Una onda es una perturbación que se propaga. Con la palabra “perturbación” se quiere indicar cualquier tipo de alteración del medio: una ondulación en una cuerda, una compresión en el aire (onda sonora), campos electromagnéticos oscilantes (onda electromagnética)… etc.

Clasificación según el medio de propagación

La mayor parte de las ondas necesitan un medio elástico que haga posible la propagación de la perturbación de un punto a otro. Son las llamadas ondas materiales o mecánicas. Son ondas materiales: el sonido (que necesita el aire para su propagación), las ondas que se producen al agitar una cuerda (se propagan a través de la cuerda),... etc.

Las ondas electromagnéticas, por el contrario, no necesitan ningún medio para propagarse. Pueden hacerlo en el vacío. Son ondas electromagnéticas: la luz, las ondas de radio y televisión...etc.

Clasificación según dirección de perturbación/propagación

En ***las ondas transversales*** la dirección en la que se produce la perturbación y la dirección en la que se propaga son perpendiculares. Son ejemplos de ondas transversales las ondas electromagnéticas, la onda que se transmite en una cuerda, las ondas en la superficie de un lago…etc

En las ***ondas longitudinales*** la dirección de perturbación y la de propagación es la misma.

El sonido es una onda longitudinal.

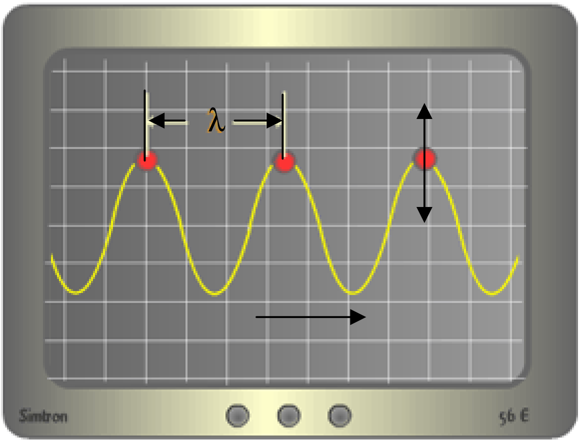
Es muy importante diferenciar entre el movimiento que tienen los puntos del medio cuando son alcanzados por la onda y el movimiento de la propia onda. Los puntos oscilan alrededor de su posición de equilibrio, mientras que la onda se traslada hacia la derecha, por ejemplo.

Dependiendo de la distancia a la que estén situados los puntos del medio pueden oscilar a la vez o no. Cuando oscilan a la vez se dice que **están en fase..** (ver fig.)

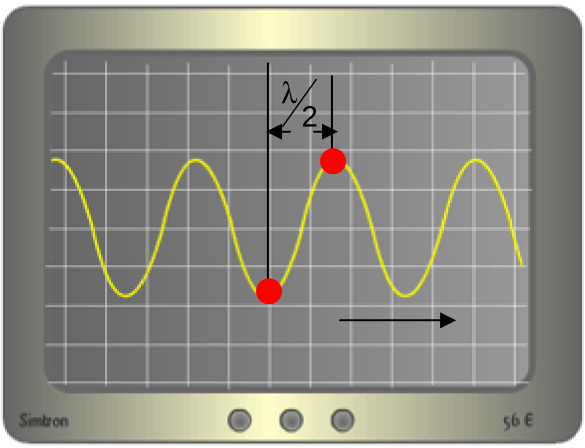
Se denomina longitud de onda, λ**, la distancia mínima existente entre dos puntos que oscilan en fase**.

Dos puntos están en fase cuando están separados una distancia igual a un número entero de longitudes de onda:

$$\Delta x = \lambda, 2\lambda, 3\lambda\ldots = n\lambda$$



La onda se propaga de izda. a dcha. Los puntos del medio oscilan arriba y abajo al ser alcanzados por la onda y a la vez, ya que están separados por una distancia igual a la longitud de onda. ***Están en fase***



Puntos que oscilan ***en oposición***

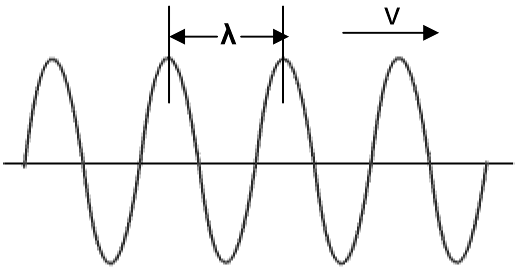
Si no oscilan a la vez se dice que **están desfasados.** Un desfase importante es el de dos puntos que oscilan de forma tal que cuando uno está situado en una cresta el otro lo está en un valle (ver figura). Se dice que **oscilan en oposición.**

En la figura adjunta los dos puntos que oscilan en oposición están separados por una distancia igual a media longitud de onda:

Dos puntos oscilan en oposición cuando están separados una distancia igual a un número impar de semilongitudes de onda:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}, 3\,\frac{\lambda}{2}, 5\,\frac{\lambda}{2} = (2n+1)\,\frac{\lambda}{2}$$

Cuando la onda se traslada una distancia igual a la longitud de onda los puntos del medio realizan una oscilación completa.



Se denomina periodo (T) el tiempo que la onda tarda en recorrer una distancia igual a la longitud de onda. Se mide en segundos. También se puede definir el periodo como el tiempo que tarda un punto en dar una oscilación completa.

Para medir el periodo de una onda se toma como referencia una de las crestas de la misma y se determina el tiempo que tarda en pasar la siguiente.

Se define la frecuencia (f) como el inverso del periodo. Se mide en s^{-1} o Hz (herzios)

$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

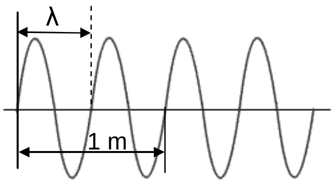
Físicamente la frecuencia se corresponde con el número de oscilaciones que un punto realiza en un segundo.

Velocidad de propagación de una onda (v) es la rapidez con la que ésta se traslada en el medio en el que se propaga:

$$\boxed{v = \frac{e}{t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \frac{1}{T} = \lambda\, f}$$

Se denomina ***número de onda ($\tilde{\nu}$)*** al número de oscilaciones que presenta la onda por unidad de distancia (metro) y es la inversa de la longitud de onda. Se mide en m^{-1}.

$$\boxed{\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}}$$



$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,5\,m} = 2\,m^{-1}$$

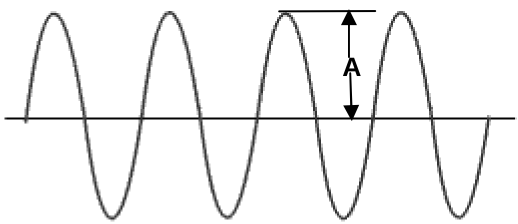
La velocidad de propagación para las ondas materiales depende de las propiedades del medio en el que se propagan. Por ejemplo, para una cuerda tensa depende de su tensión y de la densidad lineal de masa.

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad T = \text{Tensión} \; ; \; \mu = \text{Densidad lineal de masa} : \frac{m}{L}$$

Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío (y en el aire) con una velocidad de **300 000 km/s**. En los demás medios (agua, vidrio…) se propagan más lentamente.

Amplitud (A) es el valor máximo que adquiere la perturbación.

