

MOVIMIENTO ONDULATORIO

El movimiento ondulatorio

Todos tenemos una noción intuitiva sobre los movimientos ondulatorios. Estas palabras traen a nuestra mente la imagen de las vibraciones que se transmiten por la cuerda de una guitarra o las olas marinas que van a morir a la playa.

Hoy en día sabemos que fenómenos tan esenciales para nosotros como la luz y el sonido poseen una clara naturaleza ondulatoria..

Los fenómenos ondulatorios son un medio de transporte de energía ampliamente usado por la Naturaleza, de forma que su estudio ocupa necesariamente un lugar importante en la Física.

Objetivos

- Comprender la noción general de onda como transmisora de la energía asociada a una vibración y **algunas magnitudes comunes a todas las ondas como longitud de onda, amplitud, frecuencia, periodo y velocidad de propagación.**
- Clasificar las ondas adecuadamente por la relación entre la dirección de la vibración y la de propagación, así como por su propagación en una o más dimensiones.
- Poder utilizar **la ecuación de ondas** para predecir el estado de vibración de un punto alcanzado por las ondas.
- Entender las leyes que gobiernan algunas propiedades de las ondas como **reflexión, refracción, difracción, interferencia y polarización.**
- Entender la noción de intensidad y poderla aplicar al cálculo de intensidades a diversas distancias del foco y con diferentes grados de absorción por el medio.
- Entender el efecto que produce el **movimiento relativo de foco y observador** sobre las ondas observadas.

Las dimensiones de las ondas



Las ondas que produce una piedra al caer en un estanque se propagan en dos direcciones, a lo largo y ancho del estanque. Las ondas luminosas de la bombilla de la derecha se propagan en las tres direcciones del espacio.

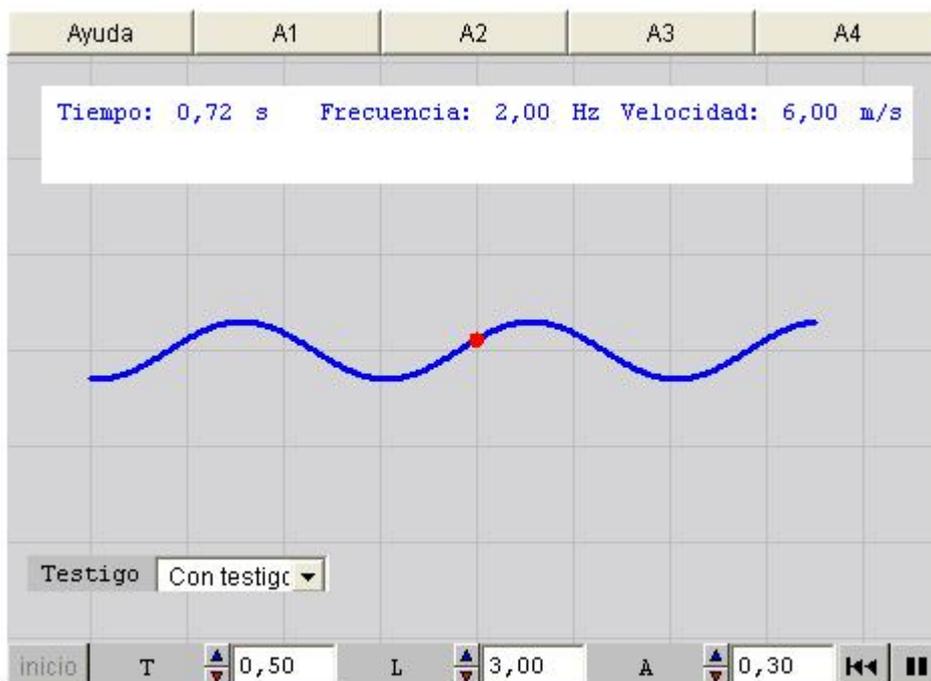


Son ondas **bidimensionales** y **tridimensionales** respectivamente.

Algunas propiedades de las ondas, de validez muy general, se pueden estudiar a partir de ondas **unidimensionales** que se propagan en una sola dirección y son más fáciles de analizar. Pulsemos el botón avanzar para estudiar este tipo de ondas.

Ondas unidimensionales transversales

Como ejemplo de onda unidimensional vamos a estudiar la transmisión de vibraciones por una cuerda tensa. Como veremos en su estudio se trata de una onda **transversal**. En la escena también estudiamos algunas magnitudes clave en los fenómenos ondulatorios:



periodo, frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación. Una generalización de este tipo de ondas, podemos encontrarlo en **Bandera**

Ayuda: Sacudiendo una cuerda tensa producimos ondas transversales. El usuario puede controlar el periodo (control T), longitud de onda (control L) y amplitud (control A) del movimiento producido. También puede elegir la presencia de un punto testigo sobre la cuerda. El botón de la barra inferior, a la derecha, pone en marcha la simulación. A su lado hay un botón de rebobinado para comenzar de nuevo la simulación. El botón Inicio restaura la situación inicial.

A1: Con el botón animar, pon en marcha la simulación. ¿Por qué consideramos a este movimiento como transversal?

Para contestar, sitúa un punto testigo en la escena. Compara el movimiento de este punto con el de la onda. ¿Qué ángulo forma el movimiento de la partícula con la propagación de la onda?

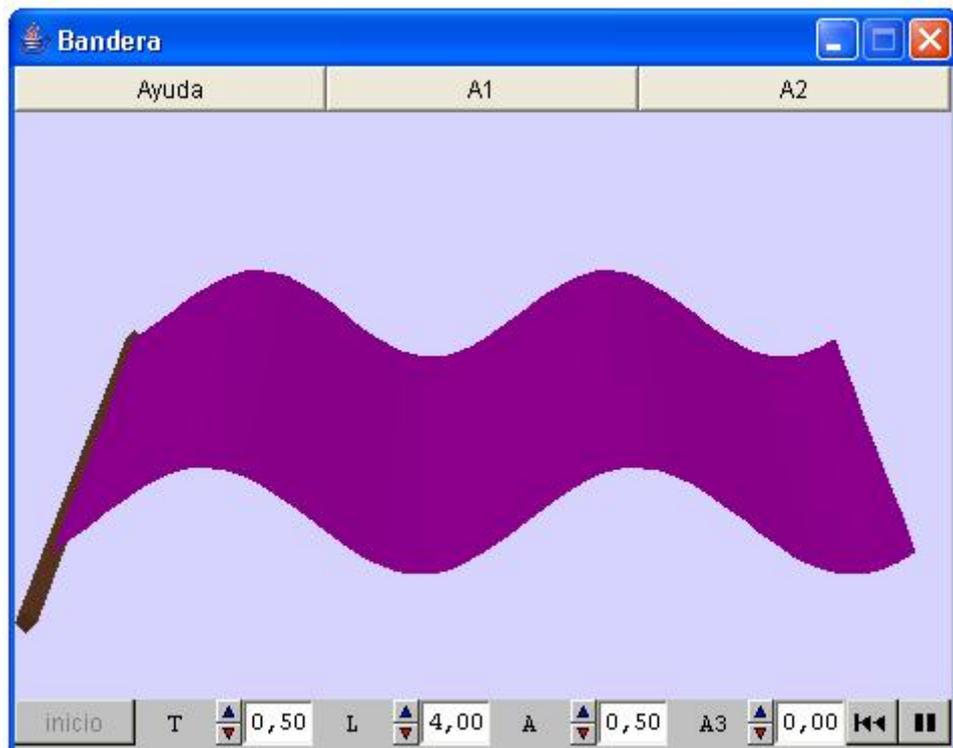
A2: Prueba a cambiar varias veces los valores del periodo y la amplitud.

Observa los efectos de estas variaciones. ¿Cómo definirías periodo, frecuencia y amplitud?

¿Qué relación observas entre dos de estas magnitudes?

A3: Cambia el valor del parámetro L (longitud de onda) varias veces. ¿Cómo la definirías? ¿Tiene algo que ver con la amplitud?

A4: Investigaremos qué es la velocidad de propagación. Se trata de la velocidad con que se trasladan las ondas y no tiene nada que ver con la velocidad de vibración de las partículas. Prueba a dar varios valores al periodo y a la longitud de onda, anotando estos datos y las velocidades de propagación que se obtienen. ¿Ves alguna relación matemática entre las tres magnitudes?



Ayuda: Al sacudir el asta de la bandera las vibraciones se extienden por la tela. El usuario puede alterar periodo (control T), longitud de onda (control L) y amplitud (control A). Los botones tipo casete arrancan, frenan y devuelven a su comienzo la animación. El botón Inicio restaura la situación inicial.

A1: Pulsemos el botón de arranque. ¿Se trata de un movimiento bidimensional o unidimensional?

La primera idea es afirmar su carácter bidimensional, pero debemos fijarnos en que la dirección de la propagación se produce en un sólo frente.

Para comprenderlo mejor pinchemos un punto de la escena y arrastremos el ratón para cambiar nuestra perspectiva. Tratemos de situarnos de forma que la bandera se vea casi de canto.

¿Vemos ahora su similitud con el caso anterior?

