

ONDAS MECÁNICAS

PROPAGACIÓN ONDULATORIA POR UN MEDIO MATERIAL

La física clásica considera dos modos o mecanismos de propagación de la energía: mediante partículas o mediante ondas. Para distinguir ambos mecanismos imaginamos un barquito de vela flotando en el centro de un estanque. Podemos transferirle energía, por ejemplo, lanzándole piedras o soplando. Estas acciones conllevan un transporte neto de materia (piedras, moléculas de aire) desde la orilla del estanque hasta el barquito que es impulsado cuando esa materia choca con él.

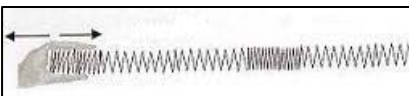


También podemos transferir energía al barquito sin necesidad de enviar materia. Por ejemplo, dejando caer piedras en la orilla o chapoteando en el agua. Estas acciones producen oscilaciones que avanzan por la superficie del agua y cuando alcanzan al barquito, le hacen moverse arriba y abajo. Decimos entonces que se produce un movimiento ondulatorio o que se propaga una **onda**, que **transmite energía y cantidad de movimiento sin que se produzca un transporte neto de materia**.

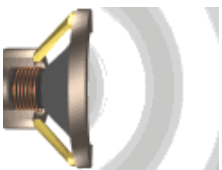
El mecanismo de propagación ondulatoria se manifiesta en muchos procesos: al chapotear en el agua, al pulsar una cuerda tensa, al agitar el extremo de un resorte, cuando se produce un terremoto (ondas sísmicas), cuando se emite un sonido (ondas sonoras), etc. Las oscilaciones se generan en un punto de un medio material (llamado foco) y se transmiten por ese mismo medio (agua, aire, suelo terrestre, resorte elástico) Este tipo de ondas, que necesitan un medio material para propagarse, se llaman **ondas mecánicas**.

PULSOS DE ONDAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES

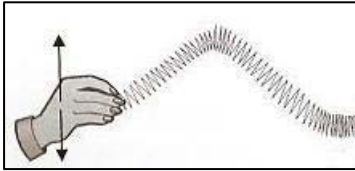
Un **pulso** es una perturbación de corta duración generada en el estado natural de un punto de un medio material que se transmite por dicho medio. Podemos producir un pulso, por ejemplo, realizando una rápida sacudida en el extremo de un muelle o de una cuerda, lanzando una piedra al agua de un estanque, dando un golpe a una mesa o produciendo una detonación en el aire.



La figura adjunta representa una instantánea de un pulso de onda propagándose por un muelle tenso. Para generarlo juntamos varios anillos del resorte y luego soltamos de golpe. La perturbación producida en un extremo se transmite a la zona contigua, que repite el movimiento un poco después. El resultado global es un avance del estado de vibración a lo largo del muelle. En esta experiencia las vibraciones tienen lugar en la misma dirección en la que se propagan y decimos que se trata de un **pulso de onda longitudinal**.



Un ejemplo de onda longitudinal es el sonido. Se pueden producir pulsos sonoros golpeando un objeto sólido. El objeto vibra y empuja al aire que lo rodea produciéndole una compresión que se traslada a una velocidad de unos 340 m/s . La propagación es longitudinal porque el aire es una disolución gaseosa sin fuerzas de cohesión entre sus moléculas. Por ello, la perturbación únicamente se propaga en la dirección en la que unas moléculas "chocan" con sus vecinas.



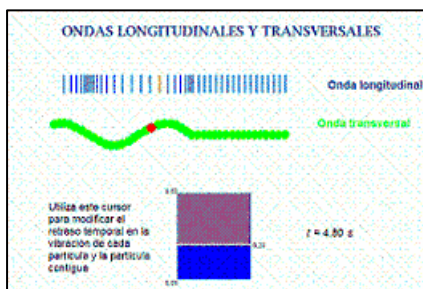
Otra forma de generar un pulso es estirar un pedazo del muelle en dirección perpendicular a él y soltar. Se forma una cresta o protuberancia que avanza a lo largo del muelle. En este caso, las vibraciones tienen lugar en una dirección perpendicular a la de propagación y decimos que se trata de un **pulso de onda transversal**.



Un ejemplo de ondas transversales son las que se producen en la superficie de un lago o de un estanque. Entre las moléculas del agua se ejercen fuerzas intermoleculares de cohesión y la vibración vertical producida en un punto del agua se traslada por la superficie (horizontalmente) en todas las direcciones. La velocidad a la que se propagan las olas depende de la elasticidad del agua, determinada a su vez por propiedades como su composición, densidad...

En el laboratorio grabamos varios clips de video que muestran el avance de pulsos longitudinales y transversales generados por los alumnos en un muelle largo y elástico.

Para terminar este apartado, conviene dejar claro el concepto fundamental de que en los procesos ondulatorios no se produce un transporte neto de materia. Este concepto se resalta en una animación *Modellus* en la que representamos



capas de aire que simulan una onda sonora longitudinal y partículas vibrantes de una onda transversal producida en una cuerda. Hemos destacado en color rojo una capa de aire y una partícula de la cuerda. Así se puede observar mejor que esa capa y esa partícula, como el resto, reproducen la vibración sin desplazarse por el medio. Mientras corre la aplicación se puede modificar el tiempo de retardo en vibrar cada capa o cada partícula respecto de la anterior y ver cómo afecta la modificación al aspecto general de cada onda.

MAGNITUDES QUE DESCRIBEN UNA ONDA MECÁNICA ARMÓNICA

El movimiento de vibración más sencillo posible es el movimiento armónico simple. Si se genera este tipo de movimiento en un punto de un medio elástico (por ejemplo un resorte), ese punto actúa como foco de una onda armónica.

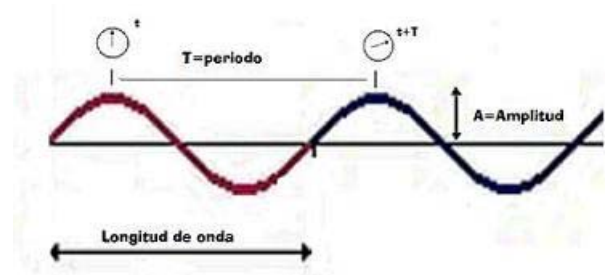
En la figura se representa una onda armónica transversal producida en una cuerda elástica. Es como si se hubiera hecho una fotografía en un cierto instante, mientras todos los puntos de la cuerda realizan un movimiento armónico simple perpendicular a la dirección de propagación. Para describir a la onda armónica, se definen las siguientes magnitudes:

La **longitud de onda**, λ , igual a la distancia entre los centros de dos crestas o dos valles consecutivos.

