TEMA 2. FENÓMENOS ONDULATORIOS

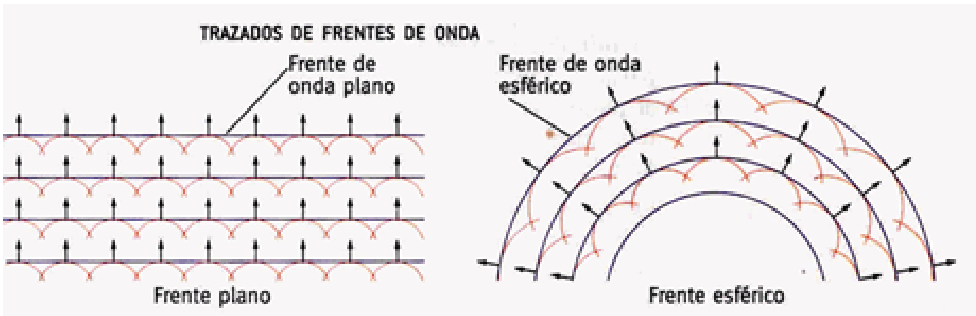
ÍNDICE

1. Principio de Huygens.

En primer lugar, para establecer el principio de Huygens hay que definir el concepto de frente de ondas, el cual puede considerarse como el lugar geométrico de todos los puntos del medio afectados por la perturbación en el mismo instante.

Para que se produzcan frentes de onda simétricos el medio ha de ser homogéneo e isótropo. Se define medio homogéneo a aquel en el que todos los puntos que lo componen tienen las mismas propiedades. Un medio es isótropo si tiene las mismas propiedades en todas sus direcciones.

El principio de Huygens establece que cada punto de un frente de onda se considera como un foco de ondas elementales secundarias que se propagan con la misma velocidad y frecuencia que la onda inicial. Al cabo de un tiempo, el nuevo frente de ondas es la envolvente de estas ondas secundarias.

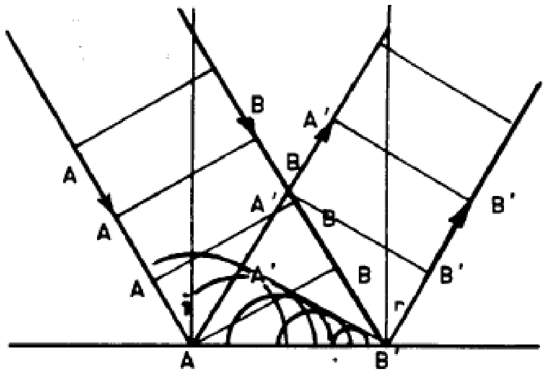


Fuente: www.astrofisicayfisica.com/

La formación sucesiva de nuevos frentes de onda permite explicar la propagación del movimiento ondulatorio.

1.1.Reflexión.

Se define reflexión como el fenómeno físico por el que una onda cuando incide sobre una superficie de separación de dos medios, es devuelta parcial o totalmente al primer medio con un cambio de dirección.



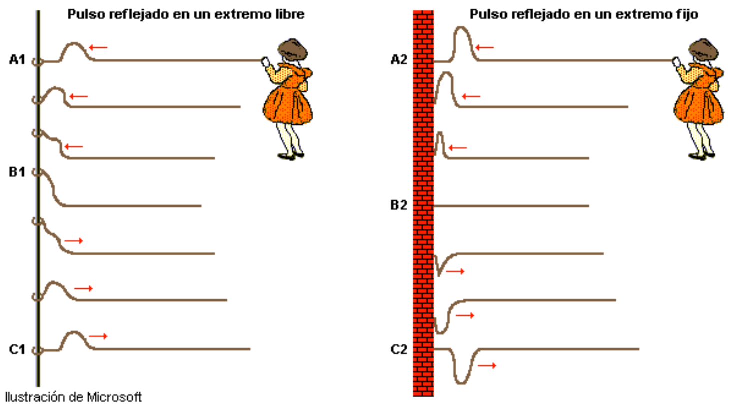
Las leyes de la reflexión son las siguientes:

- El rayo incidente, la normal a la superficie en el punto de incidencia y el rayo reflejado están en el mismo plano.
- Los ángulos de incidencia, î, y de reflexión, r̂, son iguales.

Estos principios se establecen como consecuencia de la aplicación del principio de Huygens al fenómeno de la reflexión, tal y como se puede observar en la siguiente simulación.

Cuando una onda llega a una superficie de separación, la onda reflejada puede cambiar de fase. Para entender este concepto de manera visual, se supone una cuerda tensa que tenga un extremo fijo en la superficie de separación. Cuando la onda llega a la pared, la onda ejerce una fuerza sobre la misma que es respondida por la pared con una fuerza igual y de sentido contrario. Como resultado, el pulso se invierte, creándose un desfase de 180 º o π radianes, pero no cambia la velocidad, la frecuencia ni la longitud de onda.