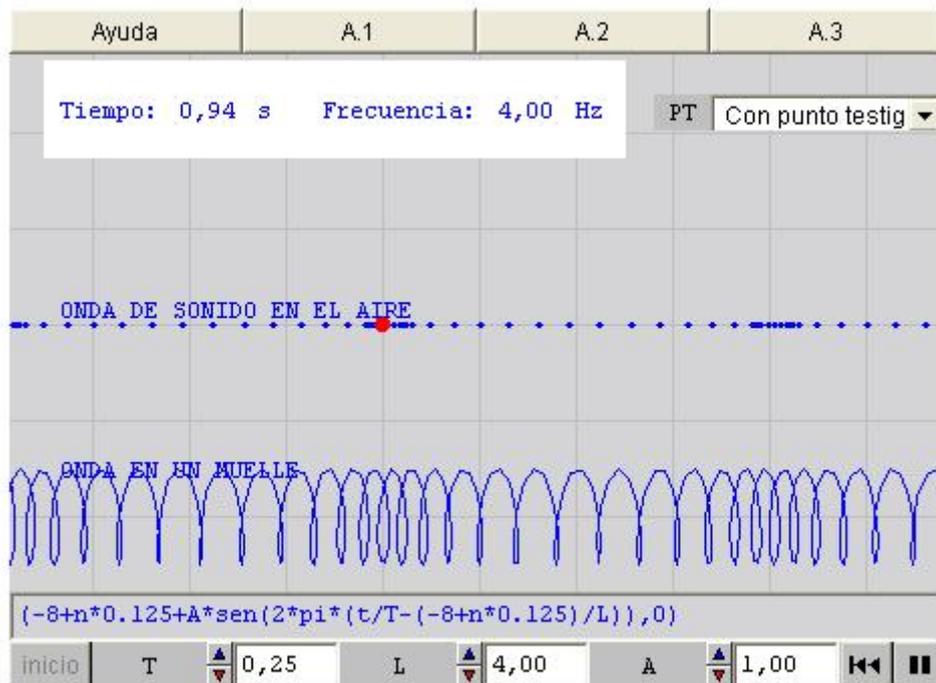
A2: Los puntos que vibran simultáneamente en la misma fase constituyen un frente de onda. Es muy corriente representar los frentes de onda por sus crestas (las líneas que unen los mismos máximos).

Hay también otro tipo de ondas unidimensionales que interesa conocer: las **longitudinales**.

Ondas longitudinales

En la escena observamos dos tipos de movimientos ondulatorios longitudinales: una onda en un muelle y una onda de sonido en el aire. Aunque esta segunda no es unidimensional, esta diferencia no importa para nuestros propósitos actuales.

Lo importante es que observemos que magnitudes como longitud de onda, periodo o velocidad de propagación, tienen el mismo significado en ondas transversales y longitudinales.



Ayuda: En la escena se estudian simultáneamente dos fenómenos ondulatorios: la propagación de una vibración a lo largo de un muelle y de una onda sonora en el aire.

Debemos tener en cuenta que mientras las ondas en el muelle son estrictamente unidimensionales, las ondas sonoras son tridimensionales.

No obstante, para todos los propósitos de la escena, esta diferencia es irrelevante.

El usuario puede alterar el periodo de las vibraciones (pulsador T), la longitud de onda (pulsador L) y la amplitud (A).

También puede situar u omitir un punto testigo (pulsador PT).

Los botones tipo casete permiten arrancar, detener y volver al principio una animación.

El botón Inicio restaura la situación inicial.

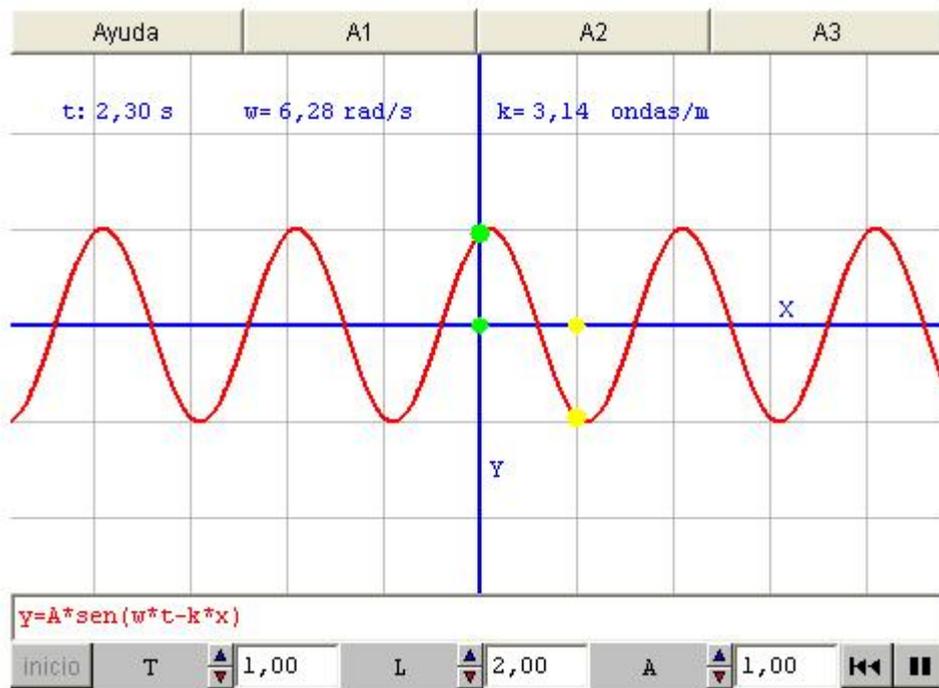
A1: Hagamos aparecer el punto testigo y pulsemos animar. Así comprobaremos la definición de este tipo de ondas. ¿Qué fase podríamos asimilar a las crestas de las ondas transversales? ¿Qué propiedad física macroscópica podría asociarse con las crestas de sonido? ¿Y con los valles?

A2: Modificando varias veces los valores de la amplitud podremos contestar estas preguntas: ¿Qué efecto tiene la amplitud sobre las ondas de sonido? ¿Y sobre las ondas en los muelles? ¿Cómo identificará el oído un sonido con una gran amplitud?

A3: Modifiquemos los valores del periodo. ¿Qué efecto se produce sobre las ondas? ¿Conocemos alguna característica del sonido que dependa de este efecto?

Ecuación general de las ondas

La forma de la onda transversal recuerda a la función sinusoidal, así que no es extraño que una función de este tipo explique el movimiento ondulatorio.



En la escena utilizamos una onda transversal por ser más fácil observar sus características. Sin embargo, **la ecuación de ondas** y todas las conclusiones de la escena son igualmente válidas para ondas longitudinales.

Ayuda: En la escena vemos una onda transversal y la ecuación de onda que nos da el estado de vibración de cualquier partícula afectada por la onda en cualquier momento.

El usuario puede controlar el periodo (pulsador T), longitud de onda, (pulsador L) y amplitud (pulsador A).

También puede controlar la vibración de dos puntos diferentes, pinchando y arrastrando en los puntos verde y amarillo del eje X.

El programa informa en todo momento del tiempo pasado y los valores de los parámetros w y k .

Los botones tipo casete arrancan, detienen y devuelven la animación a su comienzo.

El botón Inicio restaura la situación inicial.

A1: El parámetro w se denomina frecuencia angular y el parámetro k es el número de ondas.

Alterando los controles numéricos a disposición del usuario, debemos investigar de qué magnitudes dependen estos parámetros y cómo es la relación matemática que regula esta dependencia.

A2: Con la escena detenida, es decir, con el tiempo congelado, desplazando cualquiera de los puntos móviles verde y amarillo, podemos ver la fase de la vibración en que se encuentra cada punto.

Demos a la longitud de onda el valor 4 m y separemos los controles verde y amarillo por distancias de 1, 2, 3 y 4 m. ¿Qué observamos en las diferencias de fase correspondientes en cada caso? ¿Cómo expresaríamos este resultado en valores angulares correspondientes a la función trigonométrica incluida en la función de onda?

A3: A estas alturas ya sabemos que la velocidad de propagación es igual a la longitud de onda dividida por el periodo.

¿Se puede calcular esta longitud en función de los parámetros w y k de la onda?

Trate el usuario de encontrar la relación matemática correspondiente y compruébela experimentalmente en la escena.

Para ello situaremos los puntos móviles verde y amarillo, con la escena detenida, a una unidad exacta (1 m) de distancia. Después, puesta la escena en marcha, deténgase en el momento en que la fase en que estaba inicialmente el punto verde alcance al amarillo.

Dividiendo la distancia (1 m) por el tiempo transcurrido mediremos la velocidad de propagación.

Primeras conclusiones sobre las ondas

- Podemos considerar que las ondas son **unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales** según el número de direcciones en que se propagan.
- Si la vibración transmitida es perpendicular a la dirección de propagación, la onda es **transversal**. Si la vibración es paralela a la dirección de propagación, la onda es **longitudinal**. En ambos casos empleamos las mismas magnitudes características.
- **Periodo** (valor T) Es el tiempo que tarda un punto alcanzado por la onda en terminar una vibración completa.
- **Frecuencia**, Inversa del periodo, nos mide el número de ondas que pasan por un punto en la unidad de tiempo.
- **Longitud de onda** (representada en las simulaciones por L y normalmente llamada lambda) es la distancia mínima entre dos puntos que se encuentran en la misma fase.
- **Velocidad de propagación** Nos mide el espacio recorrido por unidad de tiempo una fase de la onda. Se cumple que $V = L/T$
- La ecuación de ondas describe el estado de vibración de cualquier punto alcanzado por las ondas en una posición y momento determinados. En su forma más simple, para una onda unidimensional, esta ecuación es: $Y = A \cdot \text{sen}(w \cdot t - k \cdot x)$
- En esta ecuación: $w = 6.2832/T$, se llama **frecuencia angular**, mientras que $k = 6.2832/L$ es el **número de ondas**.

