno de la **CUANTIZACIÓN**, es decir, las frecuencias de vibración están cuantizadas, no pudiendo tomar cualquier valor, sino que serán múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Modos de vibración:



Difracción

Son aquellos fenómenos que no pueden explicarse considerando la propagación rectilínea del movimiento ondulatorio, pero puede interpretarse fácilmente a partir del principio de Huygens:
"cuando en el camino de una onda interponemos un obstáculo de tamaño comparable a la longitud de onda del movimiento ondulatorio considerado, aparecen fenómenos no explicables a través de una propagación rectilínea de las ondas".
El fenómeno de la difracción es tan característico del movimiento ondulatorio, que nos va a permitir saber si un determinado movimiento es, o no, de naturaleza ondulatorio.
¿Por qué es tan difícil observar la difracción con ondas luminosas?
Porque las longitudes de ondas de la luz visible es del orden de 10^{-7} m, apareciendo figuras de difracción sólo cuando el obstáculo tiene un tamaño comparable.
Si en el camino de un haz luminoso ponemos, pues, un obstáculo de tamaño semejante a la longitud de onda del haz, aparece una figura parecida a la dada en la experiencia de Young:



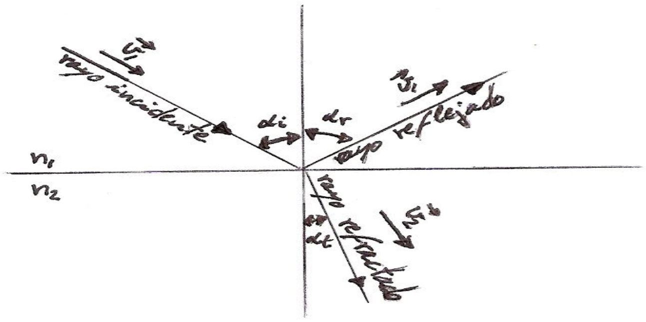


Aparece una serie de franjas claras y oscuras, alternantes, y no una zona central iluminada, como ocurría con una rendija de mayor tamaño.

Ocurre como sí cada punto de la rendija se comportase como foco emisor de ondas secundarias. La interferencia de dichas ondas en la pantalla son la causa de las figuras de difracción.

Reflexión y refracción

Son fenómenos de superficie, es decir, aparecen siempre que una onda encuentra una superficie que separa dos medios.
La **REFLEXIÓN** se produce cuando la onda rebota en una superficie que separa dos medios, continuando su propagación por el mismo medio, pero cambiando su dirección y sentido. Ejemplos: la reflexión de la luz, la reflexión del sonido (el eco)...
La **REFRACCIÓN** se produce cuando la onda atraviesa la superficie de separación de ambos medios, modificándose su velocidad y dirección. Ejemplos: la refracción de la luz...
Normalmente aparecen ambos fenómenos al mismo tiempo.
Según el principio de Huygens, los puntos de la superficie de separación de ambos medios se convierten en focos emisores de nuevas ondas al ser alcanzados.
Esquemáticamente ocurre:



PRIMERO: La onda rebota en la superficie, continuando su viaje por el mismo medio, pero con distinta dirección y sentido (reflexión).
SEGUNDO: La onda pasa al segundo medio, cambiando su velocidad y dirección de propagación (refracción).

El estudio de la reflexión y la refracción lleva a una serie de leyes (llamadas leyes de Snell):

1) El ángulo de incidencia (α_i), de reflexión (α_r) y de refracción (α_t) están en un mismo plano, siendo este perpendicular a la superficie de separación.

2) El ángulo de incidencia (α_i) es igual al ángulo de reflexión (α_r).

3) El cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una constante (llamada índice de refracción, n):

$$\boxed{\frac{sen\,\alpha_i}{sen\,\alpha_t} = n = \frac{c}{v}}$$

Donde c es una velocidad patrón (velocidad de la luz en el vacío en el caso de las ondas electromagnéticas).

En general:

$$\boxed{\frac{sen\,\alpha_i}{sen\,\alpha_t} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}}$$

n_1 es el índice de refracción del medio 1.
n_2 es el índice de refracción del medio 2.