Para medirlo se determina el valor de la altura de una cresta desde la línea base (la que divide en dos a la onda).



Los colores que podemos percibir son ondas electromagnéticas de distintas frecuencias:

Color	Frecuencia (valor x10^{12}Hz)
Rojo	450
Naranja	475
Amarillo	515
Verde	600
Azul	650
Violeta	725

La intensidad de una luz está relacionada con la amplitud de la onda. Una luz más intensa se corresponde con una amplitud mayor.

En el sonido la frecuencia está relacionada con el tono (agudo a grave) y la amplitud con el volumen (débil o fuerte).

Notas	Frecuencia (Hz)
Do	264
Re	297
Mi	330
Fa	354
Sol	396
La	440
Si	495

Ondas armónicas. Ecuación de una onda

De todos los movimientos ondulatorios el movimiento ondulatorio armónico, u ondas armónicas, es de especial importancia. Una onda es armónica cuando provoca en los puntos del medio un movimiento oscilatorio armónico simple (MAS).

La ecuación de una onda armónica es:

Número de onda (m^{-1})

Pulsación (s^{-1})

$$y = A \text{ sen } (kx \pm \omega t + \varphi_0)$$

Valor de la perturbación

Amplitud: valor máximo de la perturbación

Fase inicial (rad)

Signo - para ondas que se propaguen ***hacia la derecha***.

Signo + para ondas que se propaguen ***hacia la izquierda.***

Donde :

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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

De una manera análoga a lo visto para el MAS la ***fase inicial está relacionada con las condiciones iniciales*** o instante en el que se comienza a contar el tiempo (t=0)

Haciendo uso de la definición de k y ω y teniendo en cuenta la relación entre velocidad de propagación de la onda, longitud de onda y periodo: $v = \frac{\lambda}{T}$

se puede escribir la ecuación anterior en otras formas alternativas:

$$y = A \text{ sen } (kx \pm \omega t) = A \text{ sen } \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \pm \frac{2\pi}{T} t\right) = A \text{ sen } 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \pm \frac{t}{T}\right)$$

$$\boxed{y = A \text{ sen } 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \pm \frac{t}{T}\right)}$$

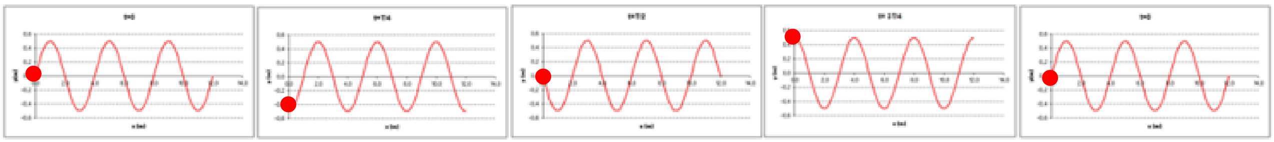
$$y = A \text{ sen } (kx \pm \omega t) = A \text{ sen } \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \pm \frac{2\pi}{T} t\right) = A \text{ sen } 2\pi \left(\frac{x}{vT} \pm \frac{t}{T}\right) =$$

$$= A \text{ sen } \frac{2\pi}{T} \left(\frac{x}{v} \pm t\right)$$

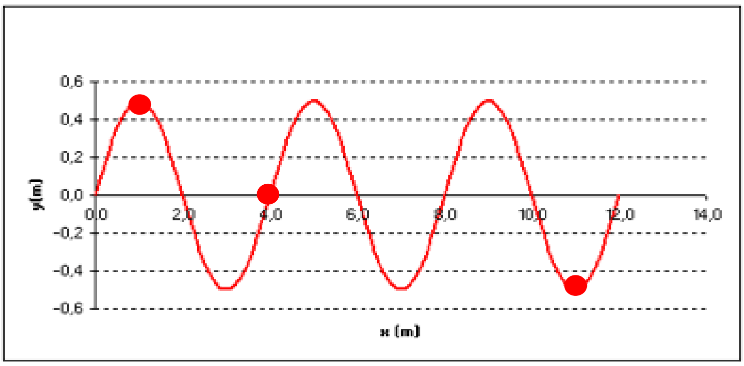
$$\boxed{y = A \text{ sen } \frac{2\pi}{T} \left(\frac{x}{v} \pm t\right) = A \text{ sen } \omega \left(\frac{x}{v} \pm t\right)}$$

Como puede verse la ecuación de una onda armónica es doblemente periódica. Esto es, depende (senoidalmente) de dos variables: tiempo (t) y posición respecto del origen (x).

Para darnos cuenta de esta doble periodicidad tenemos que tener muy presente que una onda no es algo estático, sino que se mueve (hacia la derecha, por ejemplo). Por tanto, el valor de la elongación (y) en cualquier punto depende de no sólo del tiempo transcurrido (como ocurría en el MAS), sino de su distancia al origen. En la figura situada debajo se muestran unas instantáneas de una onda que se desplaza hacia la derecha tomadas a intervalos regulares de T/4 s. Si nos fijamos en uno de los puntos (el lleno, por ejemplo) su distancia al origen es contante (cero), pero su elongación (la y) varía con el tiempo. Oscila con MAS.



t = 0 | t = T/4 | t = T/2 | t = 3/4 T | t =T



Si fijamos ahora el tiempo (tomando una instantánea de la onda) vemos que la elongación (y) de un punto depende de su distancia al origen (de x). En resumidas cuentas, para saber cuál es la elongación de un punto deberemos conocer el tiempo y la distancia al origen.

La ecuación de una onda tiene una doble dependencia: del tiempo y de la distancia al origen.

Ondas armónicas. Velocidad y aceleración

Para calcular la velocidad de un punto de una onda obtenemos la derivada respecto del tiempo de la ecuación de onda (hay que tener en cuenta que la derivada sería entonces parcial, ya que la elongación de un punto depende de t y de x). Para calcular la aceleración obtenemos la derivada (parcial) de la velocidad respecto del tiempo. Para una onda que se desplace hacia la derecha, se tiene:

$$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \varphi_0)$$

$$\boxed{\begin{aligned} \left(\frac{dy}{dt}\right)_x &= \frac{\delta y}{\delta t} = v = -\,\omega A \cos\ (kx - \omega t + \varphi_0) \\ \left(\frac{dv}{dt}\right)_x &= \frac{\delta v}{\delta t} = a = -\,\omega^2 A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \varphi_0) \end{aligned}}$$

Podemos también realizar estos cálculos teniendo en cuenta que los puntos se mueven con MAS y que su velocidad y aceleración vienen dados por (recordar que el movimiento tiene lugar según el eje Y):

$$v = \omega \sqrt{A^2 - y^2}$$
$$a = -\,\omega^2 y$$

Ejemplo 1 (Oviedo, 2006-2007)

La ecuación de una onda, expresada en unidades S I, viene dada por $A(x,t) = A_0 \text{sen}(2{,}5x - 4t)$

Calcular su velocidad de propagación, longitud de onda, frecuencia y periodo.

