

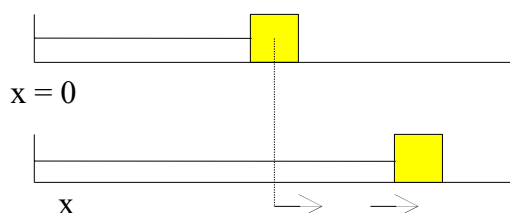
Tema 3: ONDAS

El movimiento vibratorio armónico simple

Un movimiento se dice que es periódico cuando los valores de las magnitudes características posición, velocidad, etc., se repiten cada cierto tiempo.

Una partícula realiza un movimiento vibratorio armónico simple cuando recorre indefinidamente, en un movimiento de vaivén, un segmento debido a una fuerza recuperadora del tipo $F = -Kx$.

Un ejemplo típico es un cuerpo que oscila atado al extremo de un muelle:



Elongación (x): es la distancia que separa al cuerpo, en cada instante, de la posición de equilibrio.

Amplitud (A): valor máximo de la elongación.

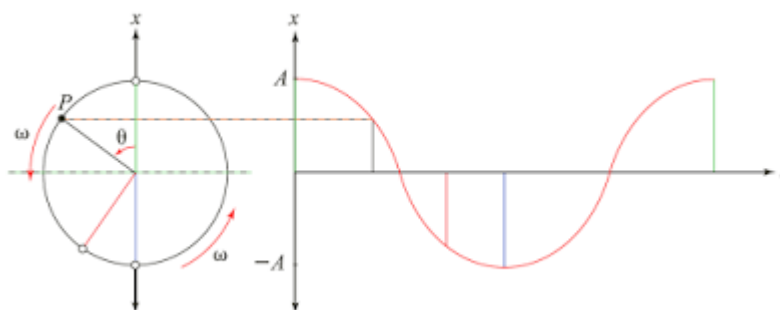
Periodo (T): tiempo en que se realiza una vibración o ciclo completo.

Frecuencia (ν): número de vibraciones por segundo.

Fase ($\omega \cdot t + \phi_0$): Es un ángulo que nos indica en qué estado de oscilación se encuentra el móvil. Se mide en el S.I. en radianes.

Fase inicial ϕ_0 : valor de la fase para $t=0$, cuando comenzamos a estudiar el movimiento. Nos permite calcular cómo era el movimiento al comenzar a estudiarlo.

La ecuación del m.a.s. es una relación entre x y t , es decir, una expresión que nos indica cómo varía la elongación en función del tiempo. Una forma de obtenerla es considerar el m.a.s. como la proyección, sobre un diámetro, de un movimiento circular uniforme.



Ambos movimientos son periódicos, P describe un m.c.u. mientras que A describe un m.a.s.

El ángulo respecto al eje horizontal en un tiempo t es $\phi = \omega \cdot t + \phi_0$ donde ω es la velocidad angular de rotación de P y se le llama también frecuencia angular de m.a.s.

La ecuación del m.a.s. será, por tanto:

$$x = A \cos(\omega t + \phi_0) \quad \text{ó} \quad x = A \sin(\omega t + \phi_0)$$

ϕ_0 es la fase inicial, es decir el ángulo para $t = 0$ del m.c.u. adjunto. Desde el punto de vista del m.a.s. si la fase inicial es distinta de cero significa que se empieza a contar el tiempo cuando el cuerpo no se encuentra en el extremo.

Cambiando la fase inicial es posible expresar el mismo m.a.s. en función seno en vez de coseno.

Se debe recordar que $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$

Derivando la ecuación de movimiento obtenemos las ecuaciones de la velocidad y de la aceleración:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \operatorname{sen}(\omega t + \phi_0) \quad a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi_0)$$

Se puede deducir fácilmente que $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$ y $a = -\omega^2 x$

Ejercicio 1. La ecuación de un m.a.s. es $x = 5 \cos(\pi t + \pi)$ (x en cm, t en s). a) Calcula: periodo, frecuencia, amplitud. b) Representa gráficamente x , v y a en función de t . c) ¿Cuáles son los valores máximos de v y de a ?