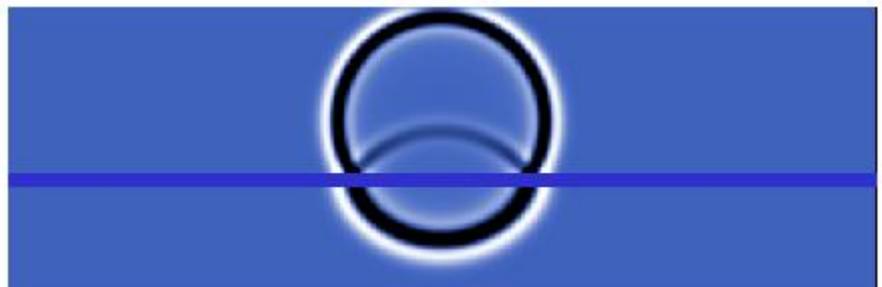
La reflexión de las ondas



Cuando las olas marinas encuentran un obstáculo en su camino, cambian de dirección. En general, toda clase de ondas, cuando encuentran obstáculos cambian su dirección, propiedad que denominamos **reflexión**.

En la escena adjunta se ilustra esta propiedad de forma general.

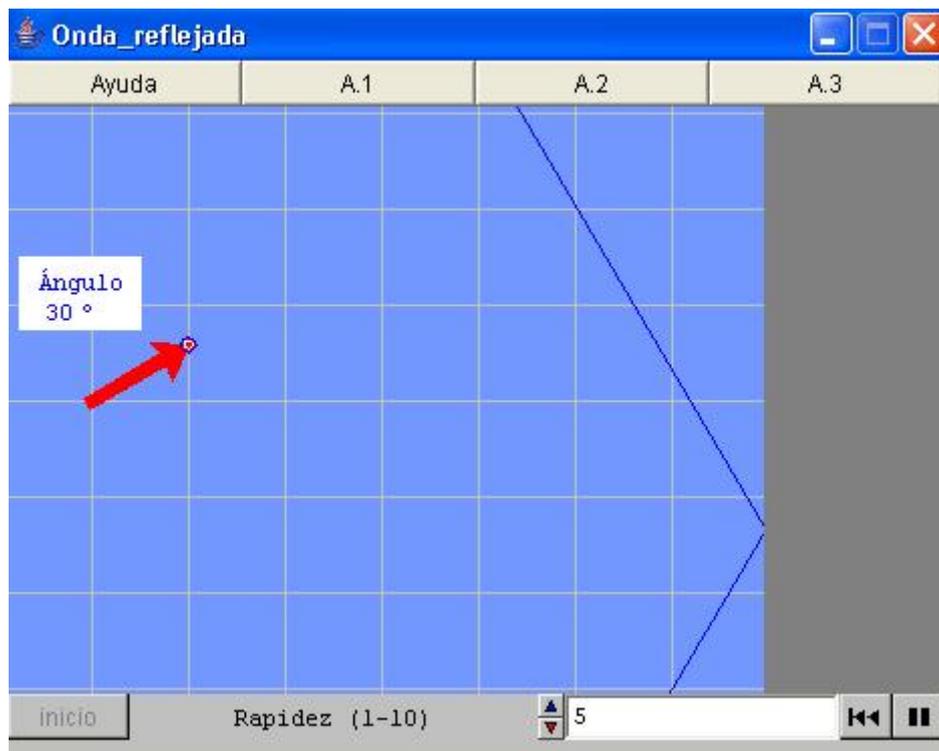
Las ondas generadas en una cierta fuente



encuentran una superficie de separación de dos medios.

Vemos cómo una parte de la energía que transportan las ondas es afectada por la reflexión. Podemos estudiar este fenómeno pulsando **Onda reflejada**

La parte de la onda que cambia de medio constituye un fenómeno aparte que estudiaremos después, la refracción.



Ayuda: Un frente de onda representado por una línea de azul intenso va a chocar con un obstáculo que impide su propagación.

El usuario puede, arrastrando el extremo de la flecha roja, variar la dirección del frente.

También puede alterar la rapidez de la simulación para acomodarla a su propio ordenador.

El botón de puesta en marcha sirve para arrancar o detener la simulación. El botón de retroceso devuelve la onda al punto de partida.

El botón inicio restaura la situación del comienzo. Entre una experiencia y otra es conveniente pulsar este botón para evitar efectos inesperados.

A1: Con el ángulo de dirección situado en 0° , pulsa el botón de animación. ¿Qué ocurre tras el choque?

A2: Variemos el ángulo de dirección del frente. Observemos el resultado para varios ángulos y tratemos de obtener una ley general (puede resultar útil la red de coordenadas y disminuir la velocidad de la simulación). Fijémonos en el ángulo que forman los frentes de onda con la recta normal a la superficie de reflexión.

A3: ¿Qué fenómenos naturales, referidos al sonido y a la luz, que se relacionen con el fenómeno de la reflexión de las ondas?

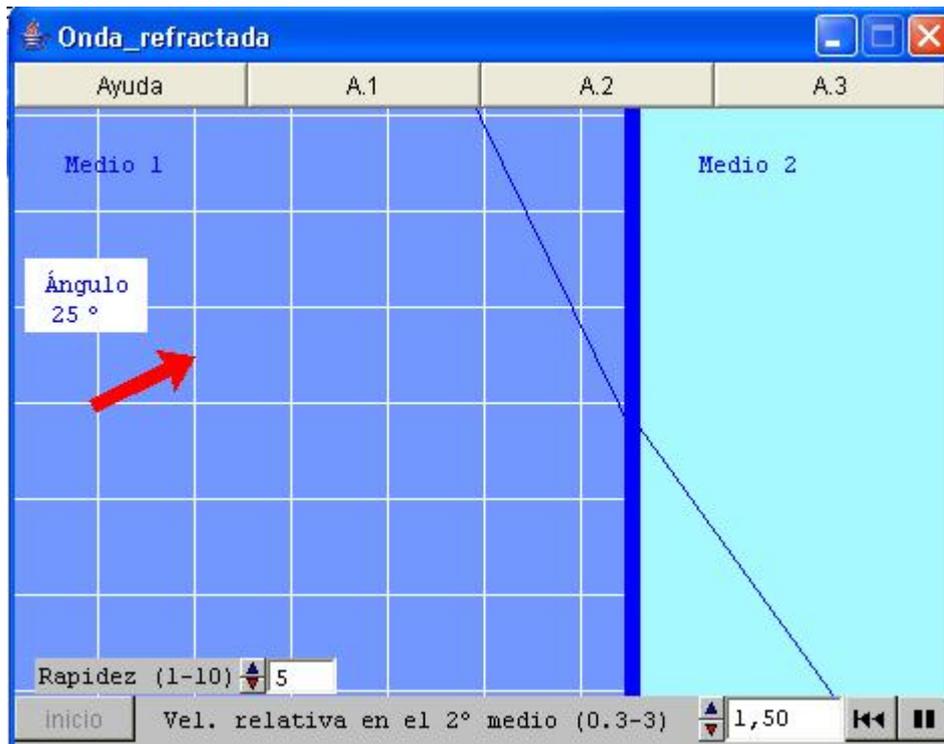
Busquemos en nuestro texto las leyes de Snell para ver cómo corresponden con nuestra experiencia.

La refracción de las ondas



Cuando un movimiento ondulatorio cambia de medio, es normal que cambie también su velocidad de propagación. Indirectamente, este cambio de velocidad puede causar cambios de dirección.

Conocemos como **refracción** este fenómeno de cambio de velocidad y dirección. Podemos estudiarlo pulsando **Onda refractada**.



Ayuda: En la escena observamos un frente de ondas que cambia de medio.

El usuario puede alterar la velocidad relativa de las ondas (velocidad en el segundo medio dividida por la velocidad en el primer medio).

También puede variar la rapidez de ejecución de la simulación (pulsador rapidez) y la dirección del frente con el punto rojo, arrastrable con el ratón.

Los botones tipo casete permiten arrancar, detener o reiniciar la animación.

El botón inicio restaura la situación del comienzo.

A1: Pulsa el botón de animación de la escena sin alterar ninguno de los valores dados. ¿Ocurre algo cuando la onda cambia de medio?. ¿Y si cambiamos la dirección del frente? Restaura los valores iniciales (botón inicio) y altera el valor de la velocidad. ¿Qué observas ahora en la forma del frente?

A2: Toma ahora una velocidad relativa mayor que uno (mayor velocidad de la onda en el segundo medio que en el primero). ¿Qué ocurre ahora cuando el frente cambia de medio? ¿Cómo varía el ángulo de dirección del frente? ¿Y si tomamos valores de velocidad menores que uno?