Solución:

Comparando la ecuación dada con la general para una onda armónica:

$$A(x,t) = A_0 \text{sen}(2{,}5x - 4t)$$
$$y = A\ \text{sen}(kx - \omega t)$$

Deducimos que :

$$\boxed{\begin{aligned} &A = A_0 (m) \\ &k = 2{,}5\ m^{-1} \\ &\omega = 4\ s^{-1} \end{aligned}}$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda};\ \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{2{,}5\ m^{-1}} = 0{,}8\pi\ (m) = 2{,}51\ m$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T};\ T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{4\ s^{-1}} = \frac{\pi}{2}\ (s) = 1{,}57\ s$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\pi/2\ (s)} = \frac{2}{\pi}\ s^{-1} = 0{,}64\ s^{-1}$$

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{0{,}8\pi\ m}{\frac{\pi}{2}\ s} = 1{,}60\ \frac{m}{s}$$

Ejemplo 2 (Oviedo, 2002)

Una onda armónica transversal que se propaga en una cuerda viene dada (en unidades SI) por :

$$y(x,t) = 0,02\ \text{sen}(2,5x - 3,2t)$$

Calcular:

a) Su velocidad de propagación

b) ¿Cuál es la velocidad máxima de cualquier partícula (o segmento infinitesimal) de la cuerda?

Solución:

a) Comparando la ecuación dada con la general para una onda armónica:

$$y(x,t) = 0,02\ \text{sen}(2,5x - 3,2t)$$

$$y = A\ \text{sen}(kx - \omega t)$$

Deducimos que :

$$\boxed{\begin{array}{l} A = 0,02\ m \\ k = 2,5\ m^{-1} \\ \omega = 3,2\ s^{-1} \end{array}} \Rightarrow$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda};\ \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{2,5\ m^{-1}} = 0,8\pi\ (m) = 2,51\ m$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T};\ T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{3,2\ s^{-1}} = 0,0625\ \pi\ (s) = 1,96\ s$$

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{0,8\pi\ m}{0,0625\ \pi\ (s)} = 1,28\frac{m}{s}$$

b) Todos los puntos de la cuerda vibran con MAS y adquirirán su máxima velocidad cuando pasen por el punto de equilibrio (y=0). La velocidad máxima para un punto que oscile con MAS (ver apuntes) viene dada por:

$$v = \pm\ \omega\ A \quad \text{Donde los signos indican el sentido}$$

$$v = 3,2\ s^{-1}.0,02\ m = 0,064\ \frac{m}{s} = 6,4\ \frac{cm}{s}$$

La fase inicial

Para calcular la fase inicial haremos uso de las ecuaciones que nos dan la elongación y la velocidad. Suponemos que la onda viaja hacia la derecha:

$$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \varphi_0)$$

$$v = -\ \omega A\ \cos\ (kx - \omega t + \varphi_0)$$

En el instante t=0 y para x =0, tendremos:

$$\boxed{\begin{array}{l} y(0,0) = A\ \text{sen}\ (\varphi_0) \\ v(0,0) = -\ \omega A\ \cos\ (\varphi_0) \end{array}}$$

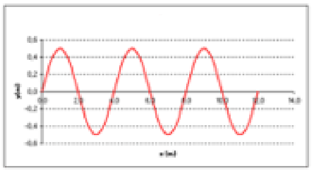
Dando valores a la fase inicial obtenemos los valores correspondientes para **y** (elongación) y **v** (velocidad):

φ_0	y	v
0	0	$-\ \omega\ A$
$\pi/2$	A	0
π	0	$\omega\ A$
$3\pi/2$	- A	0

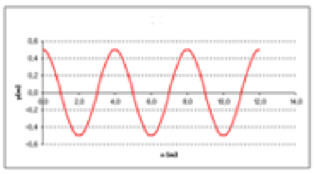
NOTA
Las ecuaciones anteriores pueden servirnos para calcular el desfase, ya que:

$$\boxed{\text{sen}\ (\varphi_0) = \frac{y_0}{A} \qquad \cos\ (\varphi_0) = -\frac{v_0}{\omega\ A}}$$

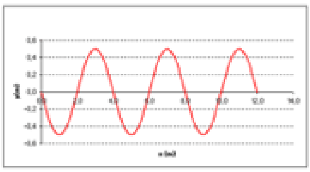
Se muestran a continuación el aspecto y la ecuación de varias ondas que se mueven hacia la derecha y tienen distinta fase inicial.



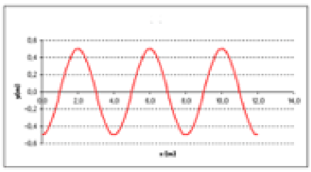
$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t)$



$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \frac{\pi}{2})$



$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \pi)$



$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \frac{3}{2}\pi)$

NOTA

Cuando la fase vale $\frac{\pi}{2}$, y teniendo en cuenta que $\text{sen}(\alpha + \frac{\pi}{2}) = \cos(\alpha)$, podemos escribir:

$$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \frac{\pi}{2}) = A\ \cos\ (kx - \omega t)$$

Cuando la fase vale π, y teniendo en cuenta que $\text{sen}(\alpha + \pi) = \text{sen}(-\alpha)$, podemos escribir:

$$y = A\ \text{sen}\ (kx - \omega t + \pi) = A\ \text{sen}\left[-(kx - \omega t)\right] = A\ \text{sen}\ (\omega t - kx)$$

El problema del desfase

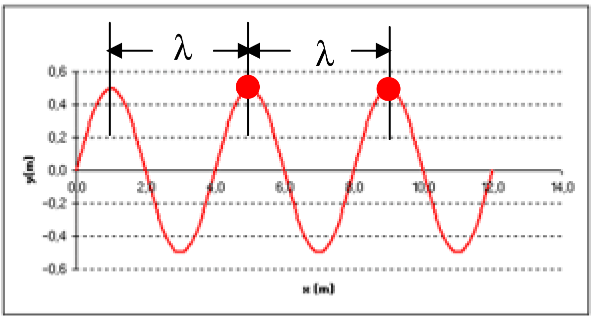
Dos puntos de una onda oscilan en fase cuando están en idéntico estado de movimiento. Por ejemplo si en un instante dado ambos están en una cresta de la onda.

Dos puntos oscilarán en fase (ver pag 1) cuando estén separados por una distancia igual a un número entero de longitudes de onda:

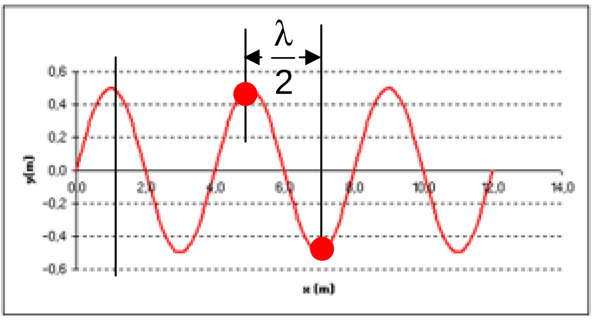
$$\Delta x = \lambda, 2\lambda, 3\lambda \ldots = n\lambda$$

Dos puntos se dice que están en oposición si su estado de movimiento es opuesto, es decir sus velocidades tienen idéntico valor, pero se mueven en sentido contrario. Esto sucede, por ejemplo, cuando uno de los puntos está en una cresta y otro en un valle.

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2} \ldots = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$



Puntos oscilando en fase



Puntos oscilando en oposición

El desfase entre dos puntos, en consecuencia, depende de la distancia entre ambos y podremos calcularlo restando las fases (ángulo) de la ecuación de onda correspondiente.