Esto quiere decir que si la ecuación que se propaga por la cuerda tiene la ecuación $y(x,t) = A \cdot sen(2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}) + \varphi_0)$, la onda reflejada tendrá por ecuación $y(x,t) = -A \cdot sen(2\pi(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}) + \varphi_0)$.

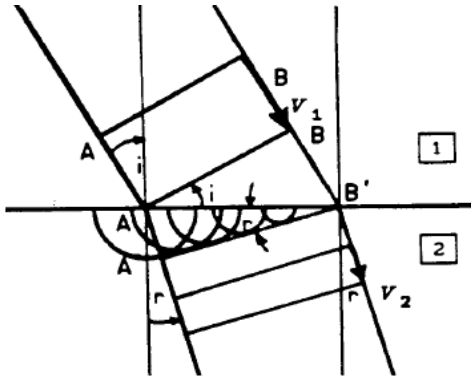


En el caso de que la cuerda no esté unida firmemente a la superficie de separación no se producirá el cambio de fase. Ambos casos se pueden simular en el siguiente enlace.

Como ejemplo de fenómeno de reflexión, uno de los casos más conocidos es el del eco. Este se produce cuando la onda sonora es reflejada al encontrar un obstáculo. Se diferencia de la reverberación en que se debe distinguir la onda emitida de la reflejada, lo que sucede cuando entre ambas discurren unos 0,1 s aproximadamente.

1.2.Refracción.

Se define refracción al cambio en la dirección de propagación que experimenta una onda al pasar de un medio al otro diferente, en el cual la onda se propaga con diferente velocidad al primero.



Las leyes de la reflexión son las siguientes:

- El rayo incidente, el rayo refractado y la recta normal a la superficie están en el mismo plano.
- La relación que hay entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es la misma que hay entre las velocidades de propagación de la onda en los dos medios:

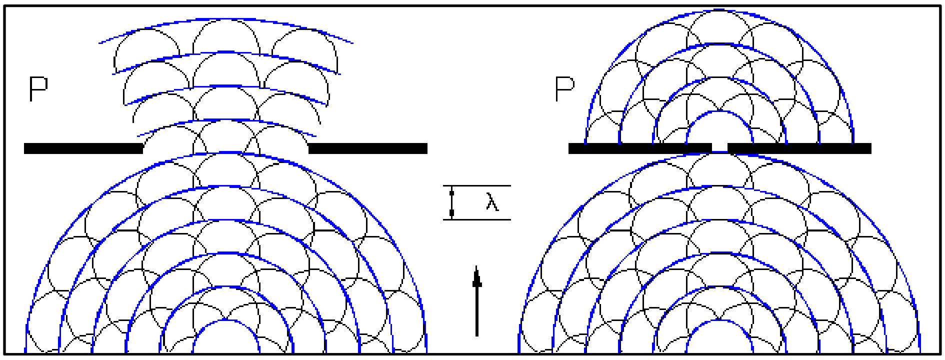
$$\frac{sen\hat{\imath}}{sen\,\hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} = cte$$

2. Difracción.

La difracción es un fenómeno por el cual una onda se reproduce al atravesar una rendija u orificio. Este fenómeno sólo tiene lugar cuando el tamaño de la abertura o rendija es del mismo orden que la longitud de onda, λ, del movimiento ondulatorio.

Cuando un frente de ondas llega a un obstáculo con una rendija, la propagación de la onda detrás del obstáculo depende del tamaño de la rendija. Si el tamaño es lo suficientemente grande las ondas continúan su camino detrás de la rendija si experimentar apenas distorsión.

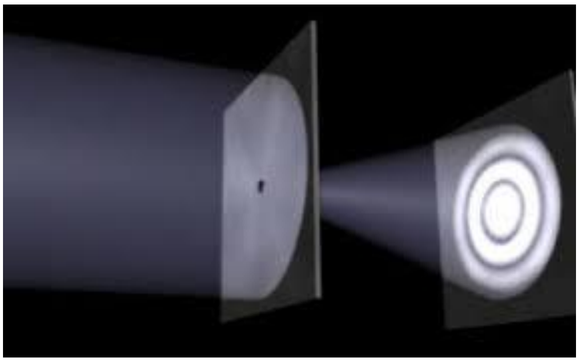
Si el tamaño de la rendija es del mismo orden de magnitud de la longitud de onda, la perturbación llega a las partículas situadas detrás del obstáculo.



a) No se produce difracción b) Se produce difracción.