El **periodo**, T que es el tiempo que tarda la perturbación en avanzar una longitud de onda.

La **velocidad de propagación** de la onda, c , que es la rapidez con la que avanza la perturbación.

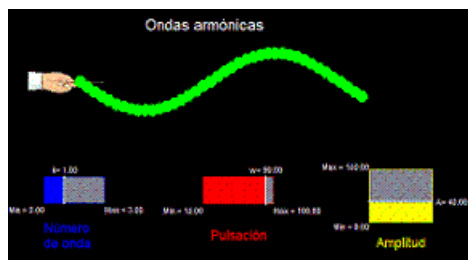
Estas tres magnitudes cumplen la siguiente relación $c = \lambda/T$



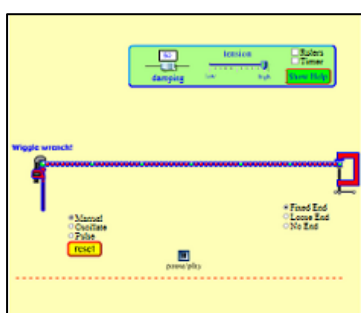
Fijándonos en el movimiento de vibración de cada partícula, añadimos: La **amplitud**, A , máxima separación que alcanza cada partícula vibrante respecto de su posición de equilibrio; la frecuencia, ν , número de oscilaciones que realiza por

unidad de tiempo; el periodo, T , tiempo que tarda en realizar cada oscilación y la pulsación w , equivalente a la frecuencia, pero expresada en radianes por segundo (una oscilación corresponde a 2π radianes)

El periodo de la onda coincide con el del movimiento de oscilación de cada partícula, puesto que mientras una partícula completa una oscilación, la vibración se transmite una distancia igual a la longitud de onda.



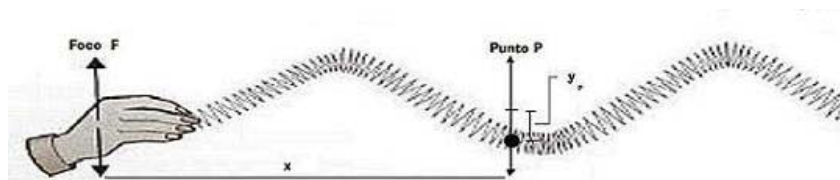
Para practicar en el manejo de las magnitudes que caracterizan al movimiento ondulatorio hemos diseñado una animación *Modellus* interactiva que simula el movimiento de una cuerda que se hace vibrar en un extremo. Se puede modificar sobre la marcha la amplitud, la pulsación y el número de ondas (inversamente proporcional a la longitud de onda), comprobando el efecto que tiene la modificación en la onda y en el resto de magnitudes que la describen.



Otra aplicación interesante, disponible en la web, es un generador interactivo de pulsos y ondas en una cuerda. Se puede dar al extremo de la cuerda una breve sacudida para generar un pulso o producir en dicho extremo un movimiento continuo de vibración que genera una onda. La aplicación permite modificar la tensión de la cuerda y la naturaleza del extremo opuesto al foco, que puede ser un punto con libertad de movimiento en la dirección de las vibraciones, un punto fijo o un punto más de una cuerda que tendría una longitud ilimitada.

ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO

La ecuación del movimiento ondulatorio proporciona en cada instante el valor de la elongación (y_p) de un punto cualquiera del medio que transmite la onda. Para obtenerla situamos ese punto arbitrario, P, a una cierta distancia, x , del foco de la onda, F, y llamamos $f_F(t)$ a la ley que rige la evolución del movimiento de dicho foco. Una ecuación que proporcione



en cada instante la elongación del punto P ha de reflejar el hecho de que P repite el movimiento del foco con un cierto retardo de tiempo, t' , igual al tiempo que tarda la perturbación en viajar desde el foco, F, al punto, P).

Si c es la velocidad de propagación de la onda, el retardo t' es $t' = x/c$, con lo que escribimos de forma genérica la siguiente función de onda:

$$f(x, t) = f(t - x/c) \text{ para una onda que se propaga de izquierda a derecha}$$

$$f(x, t) = f(t + x/c) \text{ para una onda que se propaga de derecha a izquierda}$$

Dentro de este planteamiento general, consideramos el caso de una onda armónica en la que el foco tiene un movimiento armónico simple, de ecuación $f_F(t) = A \text{ sen } w \cdot t$, y la vibración se transmite desde cada punto al siguiente sin pérdida de energía. Entonces, la ecuación del movimiento ondulatorio es $f(x, t) = A \text{ sen } w(t - x/c)$, aunque teniendo en cuenta cómo se relacionan las magnitudes del movimiento ondulatorio (c, T, w, λ, ϕ) es más útil escribirla así:

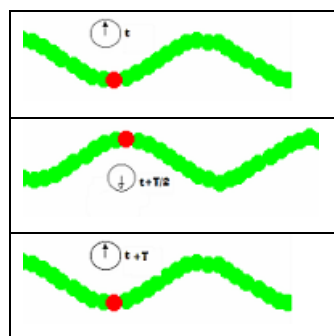
$$f(x, t) = A \text{ sen } 2\pi (t/T - x/\lambda)$$

Esta forma de expresar su ecuación destaca el hecho de que el movimiento ondulatorio tiene una doble periodicidad: en el espacio y en el tiempo.

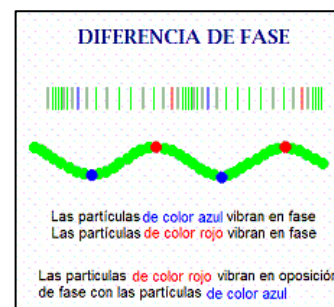
Para observar la periodicidad espacial, damos un valor fijo al tiempo, t , lo que equivale a tomar una foto del medio en un instante. En ese instante, las elongaciones de dos puntos vibrantes, a distancias x_1 y x_2 del foco, se diferencian por un desfase espacial $I_x = 2\pi (x_2 - x_1) / \lambda$. Cuando la separación entre esos dos puntos resulta $x_2 - x_1 = n \cdot \lambda$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) el desfase espacial, I_x , es un múltiplo entero de 2π , por lo que la elongación de ambos puntos es siempre igual y vibran acompasadamente o en concordancia de fase. Así lo hacen por una parte las partículas rojas y por otra las partículas azules de la figura adjunta. Si esa distancia es $x_2 - x_1 = (2n+1) \cdot \lambda/2$, el desfase espacial entre los puntos es un múltiplo impar de π y vibran en oposición de fase, como lo hacen las partículas rojas con respecto a las partículas azules.