Si imaginamos dos puntos de una misma onda situados a una distancia x_1 y x_2 del origen, en un instante dado (t), tendrán una elongación (y) dada por:

$$y_1 = A\ \text{sen}\ (kx_1 - \omega t + \varphi_0)$$
$$y_2 = A\ \text{sen}\ (kx_2 - \omega t + \varphi_0)$$

La diferencia de las fases de ambos (desfase) valdrá:

$$\Delta\varphi = (kx_2 - \omega t + \varphi_0) - (kx_1 - \omega t + \varphi_0) = kx_2 - kx_1$$
$$\boxed{\Delta\varphi = k(x_2 - x_1) = k\Delta x}$$

Si los puntos considerados están separados por una distancia igual a un múltiplo entero de longitudes de onda estarán en fase, y si lo están por un número impar de semilongitudes de onda lo harán en oposición. Por tanto:

Para dos puntos en fase :

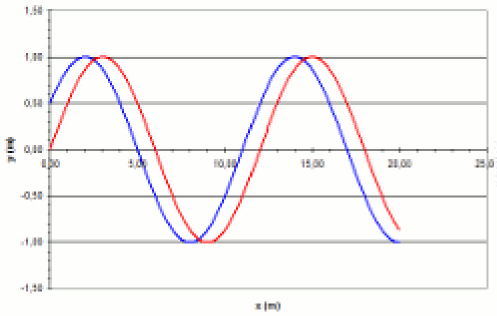
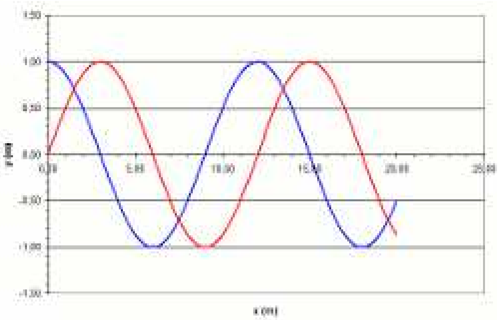
$$\Delta\varphi = k\ \Delta x = k\ n\ \lambda = \frac{2\pi}{\cancel{\lambda}} n\ \cancel{\lambda} = n\ 2\pi$$

Para dos puntos en oposición :

$$\Delta\varphi = k\ \Delta x = k\ (2n+1)\ \frac{\lambda}{2} = \frac{\cancel{2}\pi}{\cancel{\lambda}}(2n+1)\ \frac{\cancel{\lambda}}{\cancel{2}} = (2n+1)\ \pi$$

El concepto de desfase podemos extenderlo a dos ondas.

En la figura de más abajo pueden verse dos ondas ($\lambda = 12{,}0\ m$) con desfases diferentes. Las de la figura de la izquierda están desfasadas $\pi/6$ (lo que se corresponde con una $\Delta x = 1{,}0\ m$). Las ondas de la figura de la derecha están desfasadas $\pi/2$

Ejemplo 3

Para la onda de ecuación $y(x,t) = 2\ sen(\frac{\pi}{2}x - 5\pi\ t)$ determinar:

a) ¿Cuál será el desfase entre dos puntos situados a 4 m de distancia?
b) ¿Cuál será el desfase entre dos puntos situados a 6 m de distancia?
c) ¿Cuál será el desfase entre dos puntos situados a 5,6 m de distancia?

Solución:

a) De la ecuación podemos deducir la longitud de onda:

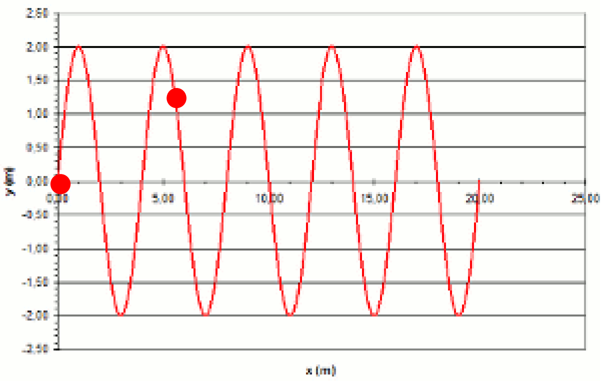
$$k = \frac{2\pi}{\lambda};\ \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{\pi/2} = 4\ m$$

Por tanto, los dos puntos separados 4 m estarán en fase (idéntico estado de movimiento)

b) De lo dicho en el apartado anterior se deduce que dos puntos situados a 6 m oscilarán en oposición, ya que 6 m es la distancia correspondiente a tres semilongitudes de onda.

c) Dos puntos separados 5,6 m no oscilaran ni en fase ni en oposición. El desfase, en este caso, es intermedio entre ambas situaciones y vale:

$$\Delta\varphi = k\ \Delta x = \frac{\pi}{2}\ m^{-1}\ 5{,}6\ m = \frac{5{,}6}{2}\pi = 2{,}8\,\pi$$



Situación (aproximada) de dos puntos desfasados 2,8 π ó 5,6 m

Energía asociada a una onda

Una de las características más sobresalientes (y útiles) del movimiento ondulatorio es que las ondas transportan energía de un punto a otro sin que exista transporte de masa. Si la onda es armónica los puntos del medio oscilan con MAS y su energía será la suma de la energía cinética y la potencial :

$$E = E_{cin} + E_{pot} = \frac{1}{2} k\, A^2$$

A partir de aquí se puede establecer una relación entre la energía que una onda transfiere a los puntos del medio y sus parámetros característicos, tales como la frecuencia:

$$E = \frac{1}{2} k\, A^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2} m 4\pi^2 f^2 A^2 = \left(2\pi^2 m\right) f^2 A^2$$

La energía transferida por una onda a un punto del medio en el que se propaga depende del cuadrado de su frecuencia y del cuadrado de su amplitud.

La frecuencia es una característica de las ondas. En la tabla adjunta se proporciona la frecuencia de algunas ondas electromagnéticas conocidas.

Ondas (electromagnéticas)	Frecuencia (Hz)
Rayos gamma	10^{20} (100 EHz)
Rayos X	10^{18} (EHz)
Luz visible	10^{14} (100 THz)
Microondas	10^{9} (GHz)
Ondas de radio	10^{6} (MHz)

Hz	Abreviatura	Nombre
10^{21}	ZHz	Zettahercio
10^{18}	EHz	Exahercio
10^{15}	PHz	Petahercio
10^{12}	THz	Terahercio
10^{9}	GHz	Gigahercio
10^{6}	MHz	Megaherzio

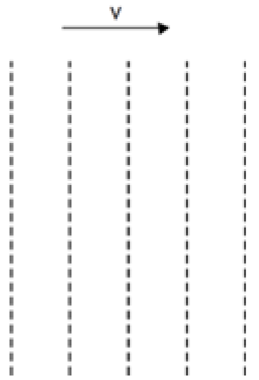
Como se ve la energía que los rayos X pueden transferir a los cuerpos sobre los que incidan es muy superior a la de las microondas, por ejemplo, y esa es una de las causas de la peligrosidad que presenta la exposición a radiaciones de alta frecuencia.

La amplitud está relacionada con la intensidad de la onda. De tal manera que para una onda de determinada frecuencia la energía transferida es tanto mayor cuanto mayor es su intensidad. La intensidad de una onda se atenúa muy rápidamente a medida que nos alejamos del foco emisor. De ahí que las consecuencias para la salud serán más graves si estamos próximos al foco emisor de las mismas (antenas de telefonía móvil u otro tipo de emisores).