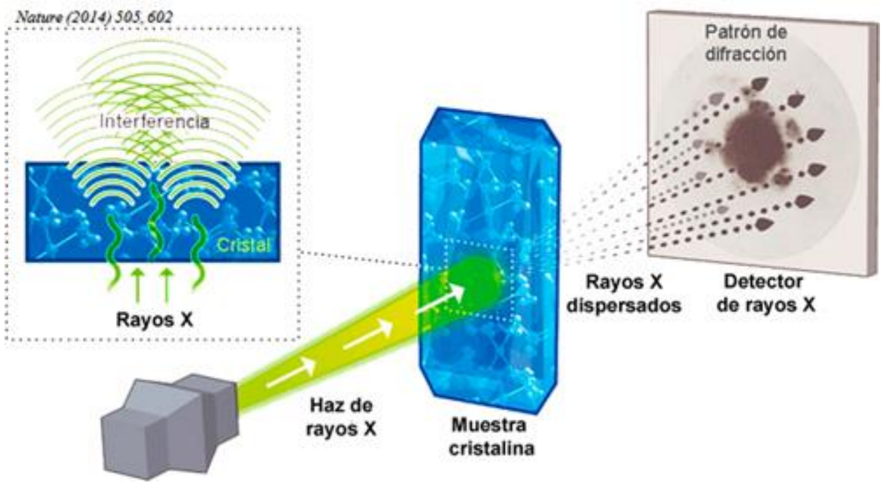
Fuente: web.educastur.princast.es.

En la siguiente animación se puede observar la creación de un fenómeno de difracción al reducir la longitud de la rendija en una superficie de separación.



Patrón de difracción generado por un orificio circular. Fuente: www.ugr.com

Este fenómeno tienen muchas aplicaciones en diversas ramas de la ciencia . Una de las más conocidas enes la difracción de rayos X. Debido a que los rayos X son ondas electromagnéticas con longitud de onda del orden de 0,1 nm. Para provocar un fenómeno de difracción es necesaria una rendija del mismo orden de magnitud, como son la distribución de los átomos en una estructura cristalina. De esta manera se pueden extraer datos sobre las estructuras cristalinas.



Difracción de rayos X para determinar una estructura cristalina. Fuente: departamento de CBE, CSIC.

3. Interferencias.

3.1.Principio de superposición.

El análisis del fenómeno de interferencia se fundamente en el denominado principio de superposición, según el cual la perturbación instantánea en un punto por el que pasan dos o más ondas es la suma de las perturbaciones que produciría cada onda separadamente.

Desde el punto de vista físico, significa que cada onda individualmente considerada se propaga en el medio como si no existieran las demás. Es decir, la ecuación de onda particular no se ve modificada por la existencia de otra u otras ondas presentes. Sin embargo, el efecto conjunto de todas ellas en un punto será diferente del que se produciría si cada uno actuara por separado. Este principio tiene sus limitaciones, siendo válido, de manera estricta, para ondas electromagnéticas y ondas mecánicas de pequeña amplitud, como por ejemplo, las ondas sonoras.

En la siguiente animación se puede observar el resultado de un fenómeno de interferencia debido a dos ondas provocadas en dos focos diferentes.

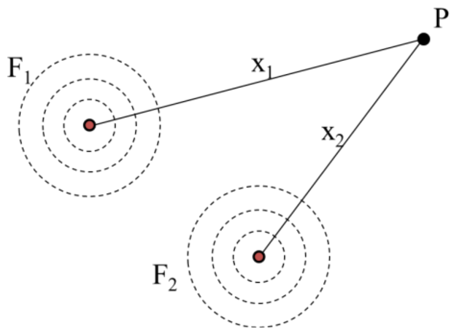
El fenómeno de interferencia más común es la difracción en la doble rendija. Es explicable a partir del principio de Huygens, debido a que los puntos del orificio se comportan como focos de ondas secundarias que dan lugar al fenómeno de interferencia que se describirá a continuación, que en unos puntos será constructiva y en otros destructiva con la consiguiente aparición de máximos y mínimos.

3.2.Interferencia de ondas armónicas coherentes.

Los fenómenos de interferencia únicamente se podrán observar si las ondas tienen la misma frecuencia y proceden de focos coherentes, es decir, que las fuentes de onda que las producen tengan una diferencia de fase en la emisión que sea constante con el tiempo.