Razonamos de forma similar para observar la periodicidad temporal del movimiento ondulatorio. En este caso, fijamos un punto del medio, x , lo que equivale a filmar el movimiento de oscilación de ese punto. Su elongación en dos instantes diferentes t_1 y t_2 se diferencia por un desfase temporal, $I_t = 2\pi (t_2 - t_1) / T$. Cuando el intervalo de tiempo entre ambos instantes es $t_2 - t_1 = n \cdot T$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), el desfase temporal I_t , es un múltiplo entero de 2π , y el punto tiene en ambos instantes en el mismo estado de vibración, como ocurre con la partícula roja en las instantáneas primera y tercera de la izquierda [tomadas en un cierto instante, t , y un periodo después ($t + T$)] El caso opuesto ocurre cuando el intervalo de tiempo entre ambas instantáneas es $t_2 - t_1 = (2n+1) T / 2$. Entonces, el desfase temporal es un múltiplo impar de π y la partícula se encuentra en dos estados de vibración opuestos, como ocurre con la partícula roja al comparar su situación en la figura segunda con las otras dos.

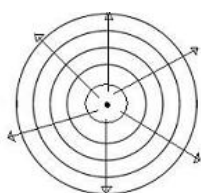


Para reforzar estos conceptos hemos elaborado una animación *Modellus* interactiva. Se representa una onda longitudinal y otra transversal y se destacan algunas partículas, cuyos estados de vibración relativos tienen lugar en concordancia de fase y en oposición de fase. El usuario puede colocar el cursor encima de otras partículas y editarlas, lo que le permitiría colorearlas a voluntad y comprobar comparativamente sus estados de vibración.



PRINCIPIO DE HUYGENS

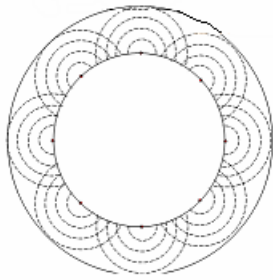
Vamos a completar el modelo de movimiento ondulatorio estudiando el proceso de avance de la onda a lo largo del medio.



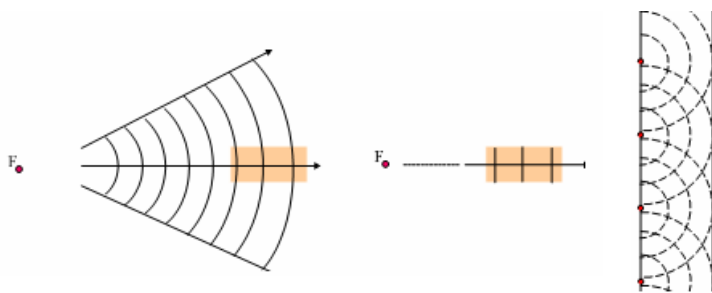
En el primer dibujo a la izquierda se observan ondas producidas en un lago. La vibración originada en un punto se transmite por la superficie en todas las direcciones, haciendo que las partículas situadas en circunferencias concéntricas alrededor del foco vibren acompasadamente.

El segundo dibujo es una representación abstracta del proceso donde se indican direcciones de propagación (rayos) y se dibujan circunferencias separadas entre sí por una distancia igual a la longitud de onda, λ (frentes de onda).

En la segunda mitad del siglo XVII el científico holandés [Cristian Huygens](#) (1629-1695) elaboró un método geométrico para explicar la propagación de las ondas utilizando el concepto de que cada punto del medio alcanzado por la onda se comporta como un nuevo foco emisor o foco secundario. Huygens planteó que cuando la energía del movimiento ondulatorio alcanza (al mismo tiempo) los puntos de un frente de ondas, cada uno de estos puntos se pone a vibrar generando ondas secundarias. La infinidad de estas ondas secundarias no se percibe y sí se observa en cambio su envolvente. Cuando ha transcurrido un tiempo igual al periodo los movimientos ondulatorios generados en estos focos secundarios se han transmitido en el sentido de propagación de la onda hasta una distancia igual a una longitud de onda. En ese instante, la línea tangente a los frentes de onda secundarios representa al siguiente frente de ondas y así sucesivamente.



El principio de Huygens es muy útil para interpretar bastantes propiedades del movimiento ondulatorio. En los razonamientos que lo utilizan es bastante habitual considerar que los rayos son paralelos y los frentes de onda planos.



Aunque la onda se origine como una onda circular o esférica, esta simplificación es adecuada si se analiza su comportamiento a mucha distancia del foco. Lejos del foco la curvatura de los frentes de onda es prácticamente despreciable cuando se consideran porciones pequeñas de ellos. Entonces procede aplicar el principio de Huygens a frentes de onda planos.

PROPIEDADES DE LAS ONDAS MECÁNICAS

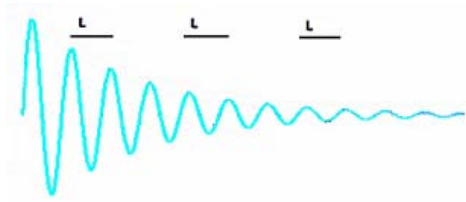
Establecido un modelo y una ecuación del movimiento ondulatorio vamos a analizar cómo se comportan las ondas mecánicas en varias situaciones.

Amortiguación

Nos planteamos en primer lugar el problema de cómo puede variar (si lo hace) la intensidad del movimiento ondulatorio a medida que se propaga una onda. Para estudiar esta cuestión retomamos el ejemplo de las ondas que se pueden producir en la superficie de un lago. Estas ondas se transmiten en todas las direcciones de un plano horizontal (el de la superficie del agua), por lo que la energía transmitida se va repartiendo entre puntos de circunferencias concéntricas. Por lo tanto cada punto sólo recibe una porción de la energía original del foco, tanto menor cuanto más nos alejemos del origen de las vibraciones.