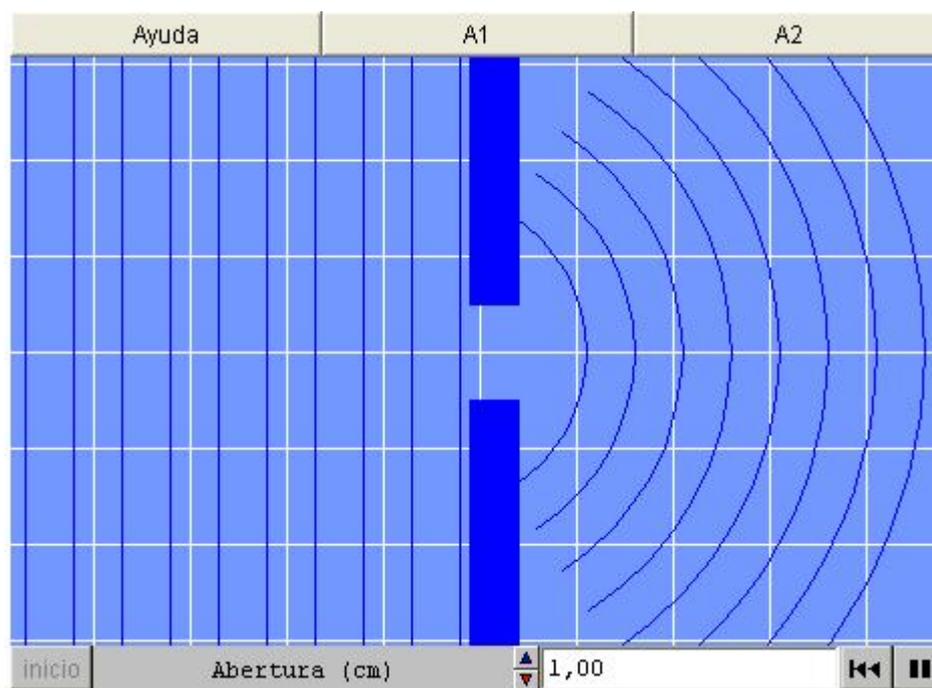
A3: ¿Recuerdas algún fenómeno relacionado con la luz y el agua en que se note el fenómeno de la refracción? ¿Cómo se aprovecha el fenómeno de la refracción de la luz en favor de nuestro bienestar?

El fenómeno de la difracción

La **difracción** es la propiedad que permite a los movimientos ondulatorios propagarse en todas las direcciones a partir de aberturas en obstáculos.

Esta propiedad es la que permite también a las ondas "doblar las esquinas". Por eso podemos, por ejemplo, oír la conversación de dos personas a la vuelta de una esquina o detrás de una tapia.

Con la escena adjunta podemos ver algunas características importantes de este fenómeno.



Ayuda: En la escena vemos sucesivos frentes de ondas pasar a través de una abertura.

El usuario puede controlar la anchura de la abertura (pulsador Abertura).

También puede utilizar los botones tipo casete para arrancar detener o volver al principio la simulación.

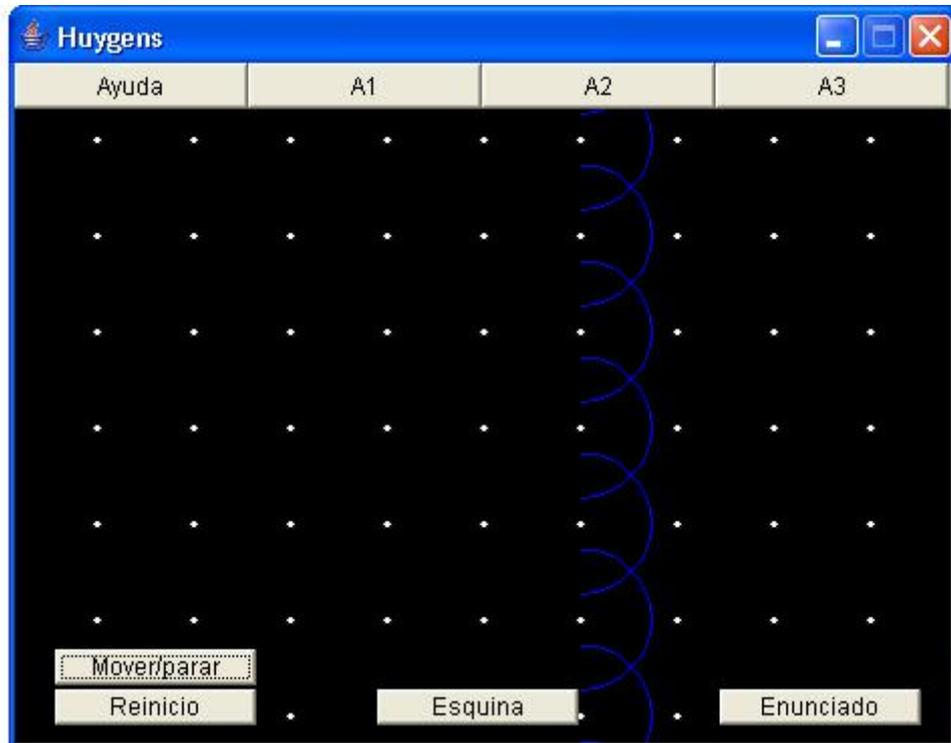
El botón inicio restaura la situación del comienzo.

A1: Pulsa el botón de animación de la escena. Estás viendo el fenómeno de la difracción de un movimiento ondulatorio. ¿Cómo describirías este fenómeno?

A2: Hay un pulsador que te permite cambiar la anchura de la apertura. ¿Cómo influye la apertura en el fenómeno de la difracción? Si hacemos un orificio en un cartón con ayuda de un alfiler y situamos al otro lado una linterna, podemos ver el rayo de luz que

pasa por el agujero sin que se note difracción. ¿Qué consecuencia podemos sacar sobre la naturaleza de la luz?

Huygens explicó este fenómeno con un principio hipotético que podemos estudiar en **Huygens**



Ayuda: En la escena consideramos la propagación de la cresta de una onda por un medio representado por una serie de puntos.

Supondremos que los puntos están infinitamente próximos y que están observados por un potente microscopio.

El botón Mover/parar pone en marcha o detiene la animación.

El botón Reinicio nos devuelve a la situación inicial. Si dejamos marchar las ondas por la derecha, sólo podremos volver a verlas pulsando primero este botón.

El botón Esquina permite añadir o quitar un obstáculo con una esquina en la marcha del movimiento ondulatorio.

El botón Enunciado nos muestra el principio de Huygens.

A1: Arranquemos la animación. ¿Qué ocurre a medida que las ondas alcanzan algún punto del medio?

Pulsemos el botón de Enunciado. ¿Se corresponde este enunciado con las observaciones?

A2: Después de poner en marcha la escena, detengamos la animación entre dos filas de puntos, justo cuando las ondas van a alcanzar una de las filas.

¿Qué forma tiene la línea de choque del conjunto de ondas? ¿Cómo sería esta línea si el conjunto de puntos del medio fuera realmente infinito?

A3: Después de pulsar el botón Reinicio, pulsemos también Esquina.

A continuación pulsaremos Mover/parar.

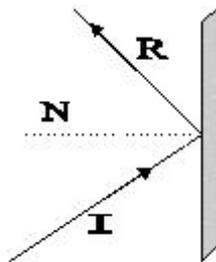
¿Qué ocurre cuando la onda llega a la esquina?

Detengamos el movimiento antes de que cruce toda la pantalla.

¿Cómo podemos explicar, a la vista de la escena, la propiedad de difracción por los obstáculos?

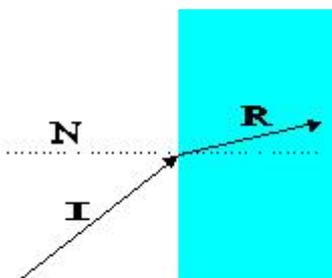
Enunciado: Todo punto de un medio alcanzado por un movimiento ondulatorio se convierte a su vez en foco de ese propio movimiento.

Conclusiones sobre las propiedades de las ondas



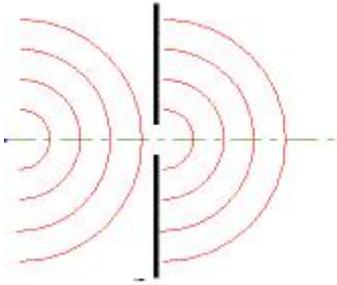
Cuando las ondas encuentran un obstáculo a su propagación, se produce la **reflexión**.

La dirección I de la onda incidente y la dirección R de la onda reflejada, forman el mismo ángulo con la recta normal a la superficie del obstáculo.



Cuando las ondas cambian de medio de propagación, también cambian de velocidad de propagación, lo que origina el cambio de dirección conocido como **refracción**.

Los ángulos de la onda incidente I con la normal a la superficie de separación y de la onda refractada R con esta misma normal cumplen la ley de Snell $V_1 \cdot \text{sen}(I) = V_2 \cdot \text{sen}(R)$ donde V1 y V2 son las velocidades de propagación en cada medio.

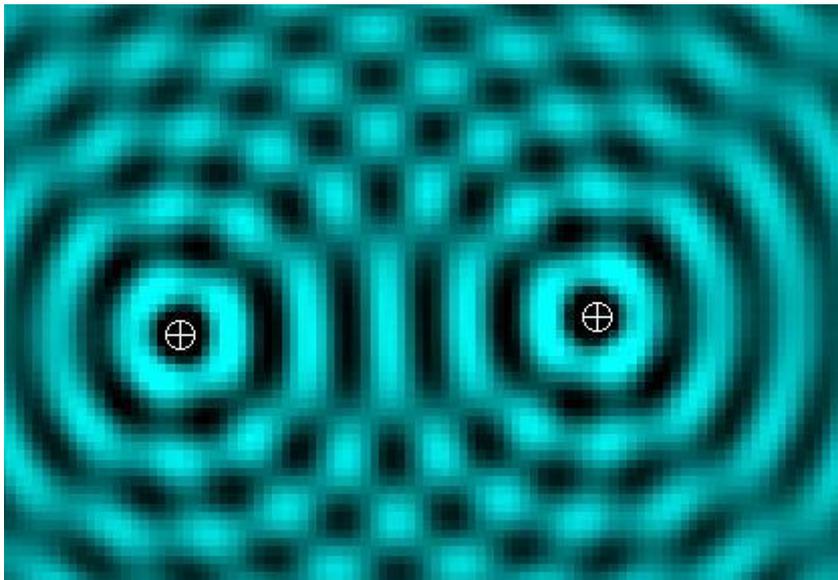


La propagación de los fenómenos ondulatorios en todas las direcciones a partir de rendijas en obstáculos o bordeando sus esquinas se denomina **difracción**. La difracción es más patente cuando el grosor de la rendija o el tamaño del obstáculo son del mismo orden que la longitud de onda.