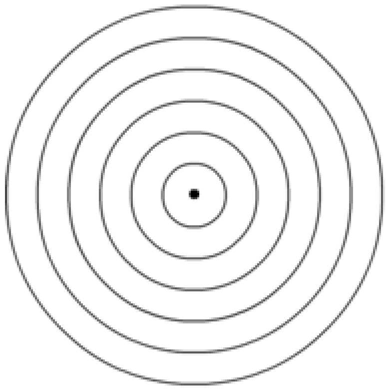
El sonido también es una onda. En este caso, los efectos nocivos para la salud pueden provenir más de su elevada intensidad (volumen elevado), que de su frecuencia, ya que los sonidos audibles para el oído humano tienen frecuencias moderadas, situadas entre los 20 y los 20 000 Hz.

	Propagación de las ondas **Fenómenos ondulatorios**	**IES La Magdalena.** **Avilés. Asturias**

Cuando se trata de visualizar la propagación de las ondas en un papel se recurre a pintar los llamados ***frentes de onda***. Esto es, ***líneas continuas que unen todos los puntos de la onda que están en fase***, por ejemplo las crestas. Se dibujan a continuación los frentes de una onda plana y otra circular:

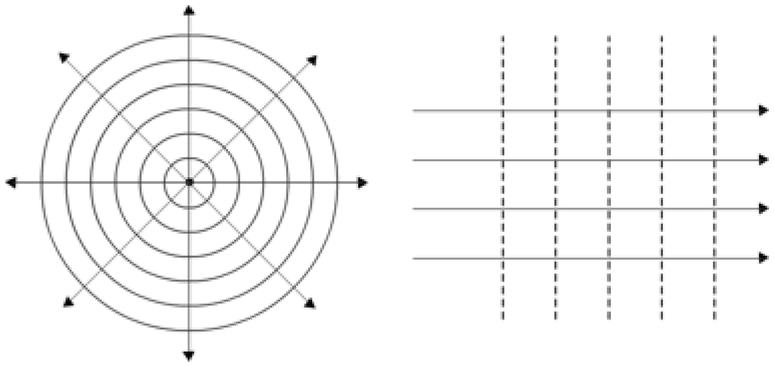


Frentes de ondas planas. Las líneas de puntos unen puntos de máxima amplitud (crestas)



Frentes de ondas circulares. Las líneas llenas unen puntos de máxima amplitud (crestas)

También resulta muy cómodo (y muy visual) pintar ***los rayos***, ***unas líneas perpendiculares a los frentes de onda.***



Frentes de onda y rayos. El sentido de la propagación se indica con una flecha

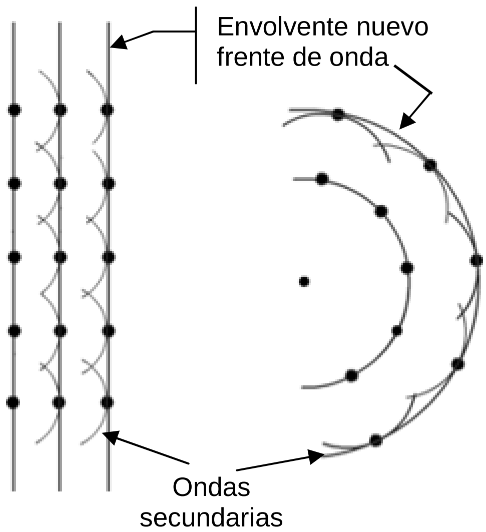
Christian Huygens (1629-1695) propuso hacia 1680 un método gráfico que permite obtener los frentes de onda sucesivos de una onda que se propaga.

Huygens consideraba que ***cuando la perturbación que constituye la onda alcanza los puntos del medio, éstos se convierten en fuentes secundarias de ondas y se puede obtener el nuevo frente de ondas trazando la envolvente de las ondas secundarias emitidas (Principio de Huygens)***. El proceso se puede repetir, con lo que podemos seguir la propagación de la onda a través del medio.

En el modelo de Huygens se ignoran las ondas emitidas en sentido contario al de propagación

El modelo de Huygens fue perfeccionado posteriormente por Kirchhoff quien introdujo una descripción matemática más rigurosa.

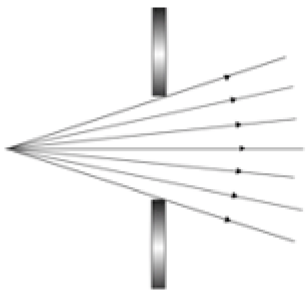
.



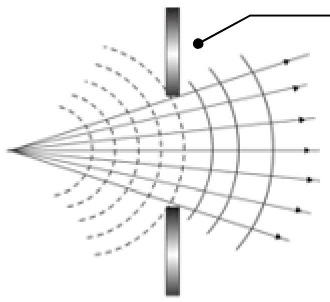
Difracción de las ondas

La difracción de las ondas constituye un fenómeno característico de éstas, hasta el punto que fue usado como prueba de la naturaleza ondulatoria de los electrones.

La difracción tiene lugar cuando las ondas que se propagan encuentran un obstáculo, por ejemplo un orificio, cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda de las ondas incidentes. Las ondas se propagan entonces como si el orificio se convirtiera en un nuevo centro emisor y penetran tras el orificio en lo que debería de ser una "zona de sombra" si su comportamiento fuera como el de un chorro de partículas. Según Huygens este comportamiento puede explicarse si suponemos que el propio orificio se convierte en una fuente secundaria de ondas.

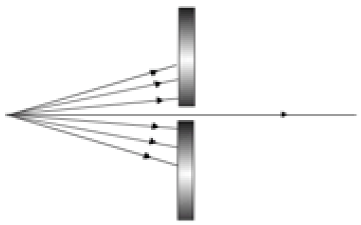


Chorro de partículas que inciden sobre una abertura

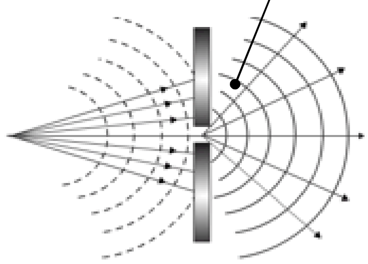


Ondas cuya longitud de onda es inferior al tamaño de la abertura

Si el orificio es mayor que la longitud de onda no hay difracción. Tras el obstáculo aparece una zona en la que no se propagan las ondas.

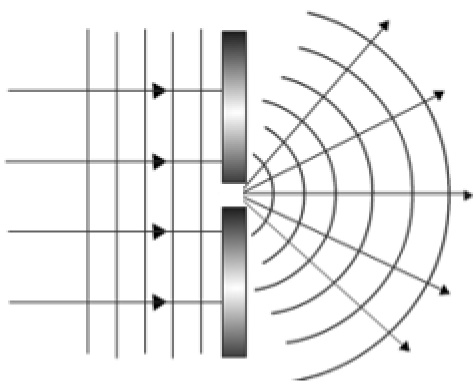


Chorro de partículas que inciden sobre una abertura



Ondas cuya longitud de onda es de tamaño comparable (o superior) al de la abertura

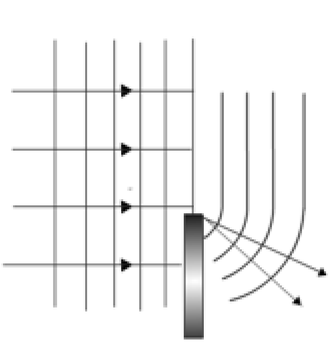
Si el orificio es de un tamaño similar a la longitud de onda (o menor) las ondas se difractan y se propagan detrás de él. Este fenómeno puede explicarse suponiendo que el orificio se convierte en una fuente secundaria de ondas (Principio de Huygens).