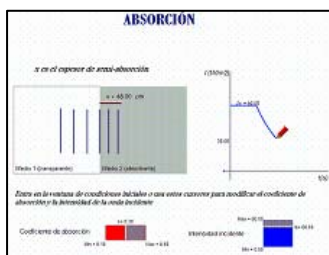
La energía que emite el foco se puede calcular suponiendo que oscila con un movimiento armónico simple, de modo que es proporcional al cuadrado de la amplitud y al cuadrado de la frecuencia [$E = (2\pi^2 m) \nu^2 A^2$]. Por tanto, como todos los puntos vibran con la misma frecuencia, ν (eso significa transmitir un estado de vibración de unos a otros) a medida que nos alejamos del foco disminuye la amplitud de las vibraciones y su intensidad (la intensidad es la energía que atraviesa cada segundo una superficie unidad colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda). Este fenómeno se llama **amortiguación** y ocurre cuando la onda se propaga en varias direcciones. No se produce amortiguación en ondas que se propagan en una sola dirección, por ejemplo, a lo largo de un muelle o una cuerda elástica. En este caso cada punto transmite su estado de vibración a otro contiguo a él.



El dibujo adjunto representa un corte transversal de una onda amortiguada como las que se producen en la superficie del agua. Se señala una longitud L a diferentes distancias del foco, con objeto de dejar claro que la amortiguación supone una disminución de la amplitud, pero no de la longitud de onda. En la velocidad de propagación de la onda c sólo influye la capacidad del medio para transmitir la vibración (dicha velocidad es constante mientras la onda viaja por un medio determinado) La longitud de onda λ se relaciona con la velocidad y con la frecuencia f según la expresión $c = \lambda f$. Por tanto, todas las partículas alcanzadas por la onda oscilan con la misma frecuencia f y la longitud de onda no varía.

Absorción

Aunque una onda mecánica no sufra amortiguación, sí se producen normalmente pérdidas de energía. Los medios no son perfectamente elásticos y debido a rozamientos, viscosidad y otros factores, la intensidad suele disminuir al alejarnos del foco porque parte de la energía emitida por él va siendo absorbida por el propio medio, por medios contiguos o por objetos interpuestos en el camino de avance de la onda. Este fenómeno se llama **absorción**. Con la absorción decae la intensidad del movimiento ondulatorio debido a que las moléculas del medio tienen dificultad para reproducir y transmitir la vibración. Parte de la energía ondulatoria se invierte en un movimiento desordenado de dichas moléculas con lo que la energía de la onda se va transformando con mayor o menor rapidez en energía interna del objeto que está siendo atravesado por ella.



Hemos utilizado la ley que calcula el decaimiento de la intensidad de una onda cuando se produce absorción y el llamado espesor de semi-absorción (distancia que penetra una onda en un medio hasta que su intensidad decae en un 50%) para construir una animación *Modellus* interactiva. Representa el recorrido de una onda plana transmitiéndose inicialmente por un medio transparente y a continuación por un medio absorbente. El usuario puede modificar la intensidad de la onda incidente y el coeficiente de absorción del medio absorbente, obteniendo el correspondiente espesor de semi-absorción. Evidentemente el estudio formal de la absorción tiene mucho interés práctico. Por ejemplo, interesa disponer de materiales adecuados para absorber ondas sonoras y aislar acústicamente viviendas, salas de música, etc. atravesado por ella.

Evidentemente el estudio formal de la absorción tiene mucho interés práctico. Por ejemplo, interesa disponer de materiales adecuados para absorber ondas sonoras y aislar acústicamente viviendas, salas de música, etc. atravesado por ella.

Resonancia

Algunas veces ocurre que un objeto interpuesto en el camino de propagación de una onda se pone a vibrar al recibir energía del movimiento ondulatorio. La energía absorbida produce un movimiento de vibración del objeto entero y se dice que ese objeto entra en **resonancia** con la onda. Para entender este proceso se ha de tener en cuenta que todos los cuerpos tienen frecuencias propias de vibración; si esa frecuencia propia coincide con la de la onda "resuenan" al paso de ésta. Esto se puede comprobar experimentalmente utilizando diapasones. El diapasón es un instrumento metálico con forma de U, que, después de ser golpeado en un extremo, se mantiene vibrando durante bastante tiempo. La vibración de cada diapasón ocurre con una determinada frecuencia (depende del material del diapasón, su forma y su tamaño) y emite un sonido de esa frecuencia. Si hacemos vibrar un diapasón y lo colocamos muy próximo a otro igual, el segundo diapasón entra en resonancia, como podemos comprobar acercándolo a nuestro oído (se observa que vibra y emite un sonido más débil que el del primero).



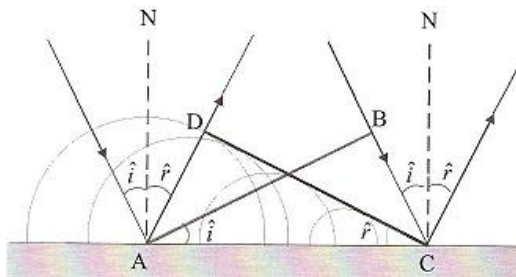


El fenómeno de la **audición** está íntimamente relacionado con la resonancia. El oído tiene 4500 fibras de diferente longitud, preparadas para resonar con sonidos cuya frecuencia esté comprendida entre 20000 y 20 Hz (un Hz es una oscilación por segundo). Cuando un sonido llega a nuestro oído, el tímpano lo transmite a la cadena de huesecillos del oído medio hasta el caracol, donde sólo vibra la fibra que puede entrar en resonancia con el tono del sonido recibido. Los estímulos recogidos por las fibras producen diferencias de potencial que varían con el ritmo de la onda sonora recibida. Estas diferencias de potencial dan lugar a corrientes eléctricas que llegan al cerebro a través de los nervios.

Por otra parte, las cualidades subjetivas que atribuimos a los sonidos se relacionan directamente con propiedades físicas de la onda sonora. El volumen (alto o bajo) indica la intensidad del movimiento ondulatorio, el tono (agudo o grave) corresponde a la frecuencia (alta o baja) de la vibración y el timbre (cualidad por la que se distingue, por ejemplo, el sonido de un violín del de una flauta) depende de un conjunto de frecuencias acopladas a cada sonido simple que se pueden combinar con el llamado armónico fundamental (frecuencia o tono principal).

Reflexión

La reflexión de una onda es el rebote que experimenta cuando llega a un obstáculo grande, como una pared. Aunque el obstáculo absorba parte de la energía recibida (incluso vibrando si entra en resonancia) se produce también reflexión en la que se transmite de vuelta parte de la energía a las partículas del medio incidente.