Huygens explicó esta propiedad suponiendo que todo punto del espacio alcanzado por un fenómeno ondulatorio se convierte en foco de ese mismo fenómeno.

El fenómeno de la interferencia

En la imagen vemos una serie de ondas propagándose sobre la superficie del agua a partir de dos focos puntuales.

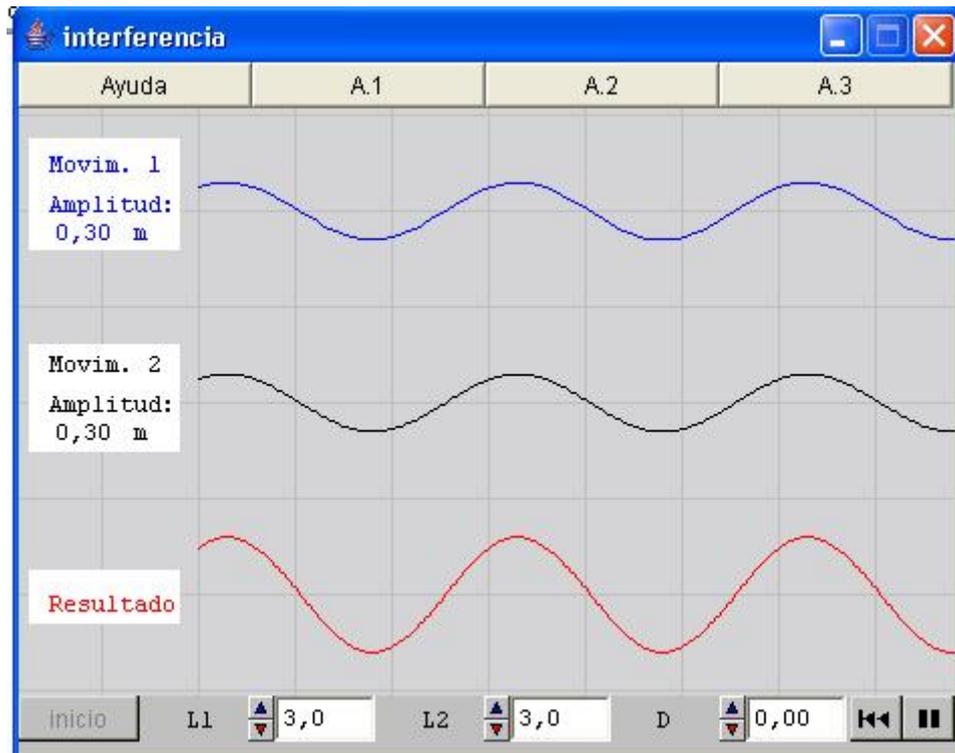


La superposición de las ondas, que no altera la velocidad de ninguna de ellas, se llama **interferencia**.

Dependiendo de la fase de las ondas que se superponen se pueden formar grandes crestas o zonas en que las ondas parecen anularse.

La forma de estudiar mejor este fenómeno es mediante ondas unidimensionales transversales, aunque las conclusiones que saquemos con

este estudio son generalizables a cualquier fenómeno ondulatorio. Para realizar este estudio, pulsemos **interferencia**



Ayuda: En esta escena vemos dos movimientos ondulatorios simples, representados por las curvas azul y negra, y el resultado de su superposición, representado por la curva roja.

El usuario puede alterar las longitudes de onda L1 y L2 de las dos ondas simples.

También puede alterar su amplitud, pinchando y arrastrando los puntos iniciales de cada una de las dos ondas.

Los botones de casete sirven para arrancar o detener la simulación.

El botón inicio restaura la situación inicial.

A1: Manteniendo en 0 el valor del desfase, asigna un valor a las amplitudes y pulsa el botón animar. Debajo de las dos ondas aparecerá el resultado: la interferencia constructiva de las dos ondas. Cambia la amplitud de cualquiera de ellas y observa el efecto del cambio. ¿Cómo explicarías en qué consiste la interferencia constructiva?

A2: Ve cambiando ahora el desfase, 0.1, 0.2...¿Qué significa físicamente el desfase? La interferencia destructiva se produce con un desfase de media onda. ¿Cómo explicarías en qué consiste la interferencia destructiva?

A3: Acorta todo lo que puedas la longitud de onda y la amplitud de uno de los dos movimientos y haz lo contrario con el otro. ¿Cómo describirías la interferencia resultante? Este resultado tiene que ver con las emisiones de radio en frecuencia modulada. ¿Cómo interpretaremos la frecuencia modulada?

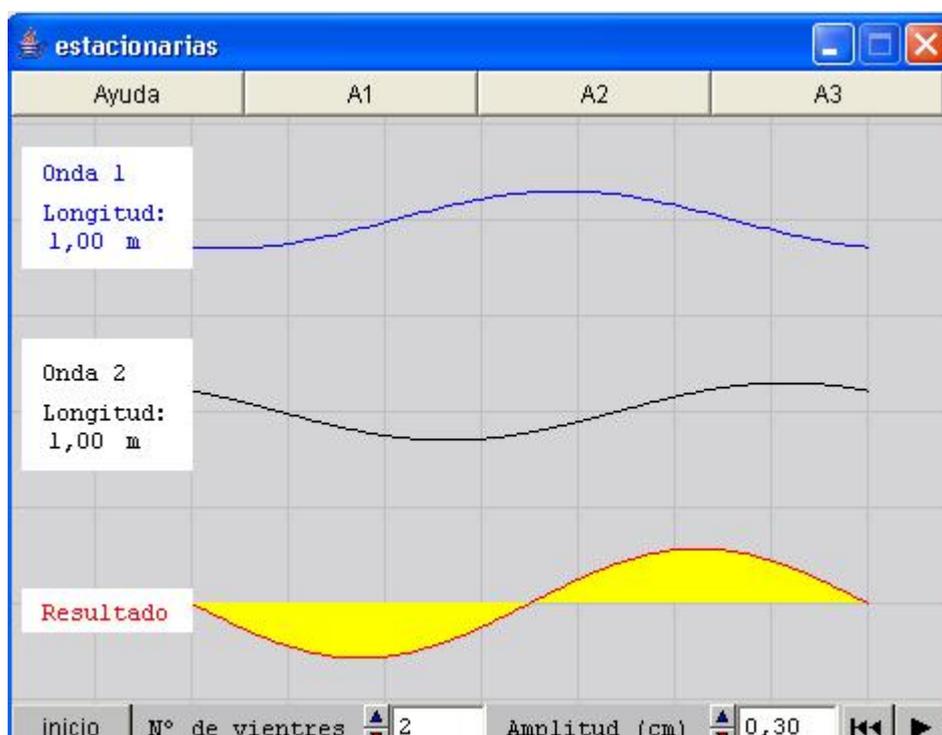
Ondas estacionarias



Cuando trenes de ondas idénticas viajan en direcciones opuestas se producen las llamadas ondas **estacionarias**.

Un caso muy conocido es el que se produce al pulsar la cuerda de la guitarra. Las vibraciones se transmiten en las dos direcciones hasta los extremos de la cuerda, se reflejan en ellos y se superponen en sentidos contrarios. Cuando movemos los dedos a lo largo de los trastes estamos cambiando la posición de uno de estos extremos reflectantes.

Entrando en **estacionarias** podemos estudiar de cerca este fenómeno.



Ayuda: Vemos dos vibraciones que se propagan por una cuerda en direcciones opuestas con igual velocidad y longitud de onda.

El usuario puede alterar la amplitud de ambas con el control.

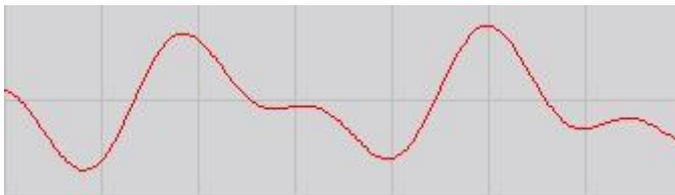
A1: Pulsa el botón de animación de la escena. Observa los dos movimientos que se cruzan y el resultado de su interferencia. ¿Por qué se llamará onda estacionaria? Una tarea interesante es justificar con la superposición de las ecuaciones de ondas este carácter estacionario.

A2: Altera el número de vientres con el control correspondiente. Según lo que ves, ¿cómo definirías el vientre de una onda estacionaria? Varía la amplitud ¿Cómo influye en la posición de los vientres?

A3: Se llaman nodos los puntos que no participan de la vibración. ¿Qué relación se percibe entre el número de nodos y el de vientres?

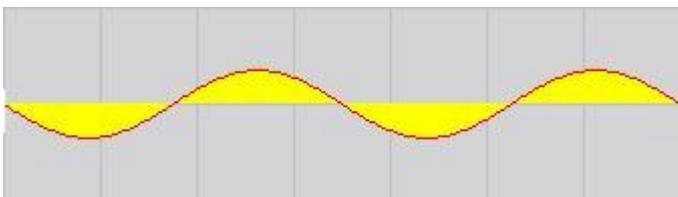
¿Qué distancia, en fracciones de onda hay entre dos vientres consecutivos? ¿Y entre dos nodos? ¿Y entre un vientre y el nodo más próximo?