Se suponen dos focos emisores de ondas armónicas coherentes. Sea un punto P a una distancia de los focos a x_1 y x_2. La perturbación resultante se puede calcular a partir de las dos ecuaciones de onda individuales:

$$y_1(x,t) = A \cdot sen\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right)$$
$$y_2(x,t) = A \cdot sen\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right)$$



Según el principio de superposición, la onda resultante será:

$$y = y_1 + y_2 = A \cdot \left[sen\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right) + sen\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right)\right]$$

Para poder desarrollar la expresión anterior hay que utilizar una de las propiedades de las funciones trigonométricas:

$$sen\alpha + sen\beta = 2 \cdot sen\frac{\alpha + \beta}{2} \cdot cos\frac{\alpha - \beta}{2}$$

De acuerdo con esto, la función de onda anterior queda:

$$y = 2 \cdot A \cdot \left[sen\frac{\left(2\cdot\pi\cdot\left(\frac{t}{T}-\frac{x_1}{\lambda}\right)\right)+\left(2\cdot\pi\cdot\left(\frac{t}{T}-\frac{x_2}{\lambda}\right)\right)}{2} \cdot cos\frac{\left(2\cdot\pi\cdot\left(\frac{t}{T}-\frac{x_1}{\lambda}\right)\right)+\left(2\cdot\pi\cdot\left(\frac{t}{T}-\frac{x_2}{\lambda}\right)\right)}{2}\right]$$

$$\boxed{y = 2 \cdot A \cdot \left[cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x_2 - x_1}{2 \cdot \lambda}\right) \cdot sen\left(2 \cdot \pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1 + x_2}{2 \cdot \lambda}\right)\right)\right]}$$

Por lo general, a todos los factores que no dependen del tiempo se agrupan en un término que se denomina amplitud resultante, A_r, de tal manera que la ecuación del movimiento a la que está sometido el punto queda de la siguiente manera:

$$\boxed{y = A_r \cdot sen\left(2 \cdot \pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1+x_2}{2\cdot\lambda}\right)\right)} \quad \text{donde} \quad A_r = 2 \cdot A \cdot cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x_2-x_1}{2\cdot\lambda}\right)$$

Tal y como se deduce de la ecuación, el punto P sobre el cual se está determinando la interferencia vibra armónicamente con la misma frecuencia que los focos y con una amplitud A_r que depende de la diferencia entre las distancias del punto P a los focos.

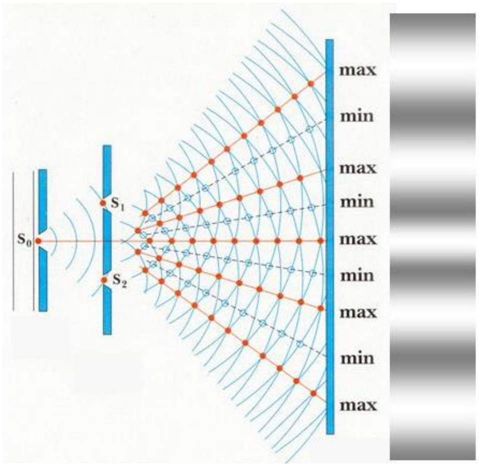
3.3.Interferencias constructiva y destructiva.

Consecuencia de la superposición de dos ondas en un punto P determinado puede producirse un reforzamiento de la amplitud de la onda resultante o una disminución. A los casos extremos, aquellos en los que la amplitud resultante es máxima o mínima se le denomina interferencia constructiva e interferencia destructiva.

Se puede calcular aquellos puntos en los que se producirá ambos efectos utilizando la expresión de la diferencia de fase:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{x_2 - x_1}{\lambda}$$

Para hallar los puntos en los que se produce la interferencia constructiva y destructiva se utiliza la expresión de la amplitud resultante, $A_r = 2 \cdot A \cdot cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$, que tiene un valor en cada punto del espacio que depende de la diferencia de fase con que llegan las ondas a el punto.



Patrón de interferencia de difracción por doble rendija.

Interferencia constructiva:

De la expresión de la amplitud resultante se deduce que es máxima si se cumple la siguiente condición:

$$cos\frac{\Delta\varphi}{2} = \pm 1 \rightarrow \frac{\Delta\varphi}{2} = n \cdot \pi \rightarrow \Delta\varphi = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot \frac{x_2 - x_1}{\lambda}$$

$$\boxed{(x_2 - x_1) = n \cdot \lambda}$$

La amplitud resultante A_r es máxima y se produce una interferencia constructiva en aquellos puntos del medio para los cuales la diferencia entre las distancias a cada foco es un número entero de longitud de onda. Las ondas llegan en concordancia de fase a estos puntos, denominados vientres.