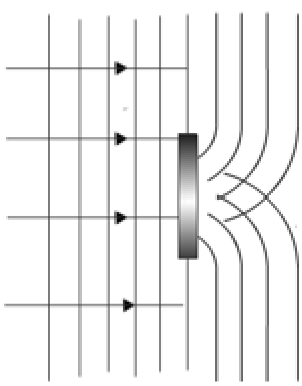


Si la onda incidente es plana la que emerge del orificio es una onda circular.

La onda difractada tiene la misma amplitud, frecuencia y longitud que la onda incidente.

A la derecha se muestra la difracción de un onda por un obstáculo interpuesto en su trayectoria. Los frentes de onda se curvan en sus bordes según lo predicho por el Principio de Huygens.

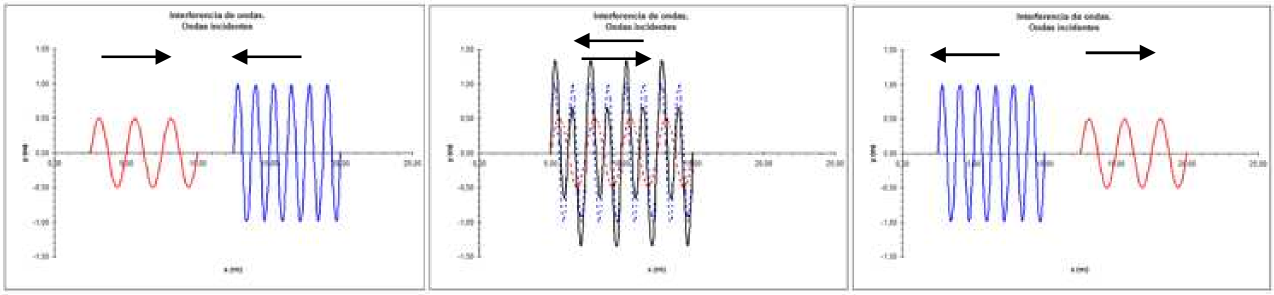




Interferencia

La interferencia entre dos ondas tiene lugar cuando ambas coinciden en una región del espacio al mismo tiempo. Cuando esto sucede ambas se suman (principio de superposición) produciendo una onda resultante
El fenómeno de la interferencia es algo característico del movimiento ondulatorio.

La interferencia se produce únicamente en los puntos en que ambas ondas coinciden. Si, por ejemplo, ambas se desplazan en sentidos contrarios interferirán cuando se encuentren y después ambas ondas siguen su camino sin sufrir alteración.



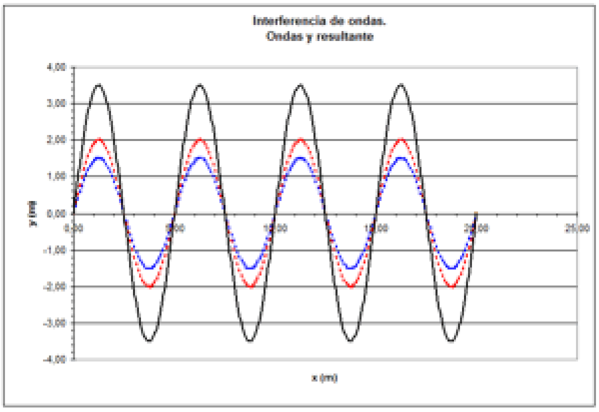
A la izquierda: ondas propagándose en sentidos contrarios
En el centro: las ondas (líneas de puntos) coinciden produciéndose interferencia (resultante con línea llena)
Derecha: las ondas siguen su camino inalteradas

Matemáticamente la onda resultante se obtiene como suma de las ecuaciones de las ondas incidentes:

$$y_1 = A_1 \text{ sen } (k_1 x \pm \omega_1 t + \varphi_1)$$
$$y_2 = A_2 \text{ sen } (k_2 x \pm \omega_2 t + \varphi_2)$$
$$y = y_1 + y_2 = A_1 \text{ sen } (k_1 x \pm \omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \text{ sen } (k_2 x \pm \omega_2 t + \varphi_2)$$

La onda resultante puede ser complicada (ver hoja de cálculo), aunque existen algunos casos sencillos que conviene tener en cuenta:

- **Ondas con la misma frecuencia y longitud de onda (ondas coherentes)**



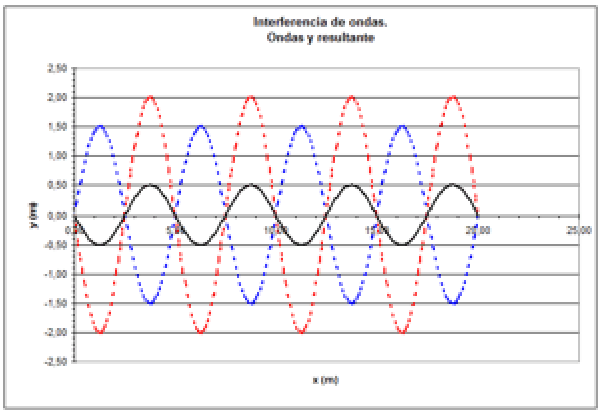
Si la fase es idéntica se produce lo que se llama interferencia constructiva. Las amplitudes de ambas ondas se suman : A = A_1 + A_2. Esto sucede cuando la diferencia entre las fases sea:

$$\Delta\varphi = 2n\,\pi \ (n = 0, 1, 2\dots)$$

En la figura de la izquierda pueden verse dos ondas (líneas de puntos) con idéntica fase y distinta amplitud en interferencia constructiva. La resultante se indica con línea llena. Su amplitud es la suma de las amplitudes de las ondas.

Para la figura:

$$y_1 = 1{,}50 \text{ sen } (1{,}26\ x - \pi t)$$
$$y_2 = 2{,}00 \text{ sen } (1{,}26 x - \pi t)$$



Si las ondas están en oposición se produce lo que se llama interferencia destructiva Las amplitudes de ambas ondas se restan : A = A_1 - A_2. Si A_1 = A_2 la onda resultante tiene una amplitud nula (se produce la extinción). Esto sucede cuando la diferencia en fase sea:

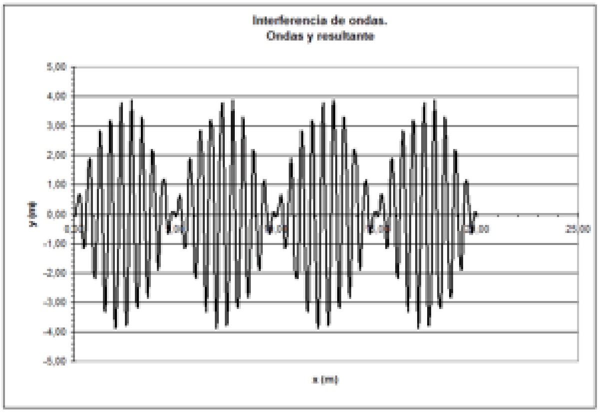
$$\Delta\varphi = (2n + 1)\,\pi \ (n = 0, 1, 2\dots)$$

En la figura de la izquierda pueden verse las dos ondas anteriores (líneas de puntos), pero ahora con una diferencia de fase de π rad (interferencia destructiva).