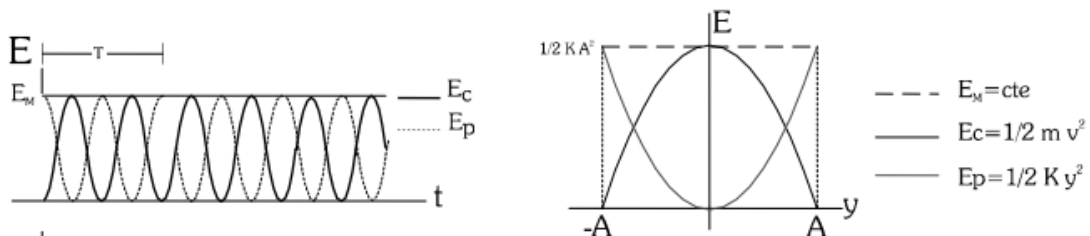
La fuerza que origina un m.a.s. ya hemos dicho que es del tipo $F = -Kx$. Por otra parte, $F = ma = -m\omega^2 x$, de donde se deduce que $K = m\omega^2$ expresión que nos relaciona la frecuencia angular del m.a.s. con la constante recuperadora.

Como $\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow K = m \frac{4\pi^2}{T^2} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$ donde se observa que el periodo depende de la masa que oscila, inversamente de la constante elástica, pero no de la amplitud.

La energía mecánica del cuerpo que realiza el m.a.s. es:

$$Em = Ec + Ep = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Kx^2 = \frac{1}{2}m\omega^2(A^2 - x^2) + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}KA^2$$

Existe una transformación constante entre energía cinética y energía potencial elástica, pero el valor de la energía mecánica permanece constante siempre que se desprecien los rozamientos.



Ejercicio 2. Una masa de 50 g unida a un resorte horizontal de constante restauradora $K = 200\text{N/m}$ se suelta después de haber sido desplazada 2 cm de su posición de equilibrio. a) Determina su periodo y su frecuencia de oscilación. b) Escribe su ecuación de movimiento. c) Calcula su velocidad máxima. d) Calcula su energía cinética cuando $x = +1$ cm. e) Determina la energía potencial que posee cuando han transcurrido 0,5 s.

Ejercicio3. Si la amplitud de un m.a.s. se duplica, calcula cuánto varía: a) su energía mecánica; b) su periodo; c) su velocidad máxima; d) su aceleración máxima.

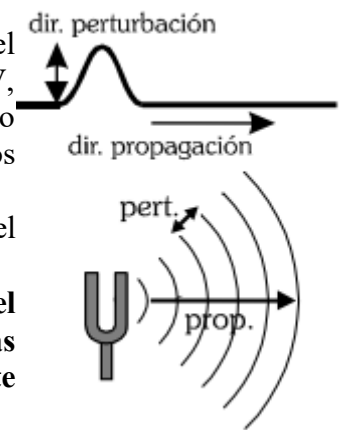
El movimiento ondulatorio

Es un movimiento vibratorio que se produce en un determinado punto, denominado foco, y se propaga a través del espacio que le rodea.

Un gran número de fenómenos diferentes, como la propagación del sonido, la radiación de luz, las olas en el agua, las emisiones de radio y TV, la energía de los terremotos, etc., se pueden estudiar con un mismo aparato matemático y una serie de conceptos aplicables a todos estos fenómenos ondulatorios.

Podemos enumerar una serie de rasgos que diferencian el movimiento ondulatorio del movimiento de una partícula:

- **Todo movimiento ondulatorio consiste en la propagación por el espacio de la energía y de la cantidad de movimiento de las perturbaciones producidas en el foco, sin que haya transporte neto de materia.**
- **Las partículas del medio no viajan con la perturbación.**
- **Los movimientos ondulatorios no están localizados.**



Clasificación de las ondas

a) Según el medio en que se propagan:

- **Mecánicas:** necesitan de un medio material para su propagación (sonido, cuerda, olas, etc.). Su velocidad de propagación depende de las características del medio: densidad, elasticidad, etc.
- **Electromagnéticas:** consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilantes (luz visible, rayos X, ondas de radio y en general todo el espectro electromagnético). Se pueden propagar en el vacío y en otros medios. Su velocidad depende de la constante dieléctrica y de la permitividad magnética del medio.

b) Según la dirección de la perturbación:

- **Transversales:** son aquellas en las que la dirección de la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda (ondas electromagnéticas, ondas en una cuerda, ondas en la superficie de los líquidos, ondas sísmicas s,..).
- **Longitudinales:** coinciden las direcciones de la perturbación y de propagación (sonido, ondas en muelles, ondas sísmicas p,..).

Las ondas longitudinales se pueden propagar en sólidos, líquidos y gases, mientras que las transversales sólo se propagan en sólidos, ya que se necesitan fuerzas de bastante intensidad para que partículas vecinas propaguen la perturbación. En los líquidos los movimientos transversales no experimentan fuerza restauradora, ya que los líquidos fluyen.

En algunas ondas transversales la dirección de la perturbación no es única sino que está contenida en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Si por algún procedimiento somos capaces de forzar las vibraciones en una única dirección, diremos que la onda se ha polarizado. La luz es un ejemplo de onda no polarizada, ya que en general está constituida por vibraciones de muchos átomos. La técnica más común para obtener luz polarizada es utilizar un

material que transmite ondas sólo en una determinada dirección. Se llaman polaroides y se fabrican con láminas delgadas de hidrocarburos de largas cadenas.

c) Según el frente de ondas (puntos del medio con el mismo estado de vibración):

- Circulares
- Planas
- Esféricas

Características de una onda

- **Pulso:** perturbación individual.
- **Tren de ondas:** conjunto de pulsos.
- **Onda periódica:** pulsos que se repiten en intervalos iguales de tiempo.
- **Doble periodicidad de las ondas:**
Espacial: en distintos puntos del medio, distribuidos periódicamente, la perturbación tiene el mismo valor en el mismo instante (si hacemos una fotografía de la onda observamos esta periodicidad).
Temporal: el estado de perturbación de un punto dado del medio se repite periódicamente al pasar el tiempo.
- **Amplitud (A):** máximo valor de la perturbación.
- **Periodo (T):** tiempo en que un punto del medio completa una oscilación.
- **Frecuencia (ν):** número de pulsos por unidad de tiempo (número de oscilaciones por unidad de tiempo). Se mide en hertzios (Hz).

$$\nu = \frac{1}{T}$$

- **Frecuencia angular (ω):** coincide con la velocidad angular del m.c.u. cuya proyección es el m.a.s. del foco. Se le denomina también pulsación y se puede interpretar como el número de periodos en 2π segundos:

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

- **Longitud de onda (λ):** distancia entre dos puntos consecutivos del medio con el mismo estado de vibración.
- **Número de onda (k):** se define como el número de longitudes de onda que hay en una distancia 2π . Es decir:

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

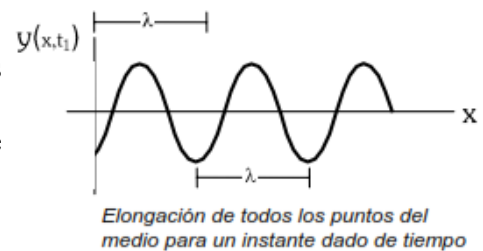
- **Velocidad de propagación (v):** velocidad de cada pulso. Se puede expresar:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu = \frac{\omega}{k}$$

Para una cuerda tensa (de una guitarra, p.ej.) la velocidad depende de la tensión de la misma y de su densidad, según la expresión: $v = \sqrt{\frac{\text{Tensión}}{\text{densidad}}}$

Si la velocidad de propagación no depende de la frecuencia, se dice que el medio es no dispersivo (el aire es un medio no dispersivo para la propagación del sonido ya que todas las notas nos llegan a la vez).

Si el medio propaga con distinta velocidad a las diferentes frecuencias, se le llama dispersivo (dispersión de la luz en un prisma, arco iris, azul del cielo, etc.).