Conclusiones sobre las interferencias



La superposición de ondas de la misma naturaleza en la misma región del espacio se llama interferencia. El estado de vibración en un punto determinado se define por la suma de las ecuaciones de onda correspondientes.

Cuando se trata de ondas de la misma longitud y periodo, la interferencia es constructiva si la diferencia de fase entre las componentes es nula. En este caso las amplitudes de las dos ondas se suman. Si la diferencia de fase es de media onda la interferencia es destructiva y la amplitud resultante es la diferencia entre las amplitudes de las componentes.



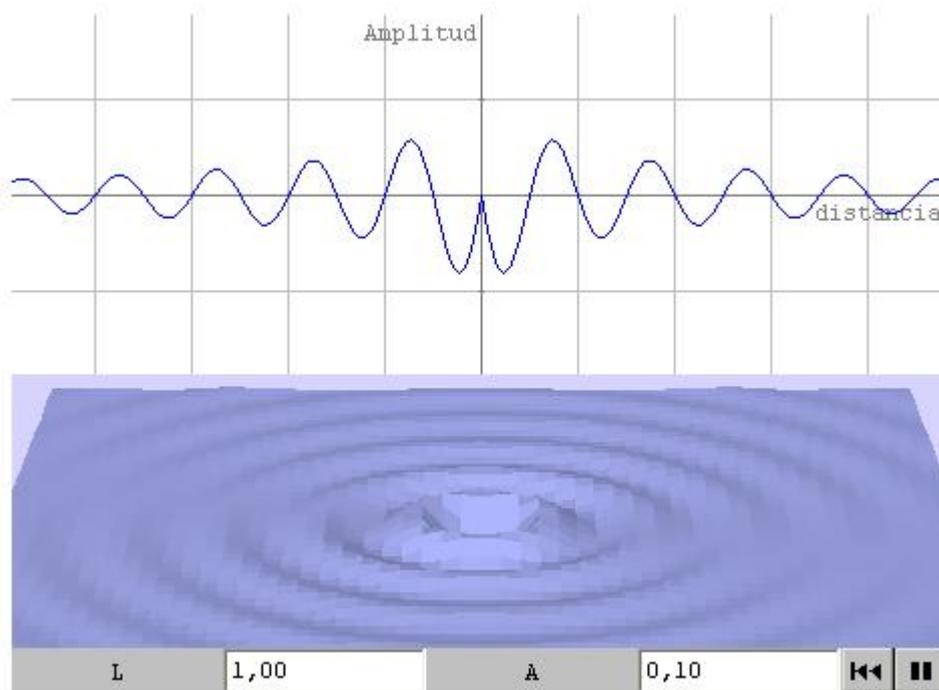
Cuando interfieren ondas de las mismas características, pero que se mueven en sentidos opuestos, se producen las ondas estacionarias. En ellas cada punto afectado tiene una amplitud propia.

Algunos puntos no vibran en absoluto (nodos) mientras que otros vibran siempre con la máxima amplitud de las ondas que interfieren (vientres). La distancia entre dos vientres es de media onda.

En instrumentos musicales, como la guitarra, se producen ondas estacionarias al pulsar las cuerdas. La longitud de onda fundamental viene dada por el doble de la longitud de la cuerda. Por eso acortar la longitud de la cuerda significa aumentar su frecuencia (tono más agudo).

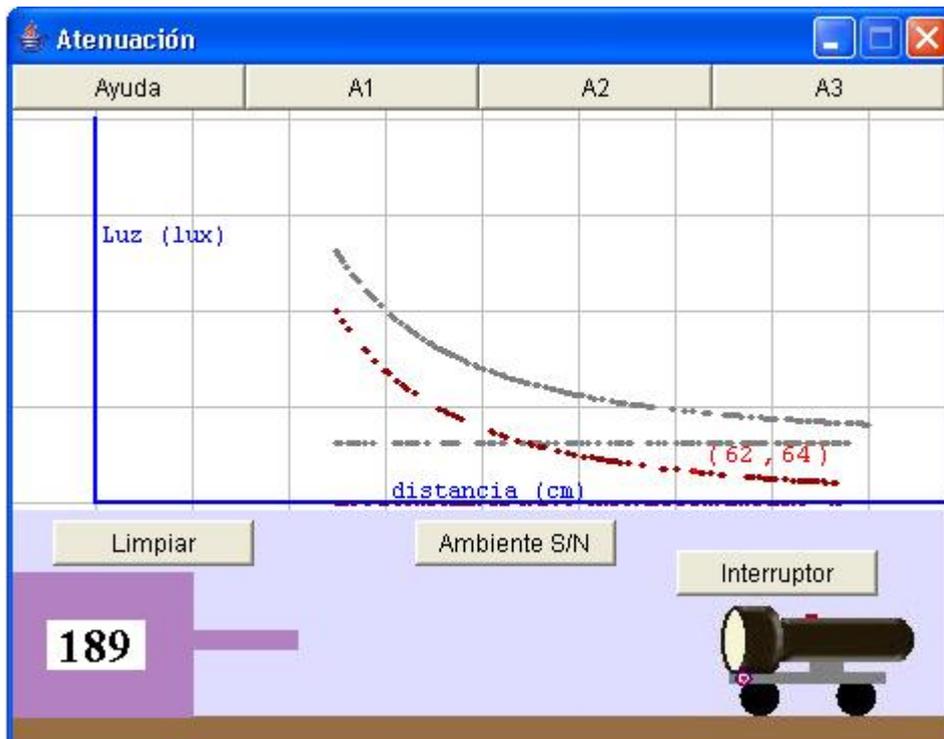
También se producen a la vez gran cantidad de armónicos, ondas cuya única limitación es que en los extremos sujetos de la cuerda existan nodos.

Pérdida de energía por absorción



Ondas de más de una dimensión, como las producidas en un estanque por una piedra, tienen una amplitud que varía de forma inversamente proporcional a su distancia al foco.

Esta disminución se debe al reparto de la energía de la onda por un medio cada vez más amplio, es decir a la disminución de la **intensidad (potencia transmitida por unidad de superficie)**. Si pulsamos **Atenuación** comprobaremos este fenómeno para ondas luminosas, de una forma generalizable a otros fenómenos ondulatorios.



Ayuda: Podemos desplazar una linterna sobre un carrito pinchando y arrastrando el punto rojo situado a su izquierda.

A la izquierda de la mesa hay un fotómetro que mide la iluminación (intensidad de luz que llega al aparato). Su unidad de medida es el lux.

Una gráfica en la parte superior registra los valores de iluminación en función de la distancia.

La luz que registra el fotómetro puede deberse tanto a la linterna como a la luz ambiental.

A1: Probemos a acercar y alejar la linterna sin encenderla.

¿Cómo se comporta la luz registrada por el fotómetro?

¿Podemos suponer homogénea la iluminación ambiental?

A2: Tras devolver la linterna al punto más alejado del fotómetro, pulsemos el botón limpiar para borrar la gráfica anterior.

Encendamos la linterna. ¿Ha aumentado mucho la luz registrada en el fotómetro?

A esta distancia, ¿qué es más importante la luz ambiental o la de la linterna?

Acerquemos la linterna al fotómetro lo más posible. ¿Cómo se compara ahora la iluminación de la linterna y la del ambiente, tal como se registran en el fotómetro?

A3: Sin borrar la gráfica anterior, pulsemos el botón Ambiente S/N y volvamos a mover la linterna de extremo a extremo de su recorrido posible. ¿En qué ha variado la

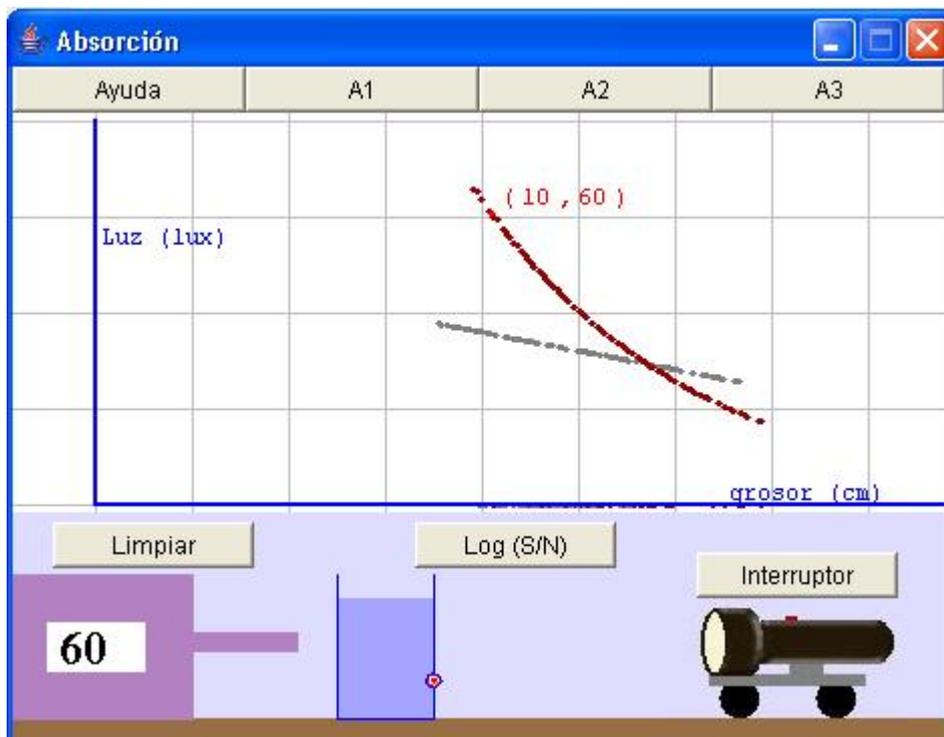
gráfica? Anotemos los valores de la intensidad medida a las distancias de 25, 50 y 75 cm. ¿Qué función matemática podría explicar estos resultados?