- **Ondas con distinta frecuencia y longitud de onda.**

La onda resultante de la interferencia (tal y como se ha dicho más arriba) puede ser complicada.

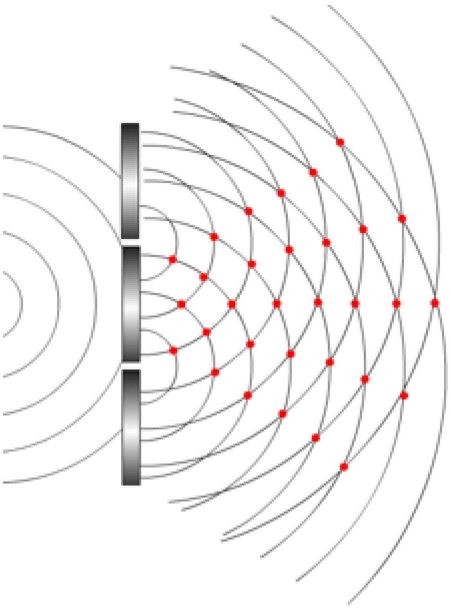
Se produce un fenómeno curioso cuando interfieren ondas de frecuencia muy próximas. Entonces la amplitud de la onda resultante varía periódicamente con el tiempo produciendo máximos y mínimos de amplitud que reciben el nombre de ***pulsaciones.*** Se dice que la amplitud está ***modulada*** (ondas AM)

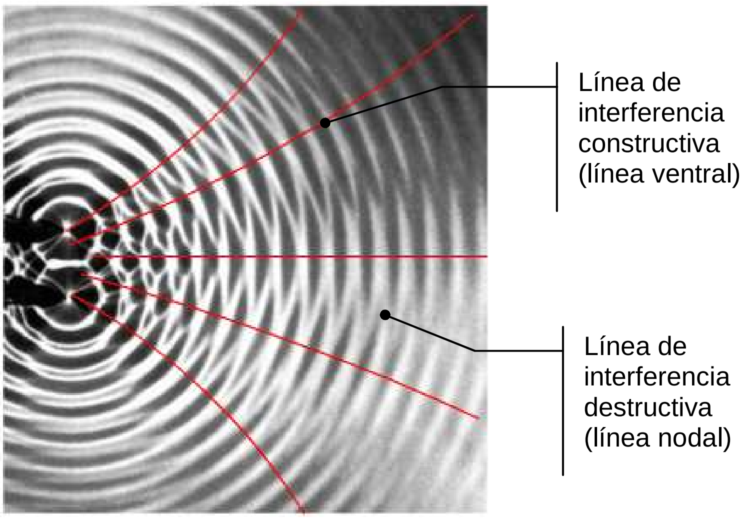


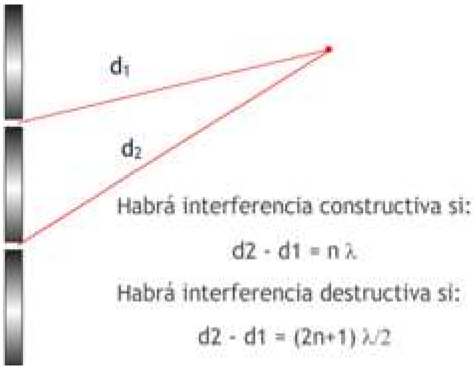
En la figura de la izquierda se pueden observar las pulsaciones surgidas como consecuencia de la interferencia de dos ondas de idéntica amplitud que se propagan con velocidad de 10 m/s y cuyas frecuencias, muy próximas, son 80 s^{-1} y 82 s^{-1}.

Las pulsaciones se pueden escuchar produciendo sonidos de frecuencias próximas. Se perciben entonces las subidas periódicas de volumen (relacionadas con la amplitud). Esto es un efecto que los músicos usan para afinar sus instrumentos. Si la frecuencia del instrumento no es la misma que la que se da como referencia para el afinado se escucharán batidos (pulsaciones) que desaparecen cuando las frecuencias se igualan. El instrumento estará entonces afinado.

Debajo se muestra el fenómeno de interferencia producido por una doble rendija. Cada rendija se convierte en un foco secundario de una ondas idénticas y ambas interfieren formando un patrón típico. Con puntos se señalan en el dibujo las zonas en las que existe interferencia constructiva (líneas ventrales). Entre ambas se sitúan las zonas de interferencia destructiva (líneas nodales). A la derecha se muestra una foto de una cubeta de ondas en la que se observa realmente el fenómeno. Se identifican fácilmente las líneas ventrales y nodales







En este caso la interferencia se produce debido a la diferente distancia recorrida por las ondas procedentes de ambas rendijas.

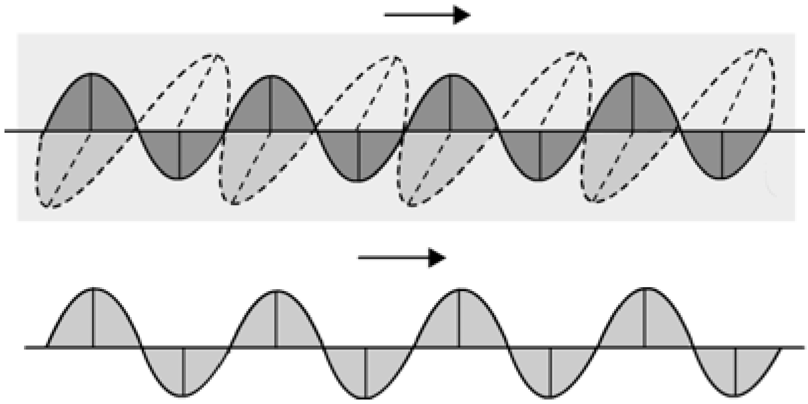
En las zonas en las que la diferencia de distancia recorrida es un múltiplo entero de longitudes de onda se produce interferencia constructiva. Las ondas llegan en fase.

En las zonas en las que la diferencia de distancia recorrida es un múltiplo de media longitud de onda se produce interferencia destructiva. Las ondas llegan en oposición.

Polarización

Muy frecuentemente el plano en el que se produce la perturbación en una onda transversal no es único y, entonces, las oscilaciones se localizan en varios planos.

Es posible, mediante algunos procedimientos (ver más abajo), "filtrar" la onda de forma que se seleccione ***un único plano de oscilación***. La onda resultante se dice que ***está polarizada ya que en ella la oscilación tiene lugar en un único plano.***

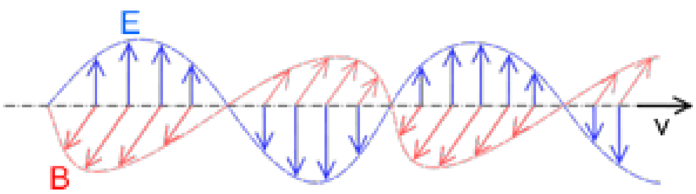


Arriba onda transversal en la que la perturbación transmitida se localiza en dos planos perpendiculares. No está polarizada.