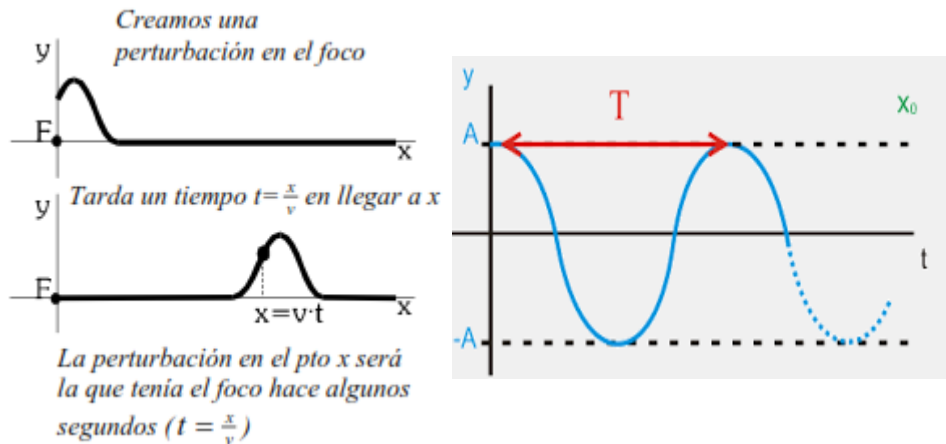


Ondas armónicas

Son aquellas en las que la perturbación que se produce en el foco, y se transmite por el medio, viene expresada en función seno o coseno. En el foco se produce un m.a.s. que se propaga por el espacio.

Para ondas en una dimensión, supongamos que X es el eje que coincide con la dirección de propagación. Si tomamos $x = 0$ para el foco, se puede escribir:

$$y(0,t) = A \cos \omega t$$



Cada pulso tardará un tiempo t' en llegar desde el origen a un determinado punto x , siendo $x = v \cdot t'$; $t' = \frac{x}{v}$, de tal manera que el valor de la perturbación en el punto x en un determinado instante t , será el mismo que existía en el origen un tiempo anterior $t - t'$. Es decir:

$$y(x,t) = y(0, t - t')$$

$$\begin{aligned} y(x,t) &= y(0, t - t') = A \cos \omega(t - t') = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = \\ &= A \cos(\omega t - kx) \end{aligned}$$

La ecuación de una onda armónica se escribe de cualquiera de las maneras anteriores, pero la más usual es:

$$y(x,t) = A \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

Si la onda se desplazara en sentido negativo del eje X, habría que cambiar el signo – por un +.

Se puede utilizar la función seno en lugar de coseno (cambiando la fase inicial).

$$y(x,t) = A \sin(\omega t - kx + \phi_0)$$

$y(x,t)$ en general representa una magnitud física que cambia cuando la perturbación se transmite. Para una onda en una cuerda $y(x,t)$ representa un desplazamiento respecto a la posición de equilibrio, para una onda sonora $y(x,t)$ representa un valor de la presión, para una onda electromagnética $y(x,t)$ puede representar el campo eléctrico o el campo magnético, etc.

$$y = 2 \cos \pi \left(t - \frac{x}{2} \right)$$

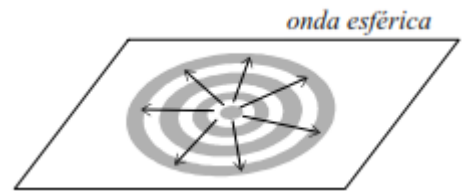
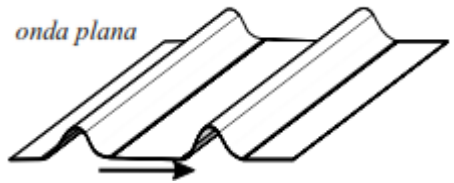
Ejercicio 4. Determinar las características y representar la onda
 a) para $t = 1$ s; b) para $x = 1$ m

Propagación de ondas: Reflexión, refracción, absorción.

Hemos visto que un movimiento ondulatorio consiste en la propagación de una perturbación (que puede ser de naturaleza muy variada) por un medio determinado, material o no.