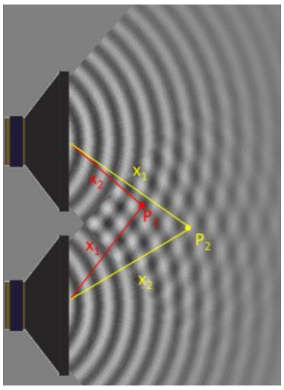
Interferencia destructiva:

De la expresión de la amplitud resultante se deduce que es mínima si se cumple la siguiente condición:

$$cos\frac{\Delta\varphi}{2} = 0 \rightarrow \frac{\Delta\varphi}{2} = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2} \rightarrow \Delta\varphi = \pi \cdot (2n+1) = 2 \cdot \pi \cdot \frac{x_2 - x_1}{\lambda}$$

$$\boxed{(x_2 - x_1) = (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}}$$

La amplitud resultante es cero y se produce una interferencia destructiva en aquellos puntos del medio para los cuales la diferencia de camino a los focos es un número impar de semilongitudes de onda. Las ondas llegan en oposición de fase a estos puntos, denominados nodos.



La interferencia destructiva producirá nodos con amplitud cero en el caso de que se produzca una interferencia con ondas de igual amplitud. En caso contrario, la amplitud de la onda no llega a ser cero en ningún punto del medio.

En la imagen se observa un fenómeno de interferencia provocado por dos focos con igual amplitud y frecuencia. En la zona de interferencia aparecen pequeñas regiones de diferente color. Las más oscuras corresponden a puntos en los que se produce una interferencia constructiva (P_1), mientras que las zonas más claras se producen interferencias destructivas (P_2).

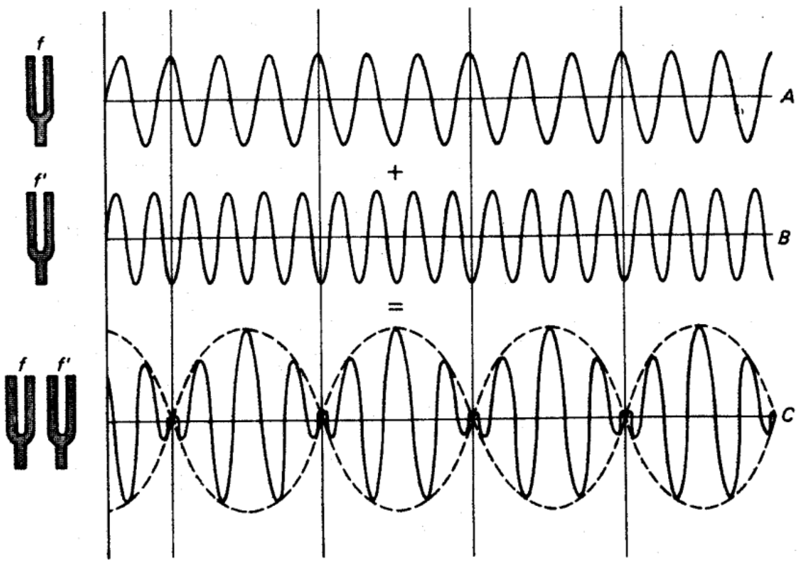
3.4.Pulsaciones.

Los movimientos ondulatorios no son movimientos ondulatorios puros de una única longitud de onda. Se presentan en general como grupos de movimientos ondulatorios de longitudes de onda λ variadas y próximas, llamados *trenes de ondas o pulsos*.

Si se considera la superposición en igual dirección y sentido de dos movimientos ondulatorios de igual amplitud y diferencia pequeña de sus longitudes de onda (y por tanto de sus frecuencias) se pueden describir la siguientes características:

- La frecuencia promedio es la semisuma de las frecuencia de las dos ondas: $\nu_0=(\nu_1+\nu_2)/2$.
- La frecuencia de la pulsación, que es la frecuencia con la que un punto se convierte en nodo, es la diferencia de las frecuencia de las dos ondas: $\nu_p=(\nu_1-\nu_2)$.
- El tiempo que separa dos pulsaciones es la inversa de la frecuencia de pulsación: $T=1/\nu_p$.
- La amplitud de la onda resultante no es constante, sino que varía sinusoidalmente con el tiempo. Como la intensidad es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud, se producen fluctuaciones (o pulsaciones) periódicas de la intensidad de onda.

En la figura se puede observar este fenómeno claramente si se hace vibrar dos diapasones que produzcan frecuencias muy parecidas. El sonido que se percibiría sería muy parecido al que generaría cada elemento por separado, pero con altibajos periódicos en la intensidad del sonido.



Fuente: http://www.eumus.edu.uy/

4. Ondas estacionarias.

Se define onda estacionaria como aquella que resulta de la **interferencia de dos ondas armónicas de igual amplitud y frecuencia que se propagan en la misma dirección pero sentido contrario.**

4.1.Ecuación.