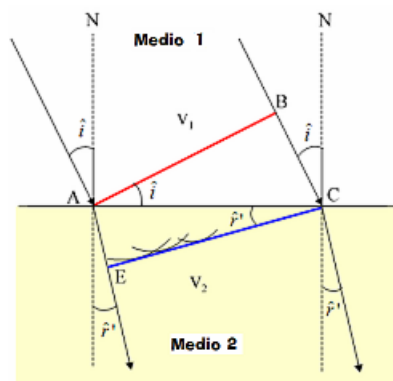


En la figura adjunta se observa un frente de ondas plano llegando a una superficie horizontal con un cierto ángulo \hat{i} de incidencia (se mide con respecto a la dirección normal, N) De acuerdo con el principio de Huygens, cuando el frente de ondas empieza a "tocar" la superficie, el punto A se convierte en un nuevo foco que emite ondas secundarias y según transcurre el tiempo y el frente AB va incidiendo, repiten este comportamiento todos los puntos de la superficie comprendidos entre A y C. El frente de ondas reflejado, DC, es el envolvente de las ondas secundarias que se han ido emitiendo durante un tiempo igual al periodo desde el tramo AC de la pared.

Aplicando nociones de geometría elemental al proceso, se llega a la conclusión de que el ángulo de incidencia \hat{i} es igual al ángulo de reflexión \hat{r} (ley de la reflexión)

Refracción

La refracción de una onda consiste en el cambio de dirección que experimenta cuando pasa de un medio a otro distinto. Este cambio de dirección se produce como consecuencia de la diferente velocidad de propagación que tiene la onda en ambos medios.



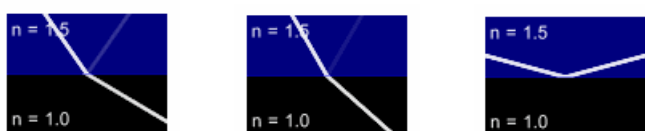
En la figura adjunta se representa la refracción de una onda plana desde un medio 1 a otro medio 2, suponiendo que la velocidad de propagación es menor en el segundo. A medida que el frente de ondas AB va incidiendo en la superficie de separación, los puntos AC de esa superficie se convierten en focos secundarios y transmiten la vibración hacia el medio 2. Debido a que la velocidad en el segundo medio es menor, la envolvente de las ondas secundarias transmitidas conforma un frente de ondas EC, en el que el punto E está más próximo a la superficie de separación que el B. En consecuencia, al pasar al segundo medio los rayos se desvían acercándose a la dirección normal N.

Mediante un razonamiento similar se comprueba que la desviación de la dirección de propagación tiene lugar en sentido contrario cuando la onda viaja de un medio donde su velocidad de propagación es menor a otro en el que es mayor.

Para describir formalmente la refracción de ondas luminosas (no mecánicas) se define el índice de refracción de un medio, n , indicando el número de veces que la velocidad de la luz es mayor en el vacío que en ese medio. Es decir, el índice de refracción es igual a 1 en el vacío (donde la luz tiene su máxima velocidad de 300000 Km/s) y mayor que la unidad en cualquier otro medio.

Normalmente la reflexión y la refracción se producen de forma simultánea. Cuando una onda incide sobre la superficie de separación entre dos medios, los puntos de esa superficie actúan como focos secundarios, que transmiten la vibración en todas las direcciones y forman frentes de onda reflejados y refractados. La energía y la intensidad de la onda incidente se reparten entre ambos procesos (reflexión y refracción) en una determinada proporción.

Los dibujos adjuntos muestran el rayo luminoso reflejado y el rayo luminoso refractado cuando incide luz procedente de un medio material ($n=1.5$) hacia el vacío ($n=1.0$) con varios ángulos de incidencia. A partir de un cierto valor del ángulo de incidencia no se produce refracción y toda la energía de la onda se traslada al frente de ondas reflejado. Este fenómeno se llama reflexión total y se explica teniendo en cuenta que, para este caso, el ángulo de incidencia es menor



que el de refracción. Al aumentar el primero lo hace también el segundo hasta un límite de 90° , por encima del cuál evidentemente no se produce la refracción.

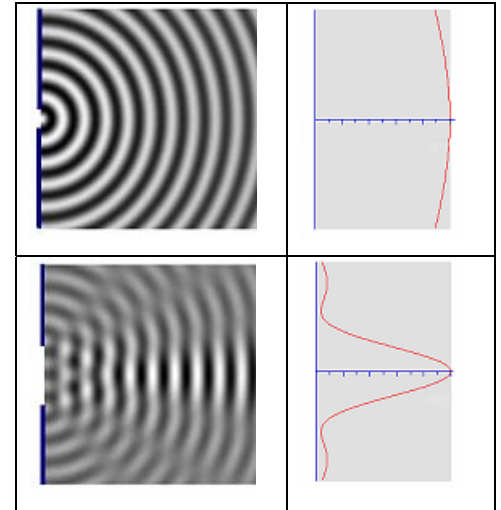
Difracción

Al interponer en el camino de una onda plana una barrera con una abertura, las vibraciones procedentes de los puntos que están a ambos lados de la abertura no pueden avanzar y detrás de la barrera sólo se observa el envolvente de las ondas que proceden de los focos secundarios que caben por la abertura. En consecuencia, los frentes de onda dejan de ser planos y adquieren una forma curvada o semicircular. Este fenómeno se llama **difracción**.



Para que se observe bien la difracción es necesario que la rendija sea del mismo tamaño o menor que la longitud de onda. Si es mayor, la curvatura de los frentes de onda se produce únicamente en los bordes y puede llegar a no apreciarse, tal como se indica en los dibujos adjuntos.

Para construir las figuras adjuntas se ha usado el programa gratuito Ondas 2.2, del profesor Pedro Rodríguez Porca. Muestran el aspecto de una onda difractada por una rendija y la distribución de la intensidad recibida en una pantalla colocada a una cierta distancia detrás de ella. En el primer caso el tamaño de la rendija es igual al de la longitud de onda. La difracción es total y la intensidad recibida en la pantalla disminuye lentamente desde el máximo situado enfrente de la rendija. En el segundo caso, el tamaño de la rendija es el triple que la longitud de onda. La difracción se produce cerca de cada uno de los bordes y a medida que nos alejamos de la rendija se observan perfiles de frentes de onda casi planos del tamaño de su abertura. Las ondas difractadas en las proximidades de cada borde se amortiguan y por ello la intensidad decae bruscamente desde el máximo.