Básicamente, podemos estudiar el movimiento ondulatorio como una transmisión de energía, que se propaga de una partícula del medio a otra.

Para facilitar el estudio de cómo se propaga esa energía, nos ayudamos de dos representaciones gráficas.

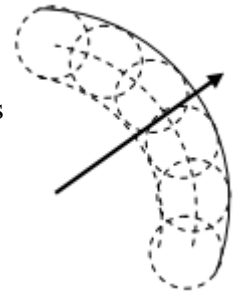


Frente de onda: Es la superficie (o línea) formada por todos los puntos del medio que tienen fase (el mismo valor de la perturbación) en un instante determinado. Por ejemplo:

- En una ola que se propaga por la superficie del agua, todos los puntos que forman la cresta de la ola tienen el mismo valor de perturbación (la misma fase).
- Para una onda luminosa procedente de una bombilla, el frente de onda estaría formado por aquellos puntos que tienen una misma intensidad lumínica. Tendría la forma de una esfera centrada en la bombilla.

Según la forma que tenga el frente de onda, distinguiremos:

- Onda plana: El frente de onda es una superficie plana (o una línea recta, en dos dimensiones).
- Onda esférica: El frente de onda tiene forma esférica (o de circunferencia, en dos dimensiones).



Una forma de obtener el frente de onda se basa en el **Principio de Huygens:**

“Al propagarse una onda por un medio determinado, cada punto del medio se comporta como un foco puntual de nuevas ondas, idénticas a la que se propaga. El frente de onda es la línea envolvente (superposición) de todos los frentes de onda secundarios”.

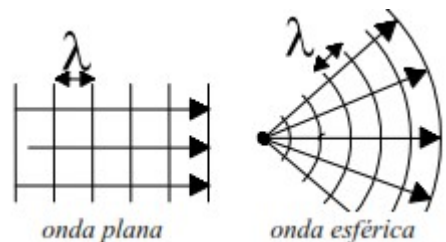
Diagrama de rayos: Los rayos son líneas que, partiendo del foco, nos indican la dirección y sentido en que se propaga la energía transmitida por la onda. Son siempre perpendiculares al frente de onda.

- En una onda plana, los rayos son paralelos entre sí.
- En una onda esférica, los rayos divergen del foco.

onda plana

onda esférica

onda plana onda esférica



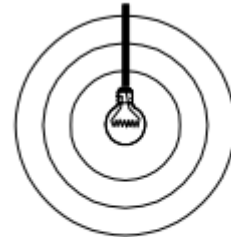
Energía e intensidad de las ondas

Pensemos en una onda (luminosa, sísmica, de sonido...) que se propaga por un medio. El foco emisor (la bombilla para la luz, el hipocentro del terremoto, al altavoz

para el sonido...) proporciona energía a las partículas de su alrededor. Esta energía proporcionada por el foco es la que se va a ir propagando de una partícula a otra, al ir avanzando el frente de onda. Ahora bien, en una onda esférica el frente de onda tiene cada vez mayor superficie, afecta a un número cada vez mayor de partículas.

Considerando el caso ideal de que no se pierda energía por rozamiento entre las partículas del medio, la energía que se está transmitiendo debe mantenerse constante.

Eso significa que esa energía debe repartirse entre un número cada vez mayor de partículas. Como consecuencia, la energía correspondiente a cada partícula del frente de onda es cada vez menor, y la amplitud de su vibración disminuirá. Este fenómeno se conoce como *atenuación* de la onda, y es responsable de algo tan lógico como que el **sonido (o la luz) disminuya su intensidad con la distancia al foco emisor.**



La energía generada por el filamento de la bombilla se reparte entre un nº cada vez mayor de partículas

Las ondas transmiten, a través del medio en que se propagan, la energía generada en el foco. En el caso hipotético de que no existan pérdidas esta energía vendrá dada por $E = \frac{1}{2} K A^2$, donde A es la amplitud de la oscilación y K la constante de elasticidad, característica del medio en que se propaga la perturbación. “Recuerda que la energía de una partícula con un M.A.S. depende de la constante recuperadora de la fuerza ejercida sobre ella, K y de la amplitud del movimiento:

$$E = \frac{1}{2} K A^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

Definimos la potencia (P) de una onda como la energía que transporta por unidad de tiempo: $P = \frac{E}{t}$ Su unidad S.I. es el vatio (W).