Pérdida de energía por absorción



La luz del Sol llega a la Tierra con la atenuación debida a su inmensa distancia. Pese a ello, aún tiene una intensidad cegadora. Sin embargo, a 200 metros bajo la superficie del mar, esta intensidad ha desaparecido casi por completo.

La energía de las ondas luminosas ha sido absorbida por el medio. Idéntico fenómeno de **absorción** se da cuando el sonido, o cualquier otro fenómeno ondulatorio, se propaga a través de cualquier medio. Pulsemos **Absorción** para estudiar la absorción de la luz por el agua.



Ayuda: A la izquierda de la mesa hay un fotómetro que mide la iluminación (intensidad de luz que llega al aparato). Su unidad de medida es el lux.

La luz proviene de una linterna, cuyo haz debe atravesar el líquido de un depósito.

El grosor de líquido atravesado puede alterarse pinchando y arrastrando el punto rojo que hay en el depósito.

En este ejercicio suponemos que no hay luz ambiente, o que ya la hemos restado de los valores registrados.

En la gráfica superior aparece en todo momento el valor de la luz medida y el espesor de líquido atravesado.

El botón Interruptor enciende o apaga la linterna.

El botón Limpiar borra los puntos dibujados en la gráfica.

El botón LogS/N sirve para que en la gráfica veamos el valor de la iluminación o su logaritmo.

A1: Encendamos la linterna y hagamos variar el espesor del líquido.

Se observa una variación del valor medido en el fotómetro.

¿Podemos explicar a qué fenómeno físico se debe esta variación?

A2: Observemos atentamente la gráfica que se obtiene al variar el espesor de líquido.

¿Representa una proporción lineal?

Anotemos los valores que se obtienen para espesores de 10, 20 y 30 cm. ¿Se cumple una ley similar a la que se obtenía cuando lo que variaba era la distancia de la linterna?

Sigamos a la siguiente actividad para estudiar la ley que relaciona luz y espesor.

A3: Borremos la gráfica con el botón limpiar y pulsemos el botón log S/N para sustituir la luz por su logaritmo decimal.

Probemos de nuevo todos los espesores posibles. ¿Qué tipo de gráfica se obtiene?

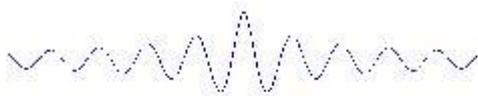
¿Cómo expresaríamos su ley matemática?

La constante de esta ley se llama coeficiente de absorción y mide la proporción de energía absorbida por unidad de espesor.

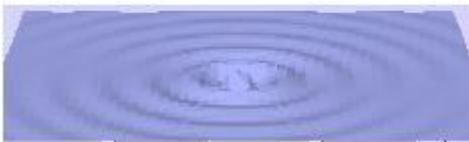
¿Seríamos capaces de expresar esta ley matemática sin el uso de logaritmos?

Atenuación de la intensidad de las ondas

Llamamos **intensidad** de un movimiento ondulatorio a la potencia transmitida por cada metro cuadrado de superficie del medio, perpendicular a la dirección de propagación. Hay dos causas principales de pérdida de intensidad.



La distancia al foco: La intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco de las ondas y la amplitud es inversamente proporcional a esa distancia.



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad \frac{A_1}{A_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

donde I_1 e I_2 son las intensidades a las distancias d_1 y d_2 del origen, mientras que A_1 y A_2 son las amplitudes de las ondas.



La absorción por el medio: La energía de las ondas es absorbida por el medio de acuerdo con la ley:

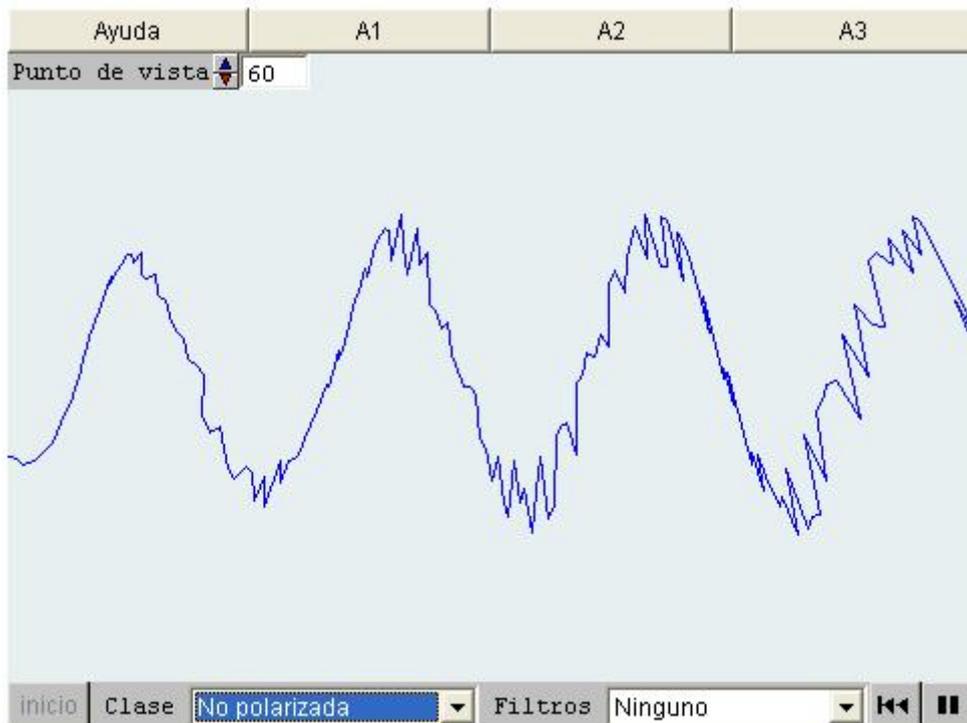
$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot x}$$

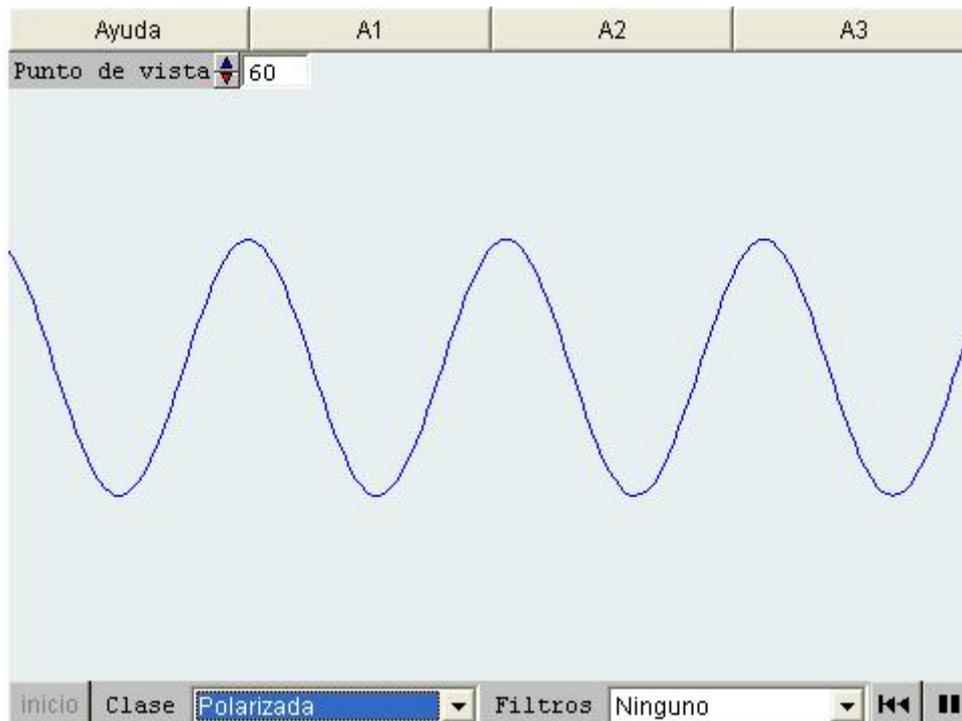
donde I_0 es la intensidad antes de penetrar en el medio, x es la distancia penetrada y K es el coeficiente de absorción, una constante que depende del medio.

Polarización de las ondas transversales

Las ondas transversales vibran en una dirección perpendicular a la propagación. La dirección de esta vibración no tiene por qué ser fija. Si lo fuera diríamos que la onda está totalmente polarizada.

En la escena adjunta podremos estudiar qué pasa si la onda no está polarizada y la acción de los filtros polarizadores. Adviértase que este fenómeno no es posible con ondas longitudinales.





Ayuda: La escena nos muestra una fuente de ondas transversales.

El usuario puede elegir entre onda polarizada o no polarizada.

También puede incorporar uno o dos filtros para el paso de estas ondas.

Otra posibilidad es alterar el punto de vista, haciendo rotar el conjunto con el control correspondiente.

Los botones de casete sirven para frenar, poner en marcha y volver al principio de la simulación.

El botón inicio restaura completamente la situación del principio.

A1: Comencemos dejando en marcha la escena. ¿Qué tipo de onda observamos (transversal o longitudinal)?

En el menú clase optemos por la onda no polarizada. ¿Qué ocurre con la onda tal como la vemos?