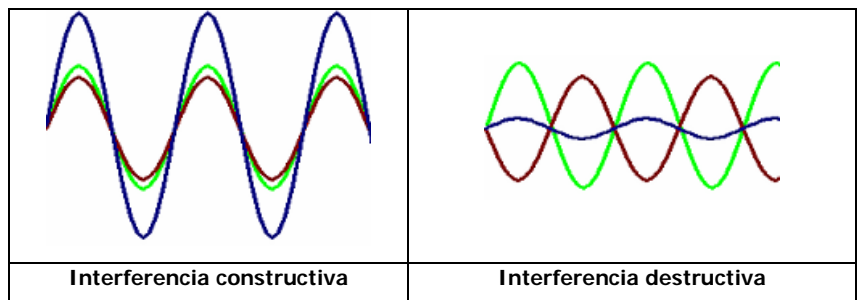


Un ejemplo de difracción de ondas mecánicas que pone en evidencia la influencia del tamaño de las rendijas y de los bordes ocurre cuando se interpone al avance de las olas producidas en el mar una embarcación. Si es un barquito pequeño las olas lo bordean y detrás de él hay oleaje. Sin embargo, si es un barco muy grande (mucho mayor que la longitud de onda las olas) sólo se aprecia la difracción en el borde, desde el cual se produce una rápida amortiguación de las olas. Detrás del barco se observa una zona sin oleaje.

Interferencias

Se produce **interferencia** cuando dos ondas coinciden en un mismo punto del medio por el que se propagan. Las vibraciones se superponen y el estado de vibración resultante del punto es la suma de los producidos por cada onda.

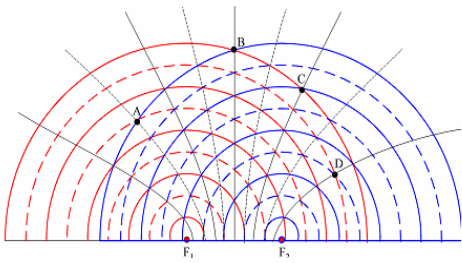
En las figuras adjuntas se representa la evolución de dos estados de vibración transmitidos a un punto cuando es alcanzado por dos ondas armónicas de la misma frecuencia. En el caso representado por el dibujo situado más a la izquierda los estados de vibración (verde y rojo) llegan al punto en fase y el resultado de su



superposición es una vibración (azul) de mayor intensidad. En ese punto tiene lugar una **interferencia constructiva**. En el otro dibujo las vibraciones llegan en oposición de fase y el resultado de su superposición es una vibración de menor intensidad (podría ser nula). Se produce una **interferencia destructiva**.

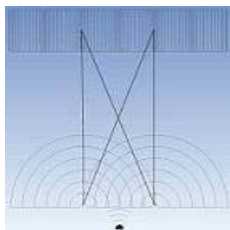
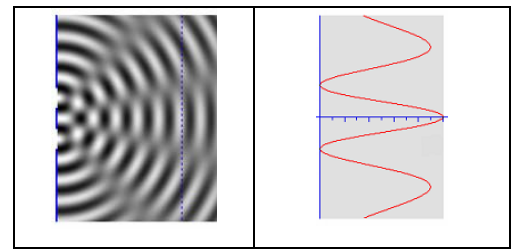
Para practicar este concepto hemos diseñado una animación *Modellus* interactiva. Representa dos estados de vibración armónica simple y su superposición. Se pueden modificar las amplitudes de las dos vibraciones y el desfase entre ellas, comprobando cómo afecta la modificación a la evolución del estado de vibración resultante de su superposición. También se representan tres partículas virtuales que simulan las vibraciones que se superponen y el punto del medio vibrante donde se superponen esos dos estados de vibración. Aplicando el desfase adecuado, el usuario logrará que ese punto vibre con amplitud máxima (interferencia constructiva) o nula (interferencia destructiva)





Una forma de producir interferencias consiste en hacer incidir una onda en una pared con dos aberturas. Se produce difracción en cada una de ellas y al otro lado de la pared se superponen las dos ondas secundarias dando lugar a interferencias constructivas y destructivas. En el dibujo se representa la situación. Las líneas de color continuas representan puntos en concordancia de fase con cada foco y las líneas discontinuas a puntos en oposición de fase con él. A los puntos como B, C o D las ondas rojas (procedentes de F_1) llegan en fase con las ondas azules (procedentes de F_2), mientras que a puntos como el A, las ondas rojas llegan en oposición de fase con las azules. Así se delimitan unas zonas donde se produce interferencia constructiva (se representan por líneas negras de trazo continuo) y otras en las que se produce interferencia destructiva (representadas por líneas negras de trazo discontinuo).

Las figuras adjuntas muestran el aspecto que adquiere una onda difractada de este modo y la distribución de la intensidad recibida en una pantalla colocada a una cierta distancia de dicha rendija (dónde indica la línea azul discontinua). La distribución de la intensidad recibida en la pantalla resulta con una sucesión de máximos y mínimos de intensidad equidistantes entre sí. El máximo de mayor intensidad se ubica enfrente del centro geométrico entre las dos rendijas.

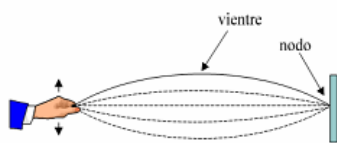


En estos procesos se obtiene en la pantalla un figura típica de **franjas de interferencia**, cuya forma depende de la forma geométrica que tengan las rendijas o aberturas (por ejemplo, rectangulares, circulares..) y cuya localización se puede prever en función de la separación existente entre las rendijas y la distancia a la que se coloca la pantalla. En todos los casos, el máximo de intensidad se ubica enfrente del centro geométrico entre las dos rendijas.

Las interferencias se pueden aprovechar para incrementar señales ondulatorias o para disminuirlas. Así, por ejemplo, en un teatro interesa que los sonidos que puede enviar un apuntador a los actores interfieran constructivamente en el escenario donde actúan y en cambio no se oigan en la zona donde se sientan los espectadores. Igualmente se precisa que la voz de los actores llegue alta y clara a los espectadores,.. Estos recintos tienen una geometría que considera estas necesidades, procurando que después de múltiples reflexiones (en paredes y techos) los sonidos interfieran de la forma más adecuada en cada zona.