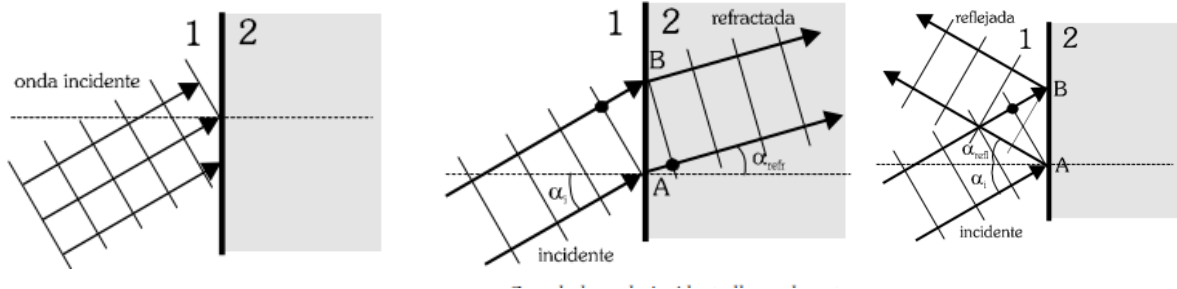
La energía generada en el foco se reparte por todo el frente de onda. Para tener idea de cómo afecta a cada punto del medio, se define la intensidad de la onda (I) como la potencia por unidad de la magnitud que define el frente de ondas. Así:

- En una onda unidimensional el frente de ondas es un punto, por lo que potencia e intensidad coinciden.
- En una onda en dos dimensiones, el frente de ondas es una línea, la intensidad es potencia por unidad de longitud.
- En una onda en el espacio, el frente es una superficie, la intensidad es potencia por unidad de área.

Ejercicio5. A una distancia de 50 m de una antena se recibe una onda con una intensidad de 0,05 W/m². ¿A qué distancia de la antena la intensidad es el doble, si no hay pérdida de potencia?

Compartamiento de una onda en la frontera entre dos medios:

Vamos a estudiar qué es lo que sucede cuando una onda que se propaga por un cierto medio, se encuentra con un medio diferente (por ejemplo, luz o sonido que se propagan por el aire y se encuentran con agua, o con un cristal). Al llegar a la superficie que separa ambos medios, pueden ocurrir tres fenómenos distintos. Puede incluso, y es lo más común, que ocurran los tres simultáneamente.



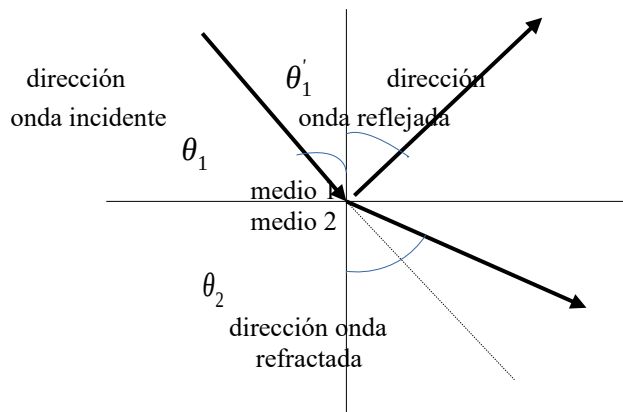
Absorción: Las partículas del nuevo medio, debido a rozamientos internos, absorben parte de la energía que transporta la onda. Se puede dar el caso de que se absorba toda la energía, desapareciendo totalmente la onda.

Reflexión y refracción de ondas

Son fenómenos que ocurren cuando una onda llega a la superficie de separación de dos medios con características diferentes para la propagación de esa onda (por ejemplo, superficie aire-agua para la luz).