Abajo onda transversal polarizada. La oscilación se produce sólo en el plano vertical.

La polarización es una propiedad especialmente importante en el caso de ondas electromagnéticas.

En las ondas electromagnéticas la perturbación que se propaga son campos eléctricos (E) y magnéticos (B) que forman entre sí 90^0. El valor estos campos en un punto oscila entre los valores máximo y mínimo.

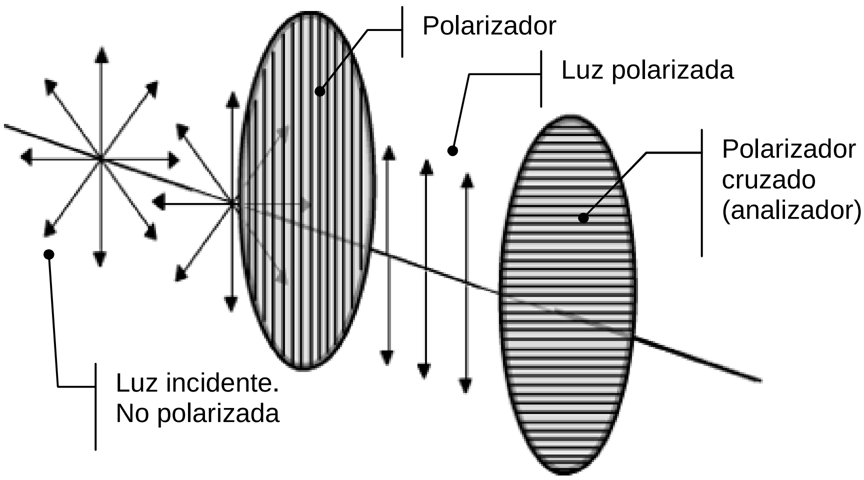


Para fijar el plano de oscilación de la perturbación se toma como referencia el plano de oscilación del campo eléctrico.

En una onda electromagnética polarizada, por tanto, el plano de oscilación del campo eléctrico es siempre el mismo.

Existen algunas sustancias, llamadas ***polarizadores***, que cuando una onda electromagnética (por ejemplo la luz) las atraviesa sólo dejan pasar aquellas ondas en las que el plano de oscilación del campo eléctrico tiene una dirección determinada. La luz que emerge de la sustancia estará polarizada.

Si a continuación se sitúa otro polarizador cruzado (que forme 90^0 con el primero) la luz no pasará, demostrando la polarización de la luz incidente sobre él.



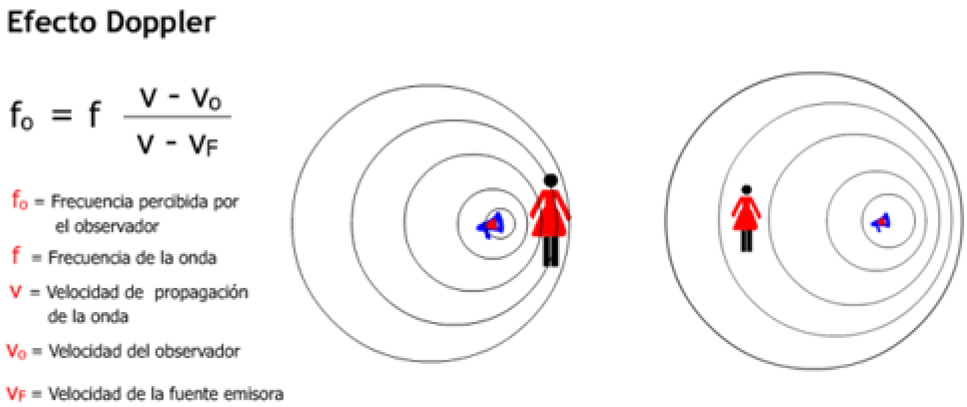
Otras sustancias, por ejemplo la glucosa, tienen la propiedad de que cuando se hace pasar luz polarizada a través de ellas son capaces de girar el plano de polarización de la luz. Estas sustancias se dice que son ***ópticamente activas,*** y la desviación del plano de polarización permite clasificarlas en ***sustancias dextrógiras*** si desvían el plano de polarización hacia la derecha ***o levógiras*** si lo desvían hacia la izquierda.

Efecto Doppler

El llamado ***efecto Doppler*** (en honor del matemático austriaco Andreas Doppler, que lo descubrió en 1842) ***consiste en el cambio de frecuencia percibido por un observador cuando se mueve respecto de la fuente que emite las ondas***. La explicación cualitativa del efecto puede verse en la figura situada bajo este párrafo en el que se supone que la onda es el sonido emitido por el megáfono.

Cuando la fuente se acerca al observador en reposo (el efecto sería el mismo si es el observador el que se acerca a la fuente) los frentes de onda emitidos aparecen llegan al observador más juntos como consecuencia del movimiento y éste ***percibe un sonido de mayor frecuencia que la realmente emitida.***

El efecto contrario se observa cuando el observador y la fuente se alejan el uno del otro. ***El observador percibe un sonido de menor frecuencia que el emitido***



La ecuación que aparece junto a la figura permite calcular la frecuencia percibida por el observador.

Ejemplo 1

Si el megáfono emite un sonido de 440 Hz (La) y se aproxima al observador a una velocidad de 40 m/s ¿Cuál será la frecuencia percibida por éste?

Solución:

Tomando como velocidad del sonido 340 m/s y considerando el origen situado en el observador y positivo hacia la derecha:

$$f = 440\ Hz\ ;\ \ v = 340\ m/s\ ;\ v_0 = 0\ ;\ v_F = 40\ m/s$$

$$f_0 = 440\ Hz\ \frac{340\ \cancel{m/s} - 0}{(340 - 40)\ \cancel{\frac{m}{s}}} = 498{,}7\ \frac{m}{s}$$

El observador percibe una frecuencia que es prácticamente un Si

El efecto Doppler permitió a ***Edwin Hubble*** en 1929 afirmar que las galaxias no estaban quietas y la mayoría se movían alejándose de nosotros con una velocidad directamente proporcional a la distancia que nos separa de ellas. **El universo no es estático.**

Hubble llegó a esta conclusión estudiando el espectro de la luz proveniente de las galaxias. Analizando dichos espectros observó que algunas líneas conocidas aparecían a una frecuencia menor de la esperada (mostraban un ***"corrimiento hacia el rojo"***), lo que significaba, según el efecto Doppler, que la fuente emisora (la galaxia) se aleja de nosotros.

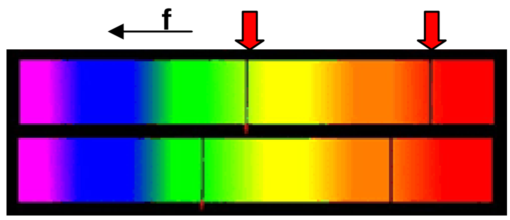


Imagen en la que se observa el corrimiento hacia el rojo (imagen superior) de las líneas espectrales

Conociendo el valor del incremento de la frecuencia correspondiente puede establecerse la velocidad con que se alejan. Hubble dedujo que esta velocidad (velocidad de recesión) era proporcional a la distancia. Esto es, cuanto más lejos está una galaxia, más rápidamente se aleja de nosotros.