Ondas estacionarias

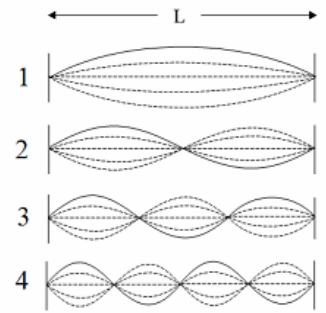
Las **ondas estacionarias** son ondas producidas en **un medio limitado**, como, por ejemplo, una cuerda elástica no muy larga y fija en al menos uno de sus dos extremos. Para generar en dicha cuerda una onda estacionaria, se puede atar por un extremo a una pared y hacer vibrar el otro con una pequeña amplitud. Se obtienen pulsos transversales que viajan hasta la pared, donde se reflejan y vuelven. La cuerda es recorrida por dos ondas de sentido opuesto y se producen interferencias que, en principio, dan lugar a unas oscilaciones bastante desordenadas. Aumentando la frecuencia con la que se agita el extremo de la cuerda se puede conseguir que las oscilaciones adquieran el perfil



mostrado por la figura adjunta. Corresponde a una onda en la que aumenta sensiblemente la amplitud y tiene un vientre fijo en el centro y dos nodos también fijos en los extremos. Esta onda se llama estacionaria porque, a diferencia del resto de ondas, en las que se aprecia un avance de las crestas y los valles, no parece moverse.

Si se fijan los dos extremos de la cuerda y se estira transversalmente de uno, dos, tres puntos se puede generar en la cuerda una secuencia de ondas estacionarias (1, 2, 3, 4,..), como la que muestra el dibujo.

Una propiedad destacada de estas ondas estacionarias es que su longitud de onda (λ , consecuentemente, su frecuencia) no puede adoptar cualquier valor arbitrario, sino sólo unos determinados valores que se relacionan con la longitud de la cuerda, mediante las siguientes expresiones: $\lambda_1 = 2L$, $\lambda_2 = 2L/2$, $\lambda_3 = 2L/3$, $\lambda_4 = 2L/4$,... $\lambda_n = 2nL/4$ (siendo $n = 1, 2, 3,..$) Teniendo en cuenta que $c = \lambda/T = \lambda q$, las frecuencias correspondientes son: $q_1 = c/2L$ $q_2 = 2c/2L$ $q_3 = 3c/2L$ $q_4 = 4c/2L$,... $q_n = nc/2L$ (siendo $n = 1, 2, 3,..$)

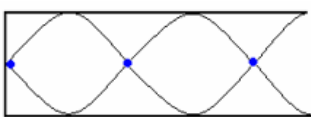


Estas frecuencias se llaman **frecuencias de resonancia** o frecuencias naturales del medio en el que se produce la onda (en este caso la cuerda). A la menor se la denomina **frecuencia fundamental** o "primer armónico" y las siguientes se designan sucesivamente como segundo armónico, tercer armónico, etc. En términos musicales (podemos pensar, por ejemplo, que se trata de la cuerda de una guitarra) al segundo armónico se le denomina "primer sobretono", al tercero "segundo sobretono" y así sucesivamente.

Las ondas estacionarias tienen una gran importancia. El viento, por ejemplo, puede producir ondas estacionarias en un puente colgante haciendo que la amplitud de oscilación aumente y provoque su rotura. En general los edificios muy altos han de proyectarse teniendo en cuenta las ondas estacionarias que podrían tener que soportar y lo mismo ocurre con los aviones. Los instrumentos de música dependen de las ondas estacionarias para producir sonidos musicales, desde los de cuerda (guitarra, violín,..) a los de viento (saxofón, trompeta,..) o de percusión.

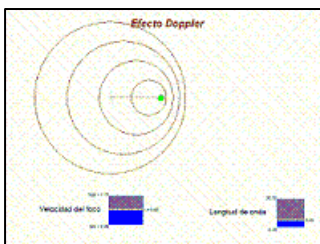


El profesor Vicent Soler realiza en el IES "Sixto Marco" de Elche un experimento muy interesante sobre ondas estacionarias de sonido en el interior de un tubo semiabierto. El montaje experimental utiliza un tubo de PVC, un altavoz conectado a un generador de ondas, un sensor de sonido conectado al ordenador y una cinta métrica para medir posiciones dentro del tubo. Los estudiantes comprueban que se pueden generar ondas estacionarias en el tubo abierto-cerrado a una determinada frecuencia y obtienen experimentalmente la distribución de la intensidad por el interior del tubo, identificando las posiciones de los nodos y los vientres correspondientes al tercer armónico.



Efecto Doppler

Este efecto, descubierto por *Cristian Doppler* (1803-1853), consiste en una variación de la frecuencia y la longitud de onda recibidas respecto de la frecuencia y la longitud de onda emitidas, que es causada por el movimiento relativo entre el foco emisor de las ondas y el receptor.



Para ayudar a entender el efecto *Doppler* hemos diseñado una animación *Modellus* interactiva en la que un foco puntual emite ondas circulares de una determinada frecuencia y longitud de onda. La aplicación permite dar velocidad a la fuente emisora y comprobar el efecto que tiene sobre las ondas recibidas.

Mientras el foco emisor permanece en reposo, todos los frentes de onda son concéntricos alrededor del foco, tienen la misma separación en todas las direcciones y en cualquier lugar, la longitud de onda y la

frecuencia recibidas es igual a las emitidas. No se produce efecto *Doppler*. Sin embargo, cuando el foco se desplaza va emitiendo sucesivos frentes de onda desde diferentes posiciones. Como la velocidad de propagación de la onda es independiente de ese movimiento del foco, los frentes de onda dejan de ser concéntricos: se aprietan en el sentido hacia donde avanza el foco y se separan en el sentido desde donde se aleja dicho foco. Como consecuencia de esto, la longitud de onda recibida es mayor en las zonas que ven alejarse al foco emisor y es menor en las zonas que lo ven acercarse. Lo contrario le ocurre a la frecuencia.