Para definir la ecuación de una onda estacionaria se considera una onda transversal unidimensional engendrada en una cuerda y que se refleja en el extremo de sujeción de la cuerda, formándose otra onda que tiene la misma amplitud, longitud de onda, sentido contrario y desfase de 180º. La interferencia de ambas ondas generara la onda estacionaria:

$$y_1 = A \cdot sen\left[2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]; \qquad y_2 = -A \cdot sen\left[2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

La interferencia de ambas ondas generara la onda estacionaria:

$$\boxed{y = y_1 + y_2 = 2 \cdot A \cdot sen\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) \cdot cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T}\right)}$$

Esta ecuación se puede poner en función de la amplitud resultante A_r de la siguiente manera:

$$y = A_r \cdot cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T}\right); \; A_r = 2 \cdot A \cdot sen\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right)$$

Si tenemos en cuenta que $w = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ y que $\kappa = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$, la ecuación de la onda armónica unidimensional se puede expresar de la manera siguiente:

$$\boxed{y = 2 \cdot A \cdot sen(\kappa x) \cdot cos(wt)}$$

4.2.Vientres y nodos.

La amplitud resultante de la onda estacionaria varía sinusoidalmente con la posición, por lo que existirán puntos en los que la amplitud será máxima, denominados vientres, y puntos donde la amplitud se anula denominados nodos.

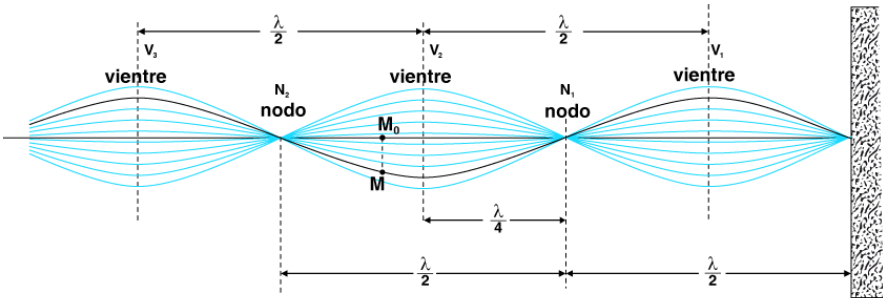
- La amplitud máxima se produce en aquellos puntos cuya distancia al origen es un número por la semilongitud de onda. Se denominan **vientres.**

$$\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x = n \cdot \frac{\pi}{2} \rightarrow x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

- La amplitud de la onda estacionaria se anula en los puntos cuya distancia al origen es un número impar de cuartos de longitud de onda. Se denominan **nodos**:

$$\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x = (2n+1)\frac{\pi}{2} \rightarrow x = (2n+1)\frac{\lambda}{4}$$

De estas deducciones se extrae que la distancia entre dos vientres o dos nodos consecutivos es igual a la mitad de la longitud de onda, lo que quiere decir que la distancia entre un vientre y el nodo más cercano es de λ/4.



En el siguiente video se pueden observar los patrones de nodos y vientres de ondas estacionarias bidimensionales en una placa metálica a diferentes frecuencias. Estos patrones se denominan figuras de Chladni.

4.3.Ondas estacionarias en cuerdas y tubos.

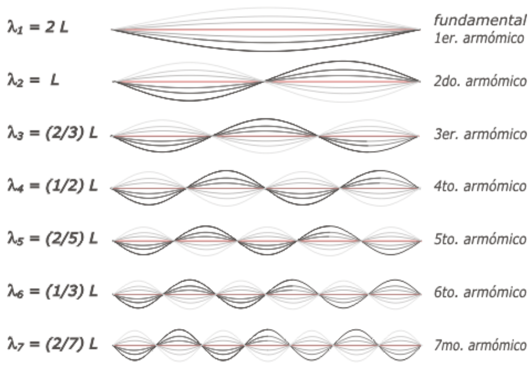
4.3.1. Ondas estacionarias en cuerdas.

El ejemplo más evidente de onda estacionaria son las producidas en una cuerda tensa y flexible. Se puede considerar el caso de que la cuerda está fija en un extremo o por ambos.

Cuerda fija por sus dos extremos.

En el primer caso, se observa que sólo se obtienen ondas estacionarias para determinadas frecuencias de vibración. Cada una de estas frecuencias de vibración se le denomina frecuencias de resonancia, correspondiéndole a cada una de ellas un modo normal de vibración.

A la frecuencia de resonancia más baja se le llama frecuencia fundamental y el modo de vibración que origina se llama primer armónico. El segundo armónico se produce para una frecuencia doble de la fundamental, el tercer armónico se produce para una frecuencia triple de la fundamental, y así sucesivamente.