Si nos parece que ha perdido su carácter ondulatorio, variemos el punto de vista hasta los 60° . ¿Cómo podemos interpretar lo que ocurre?

Quizás necesitemos realizar la actividad A2 para responder adecuadamente.

A2: Los filtros polarizadores realmente no convierten una onda no polarizada en polarizada.

Para comprender su papel, pensemos primero que una onda no polarizada se puede comprender como una combinación de dos ondas que vibran en planos perpendiculares.

Ahora pulsemos la opción filtro vertical. ¿Qué ocurre?

¿Y si pulsamos la opción filtro horizontal? ¿Se estará conservando la energía que propaga la onda en todo este proceso?

A3: Si pulsamos la opción dos filtros paralelos, vemos que la escena coloca dos filtros verticales?

¿Hay alguna diferencia con el caso de 1 filtro vertical? ¿Por qué ocurre así?

Coloquemos ahora dos filtros cruzados. ¿Cuál es el efecto? ¿Por qué ocurrirá así?

Quizás ahora podamos entender mejor el funcionamiento de las gafas de Sol con cristales polarizadores.

El efecto Doppler



¿A qué se debe el estampido que se produce cuando un avión traspasa la barrera del sonido?

¿Por qué el sonido de la sirena de una ambulancia parece más agudo cuando se acerca que cuando se aleja?

¿A qué se debe el corrimiento al rojo de la luz de las estrellas que se alejan de nosotros?

Estas son manifestaciones del efecto Doppler, causadas cuando un emisor de ondas está en movimiento relativo respecto al observador. Para poder comprenderlas mejor, pulsemos **Doppler**



Ayuda: Observamos un emisor de ondas representado por un punto rojo.

Podemos controlar la velocidad con que se mueve este emisor, usando como unidad la propia velocidad de las ondas.

La escena nos informa de la frecuencia percibida por el observador comparada con la que percibiría si el emisor de ondas permaneciera en reposo, tanto observado desde delante como desde atrás del emisor.

A1: Ponemos en marcha la animación manteniendo el emisor en reposo.

Observemos cómo los frentes de onda son en este caso simétricos.

En cualquier dirección observaremos igual frecuencia en las ondas emitidas.

A2: diferente de 0 al emisor, por ejemplo, 0.2. Anotemos la frecuencia observada delante y detrás del observador.

¿Por qué ahora las frecuencias observadas dependen de la posición del observador y son diferentes detrás o delante del emisor?

Aumentemos la velocidad progresivamente. ¿Cómo varía la frecuencia observada de las ondas?

¿Qué ocurre cuando el emisor alcanza la velocidad de las ondas?

Observemos que en este caso se produce una superposición de las ondas, lo que implica superposición de energía. Esta es la onda de Mach. ¿Qué pasaría en este caso con la frecuencia de las ondas delante del emisor?

A3: Hagamos una tabla de valores de las frecuencias observadas delante y detrás del emisor cuando este se mueve con velocidades: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8

¿A qué tipo de función matemática corresponderían los valores de esta tabla?

Busquemos en nuestro libro de texto la ley matemática del efecto Doppler y veamos si está de acuerdo con el ejemplo de esta escena.

Conclusiones sobre polarización y efecto Doppler



La polarización: Este fenómeno sólo afecta a ondas transversales. Cuando la onda no está polarizada el plano de vibración oscila aleatoriamente. En la onda totalmente polarizada el plano de polarización se mantiene fijo. Hay filtros que permiten el paso sólo de ondas polarizadas; éste es el caso, por ejemplo, de ciertas gafas de sol.

El efecto Doppler: El movimiento relativo de un foco emisor de ondas respecto al observador produce una alteración en la frecuencia medible de las ondas dada por la expresión:



$$f' = \frac{V - V_o}{V - V_e} f$$

donde V es la velocidad propia de las ondas, V_o , es la del observador y V_e es la del emisor, mientras que f es la frecuencia de las ondas medidas en reposo (de observador y emisor) y f' es la medida por el efecto del movimiento relativo.

Evaluación

Tras el estudio de esta Unidad,

- ¿Comprendes la noción general de onda como transmisora de la energía asociada a una vibración y algunas magnitudes comunes a todas las ondas como longitud de onda, amplitud, frecuencia, periodo y velocidad de propagación?
- ¿Clasificas las ondas adecuadamente por la relación entre la dirección de la vibración y la de propagación, así como por su propagación en una o más dimensiones?
- ¿Puedes utilizar la ecuación de ondas para predecir el estado de vibración de un punto alcanzado por las ondas?
- ¿Entiendes las leyes que gobiernan algunas propiedades de las ondas como reflexión, refracción, difracción, interferencia y polarización?

- ¿Entiendes la noción de intensidad y la puedes aplicar al cálculo de intensidades a diversas distancias del foco y con diferentes grados de absorción por el medio?
- ¿Entiendes el efecto que produce el movimiento relativo de foco y del observador sobre las ondas observadas?

Es el momento de que lo compruebes

Evaluación >>>

¿Tenemos claros algunos conceptos de partida?

Establezcamos la correspondencia correcta

Cuando una piedra cae en el agua, por la superficie se propagan.....

La magnitud que nos mide la distancia entre dos puntos de igual fase es.....

Cuando podemos determinar el estado de vibración de cualquier punto del espacio en cualquier momento, se dice que tenemos.....

Cuando hacemos oscilar el extremo de un muelle, a lo largo de él se propagan.....

La magnitud que nos mide el número de ondas que pasa por un punto cada segundo es.....

Cuando las ondas encuentran un obstáculo a su propagación se produce.....

Cuando las ondas encuentran una abertura estrecha o una esquina se produce.....

Cuando las ondas cambian de medio de propagación se produce.....

La amplitud

La ecuación de ondas

La frecuencia

La longitud de onda

La difracción

Ondas bidimensionales

Ondas longitudinales

La refracción

La reflexión

Realicemos algunos ejercicios sencillos

¿Cuál es la respuesta correcta?

1. Desde el extremo de un acantilado vemos pasar crestas de olas, separadas unos 20 metros, a razón de una cada 10 segundos. ¿Cuánto vale la velocidad de propagación de las ondas?

- A. ? 2 m/s
- B. ? 20 m/s
- C. ? 0,2 m/s
- D. ? 200 m/s

2. Una serie de sacudidas de 5 cm de amplitud se propagan por una cuerda a una velocidad de 6 m/s y una frecuencia de 5 Hz . Cuál es el estado de vibración de un punto situado a 10 cm del origen 0,4 s después de comenzar el movimiento

- A. ? -2,5 cm
- B. ? 5 cm
- C. ? 0 cm
- D. ? 2,5 cm
- E. ? -5 cm

3. La luz se propaga a 300.000 km/s en el vacío. ¿Cuál es su velocidad en un líquido de índice de refracción $n=1,5$?

- A. ? 200.000 km/s
- B. ? 450.000 km/s
- C. ? 300.000 km/s
- D. ? 0 (la luz no se propaga en un líquido)

4. Un diapasón tiene una separación entre sus ramas de 6,8 cm. Haciéndolo rotar alrededor de su eje mientras vibra, notamos la menor intensidad de vibración cuando sus ramas están alineadas con el oído del observador. Si el sonido se propaga en el aire a 340 m/s, ¿cuál es la frecuencia fundamental de emisión de ese diapasón?

- A. ? 2500 Hz
- B. ? 340 Hz
- C. ? 680 Hz
- D. ? 3400 Hz

5. Una cuerda de 0,75 m de longitud se mantiene tensa, de forma que, al hacerla vibrar produce un sonido de una frecuencia fundamental de 300 Hz. ¿A qué velocidad se propagan las vibraciones por la cuerda?.

- A. ? 450 m/s
- B. ? 340 m/s
- C. ? 300 m/s
- D. ? 400 m/s

6. La luz del Sol llega a la Tierra a razón de $1,3 \text{ kw/m}^2$ para superficies perpendiculares al flujo luminoso. ¿Cuánta luz llegará a Júpiter, situado a una distancia del Sol unas cinco veces mayor que la Tierra?

- A. ? $0,052 \text{ kw/m}^2$
- B. ? $0,26 \text{ kw/m}^2$
- C. ? $6,5 \text{ kw/m}^2$
- D. ? $1,3 \text{ kw/m}^2$

7. Si interponemos delante de una muestra radiactiva una lámina de plomo de 10 cm de grosor, la radiación gamma detectada se reduce al 1% de la emitida. ¿Cuál es el coeficiente de absorción de ese plomo a la radiación gamma? (viene expresado sin unidades)

- A. ? 46
- B. ? 23
- C. ? 100
- D. ? 123

8. El sonido de la sirena de una ambulancia es un 20% más alto cuando viene a nuestro encuentro que cuando se aleja de nosotros. ¿Con qué velocidad se mueve? (velocidad del sonido: 330 m/s)

- A. ? 30 m/s
- B. ? 33 m/s
- C. ? 330 m/s
- D. ? $16,5 \text{ m/s}$

Un último ejercicio de recuerdo de conceptos

Debemos rellenar los huecos

1.- El fenómeno de la a través de una rendija, que se explica muy bien con el principio de , es más perceptible cuando la es del mismo orden que el grosor de la rendija.

2.- Hay una propiedad característica de las ondas transversales, pero no de las , se trata de la .

3.- La luz de las galaxias distantes parece desplazada hacia el color debido al efecto .

4.- El fenómeno de la no se nota si la velocidad de las ondas es idéntica en ambos medios.

5.- La de las ondas varía de forma proporcional a la distancia, cuando nos alejamos del foco puntual que las produce.