Lógicamente el efecto *Doppler* aumenta al incrementarse la velocidad de propagación del foco. Si dicha velocidad supera a la propia velocidad de propagación de la onda por el medio, los frentes de onda se agolpan en la dirección hacia la que avanza el foco y adquieren un perfil especial. Se dice en este caso que se produce una **onda de choque**, porque el foco emisor "rompe" una barrera que forman en el medio los frentes de onda que él mismo emite. Así lo hace, por ejemplo, la proa afilada de un barco cuando avanza a una velocidad suficiente y atraviesa las olas que el propio barco genera o un avión cuando avanza por el aire a una velocidad mayor que la del sonido (oímos entonces una detonación producida cuando el avión atraviesa los frentes de onda)



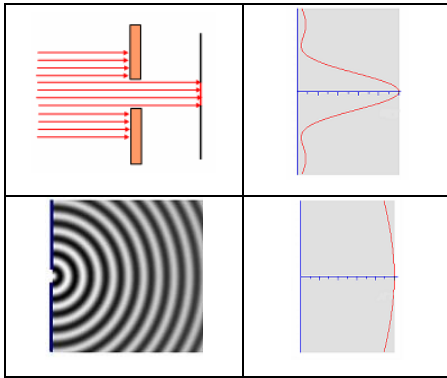
El efecto *Doppler* se experimenta cotidianamente cuando escuchamos el sonido emitido desde un coche por una bocina o por una sirena. El conductor, dentro del coche, escucha este sonido emitido por la bocina o la sirena con normalidad, porque su situación es de reposo relativo respecto del foco emisor. En cambio, desde la calle recibimos el sonido con un tono más agudo que el emitido (es decir, con mayor frecuencia y menor longitud de onda) mientras vemos al vehículo acercarse, y recibimos el sonido con un tono más grave que el emitido (menor frecuencia) mientras vemos al vehículo alejarse.

Entre las muchas aplicaciones del efecto *Doppler* mencionamos únicamente el papel destacado que jugó en la formulación en 1929 de la teoría del *big bang* por el astrónomo Hubble (1889-1953). La luz que recibimos en observatorios astronómicos procedente otras galaxias nos llega con una frecuencia menor (longitud de onda mayor) que la de emisión (se dice que está desplazada hacia el rojo). Hubble se dio cuenta que esto debía deberse al efecto *Doppler* y lo interpretó como una evidencia de que dichas galaxias se están alejando. Aplicando la ley del efecto *Doppler* comprobó que la velocidad de alejamiento de las galaxias es mayor cuanto más distantes estén de nosotros, lo que resulta coherente con la concepción de un Universo en expansión. Todo ello llevó a Hubble a plantear que el Universo debía haberse iniciado con una gran explosión (*big bang*) y desde entonces permanece en expansión

ONDAS Y PARTÍCULAS

En los apartados anteriores se han expuesto propiedades de las ondas mecánicas estudiadas en el marco de la física clásica. En este paradigma el modelo corpuscular de propagación de la energía y el modelo ondulatorio son diferentes e incompatibles entre sí.

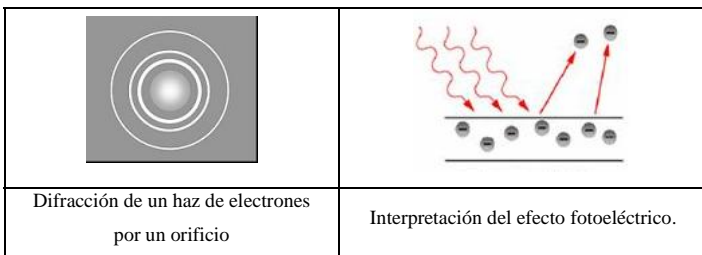
Las ondas tienen bastantes propiedades específicas (por ejemplo, difracción, interferencias, efecto *Doppler*,..) que, según el punto de vista de la física clásica, no pueden tener las partículas, y estas propiedades deberían servir para diferenciar los dos procesos. Así, por ejemplo, al atravesar una rendija:



Si lo hace un chorro de partículas (dibujos de arriba) no se producirá difracción. Casi todas seguirán en línea recta después de pasar por la rendija y, al incidir en una pantalla, deben producir un máximo de intensidad enfrente de la abertura y disminuir bruscamente dicha intensidad al alejarnos de esa zona. En cambio, si lo hace una onda y el tamaño de la rendija es del orden de magnitud de la longitud de onda (dibujos de abajo), se producirá difracción y la intensidad recibida en una pantalla se debe distribuir por ella de una forma más homogénea.

En algunos casos es sencillo verificar que se cumplen éstas y otras predicciones experimentales que deberían permitir diferenciar las ondas de un chorro de partículas viajeras. Por ejemplo, no existe duda de que por la superficie del agua se transmiten ondas mecánicas transversales, de que el sonido se transmite por el aire y por otros medios materiales mediante ondas longitudinales o de que una escopeta de repetición puede actuar como foco de un chorro de perdigones.

Las cosas se complican cuando se somete a este tipo de pruebas a la luz y también a radiaciones formadas por partículas atómicas y/o subatómicas. En estos casos se observan comportamientos, que la física clásica no puede explicar. La luz se comporta como una onda (no mecánica) que se refracta, se difracta, produce interferencias al atravesar una rendija doble o múltiple, etc. Pero, la misma luz también actúa como un chorro de corpúsculos en bastantes procesos en los que sus *cuantos de energía* (fotones) interaccionan con partículas subatómicas.



Lo mismo ocurre con las partículas como electrones, protones, etc. En el efecto fotoeléctrico, por ejemplo, la luz ilumina un metal y sus corpúsculos (fotones) empujan uno a uno a los electrones, que en este proceso se comportan como partículas. Sin embargo, un haz de estos mismos electrones experimenta difracción cuando pasa por un pequeño orificio

circular de tamaño suficientemente pequeño (dibuja la figura típica de difracción en una pantalla situada detrás del orificio). También dos haces de electrones producen interferencias en un experimento consistente en hacerlos pasar a través de una rendija doble o múltiple.

Ya hemos dicho que para la física clásica resulta totalmente contradictorio que una misma entidad física pueda manifestar un comportamiento corpuscular y también ondulatorio. Con el desarrollo de la física cuántica, ambos comportamientos, que parecían contradictorios, se pudieron integrar en un modelo coherente.

PROBLEMAS PENDIENTES

1) Las ondas mecánicas transmiten energía entre partículas de un medio material. ¿Cómo se conciben las ondas no mecánicas, capaces de propagarse en el vacío?

2) ¿Cómo se entiende el hecho de que las partículas y la luz manifiesten comportamientos corpusculares y también ondulatorios?

Estas cuestiones se desarrollan en la página dedicada al concepto de campo.

A los experimentos, materiales y referencias citadas en este documento se accede desde la página dedicada al estudio de Ondas mecánicas (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Ondas/ondas.htm>) dentro de la web del Departamento de Física y Química del IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>)