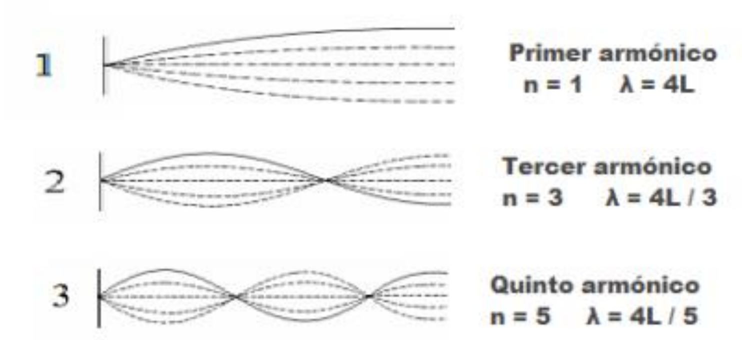


Tal y como se observa en el gráfico, la longitud de onda del primer armónico será el doble de la longitud de la cuerda: $\lambda=2\cdot L$. La longitud de onda del segundo armónico será la mitad de la del primer armónico y así sucesivamente, tal y como se observa en el gráfico.

En la siguiente animación se pueden observar la creación de [Ondas estacionarias en una guitarra]

Cuerda fija por sus un extremo.

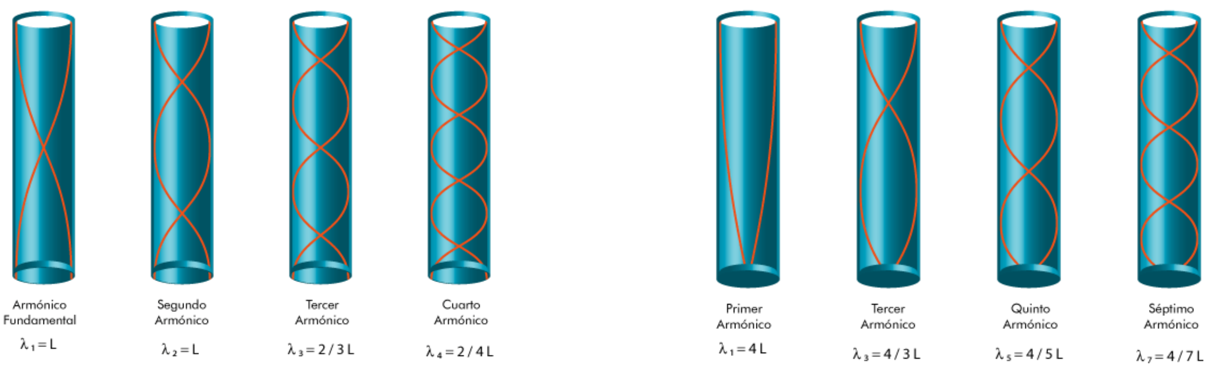
En este caso se formarán ondas estacionarias si la longitud de onda contiene un número impar de cuartos de longitud de onda, por lo que no existen los armónicos pares.



4.3.2. Ondas estacionarias en tubos.

Las ondas de presión que circulan por el aire contenido dentro de un tubo también puede dar origen a ondas estacionarias por reflexión en los extremos. Se diferencia con las cuerdas en que en los extremos se producen vientres en vez de nodos en el caso de que el tubo este cerrado por ambos extremos. También se puede dar el caso de que un extremo este abierto y el otro cerrado.

La longitud de onda del primer armónico y los valores de frecuencia y de longitud de onda de los armónicos es igual al caso de ondas estacionarias creadas en una cuerda unida por sus dos extremos. En el caso de que el tubo esté abierto por uno de los extremos el análisis es igual al realizado en una cuerda unida por un solo extremo.

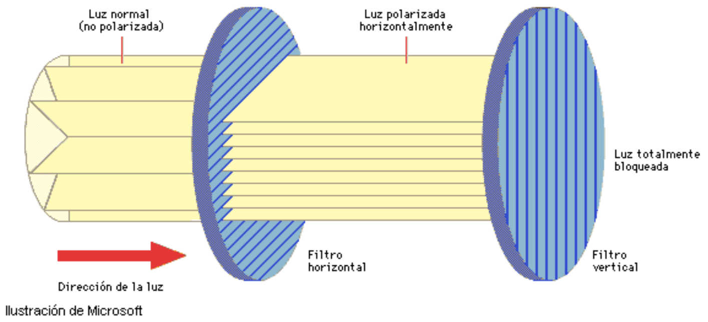


a) Ondas estacionarias en un tubo cerrado por ambos extremos b) Ondas estacionarias en un tubo cerrado por un extremo

5. Polarización.

La polarización es el fenómeno ondulatorio según el cual se produce la restricción de la dirección de vibración del medio de propagación de una onda transversal.

Para entender este fenómeno hay que suponer que determinadas ondas transversales se puede producir la oscilación de las partículas del medio en infinitas direcciones perpendiculares a la propagación del a onda. Cuando dichas ondas atraviesan un determinado medio, este actúa como filtro reduciendo o directamente anulando la oscilación en aquellas direcciones que no interesan, quedando como dirección principal o única dirección de vibración aquella que permita dicho filtro.



Existen varios tipos de polarización, siendo la más sencilla aquella provocada por un plano de polarización que permanece invariable con el tiempo, denominada polarización lineal. Sin embargo, otros tipos de polarización como la circular implican la variación con el tiempo de dicho plano de polarización.

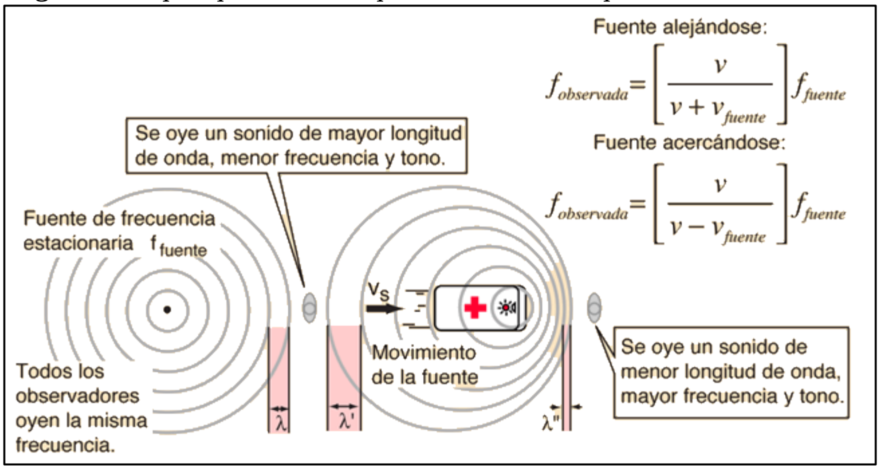
Las aplicaciones tecnológicas de la polarización están sumamente extendidas. Quizás los ejemplos más comúnmente encontrados son las pantallas de cristal líquido (LCD), las gafas de sol de cristal polarizado y los filtros polarizadores utilizados en fotografía. Como la gran mayoría de las aplicaciones están relacionadas con la polarización de ondas electromagnéticas, este aspecto se retomará en el tema correspondiente a las ondas electromagnéticas.

6. Efecto Doppler.

El efecto Doppler es el cambio que se observa en la frecuencia de cualquier movimiento ondulatorio cuando el foco emisor y el receptor se desplazan uno respecto al otro.

Hay que tener en cuenta que en la propagación de un movimiento ondulatorio se puede dar el caso en el que el foco emisor se esté moviendo, se mueva el receptor o ambos, en la misma dirección o en direcciones opuestas. En cualquiera de los tres casos, la frecuencia emitida por el foco no se corresponde con la frecuencia que recibe el receptor.

El ejemplo más claro y cotidiano de efecto Doppler es la variación de timbre que observamos cuando una ambulancia se acerca a nuestra posición y posteriormente se aleja (se puede observar dicho efecto en la siguientes simulación 1 y simulación 2). Conforme la ambulancia se acerca, observamos que se oye más agudo, lo que quiere decir que su frecuencia aumenta, mientras que cuando se aleja el sonido de la sirena se percibe más grave, lo que quiere decir que la frecuencia que recibimos ha disminuido.



Fuente: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu.

La frecuencia percibida por un observador se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\nu_{obs} = \nu \cdot \frac{c \pm v_{obs}}{c \pm v_{foco}}$$

Donde:
- ν_{obs}es la frecuencia que percibe el observador.
- c la velocidad de propagación de la onda.
- v_{obs} es la velocidad del observador. Se toma positiva si el observador se aproxima al foco y negativo si se aleja.
- v_{foco} es la velocidad del foco emisor de la onda. El signo será negativo si se aproxima al observador y positivo si se aleja.

La búsqueda de exoplanetas tiene su fundamento en el efecto Doppler, tal y como puede leerse en el siguiente artículo del blog de divulgación científica naukas.

Bibliografía

- Física 2º bachillerato. Editorial Edebé, 2016. ISBN 978-84-683-1768-7.
- Física 2º bachillerato. Editorial Anaya, 2009. ISBN: 978-84-667-8263-0.
- Física 2º bachillerato. Editorial McGraw Hill, 2009. ISBN: 978-84-481-7027-1.
- Escuela universitaria de música http://www.eumus.edu.uy/eum/.
- Naukas. Artículo “Cármenes o aquí también buscamos exoplanetas” http://naukas.com/
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. http://acer.forestales.upm.es/
- Phet Interactive simulations. University of Colorado Boulder. https://phet.colorado.edu/
- Blog astrofísica y física. http://www.astrofisicayfisica.com/
- Simulaciones Walter Fendt. http://www.walter-fendt.de.
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC): www.csic.es
- Universidad de Granada: www.ugr.es