La reflexión consiste en que la onda “rebota” en la superficie y continúa su propagación por el mismo medio cambiando, en general, su dirección.

En la refracción la onda atraviesa la interfase y se propaga por el segundo medio cambiando, en general, su dirección.



- La frecuencia de las ondas incidente, reflejada y refractada es la misma ya que viene impuesta por el foco emisor.
- La velocidad de propagación depende de las características físicas del medio, por lo que:

$$v_i = v_{\text{reflej}} \neq v_{\text{refract}}$$

Como $v = \lambda \cdot \nu$ si la frecuencia es la misma pero la velocidad diferente, la longitud de onda será diferente: $\lambda_i = \lambda_{\text{reflej}} \neq \lambda_{\text{refract}}$

- La energía asociada a la onda incidente se reparte entre la reflejada y la refractada. La energía de una onda se relaciona con el cuadrado de su amplitud, por lo que, en general, las amplitudes de las tres ondas serán diferentes.

Leyes:

1. Las direcciones de las ondas incidente, reflejada y refractada se encuentran en un mismo plano que contiene a la normal a la superficie de separación de los medios.
2. Los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales: $\theta_1 = \theta_1'$
3. Los ángulos de incidencia y de refracción están relacionados por la expresión:
 $n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$ donde n es el índice de refracción del medio, que compara la velocidad de propagación de la onda con la que tiene en un medio patrón $n = \frac{c}{v}$.

Difracción

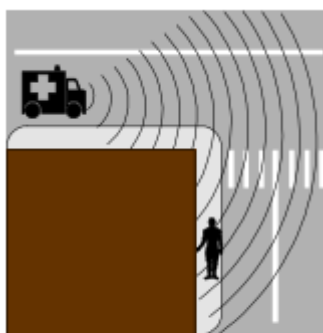
Es el cambio de dirección que experimenta una onda cuando en su propagación se encuentra con obstáculos o aberturas. Su magnitud depende de la relación existente entre la longitud de onda y las dimensiones del obstáculo. El fenómeno no se aprecia si las dimensiones del obstáculo, o de la abertura, son grandes en comparación con la longitud de onda.

El sonido (pueden tener λ del orden de m) se difracta en las esquinas, la luz (con λ del orden del nm) no se difracta en las esquinas, pero sí en una rendija.

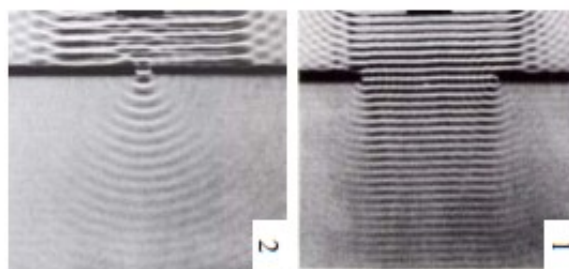
Las ondas de radio AM tienen λ del orden de km por lo que no sufren difracción con edificio, zonas montañosas, etc. y se propagan bien, las FM con λ del orden del m presentan más dificultades en esas zonas.

La difracción puede explicarse a partir del principio de Huygens que dice que los puntos del frente de onda, al llegar al obstáculo, se transforman en emisores de ondas elementales.

La difracción es característica de los movimientos ondulatorios, por lo que se ha utilizado para determinar si un fenómeno es o no de naturaleza ondulatoria. Marca una diferencia entre ondas y partículas.



Oímos la sirena de la ambulancia aunque la esquina se interpone.



Superposición de ondas. Interferencias



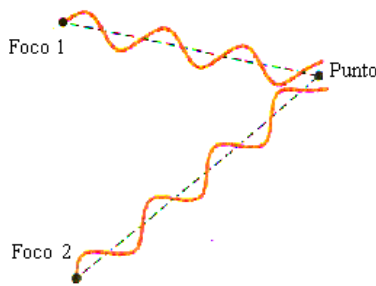
Interferencias producidas en agua por ondas que provienen de focos diferentes.

El principio de superposición establece que cuando por un medio se propagan dos o más ondas, la perturbación resultante, en cada punto y en cada instante, es la suma de las perturbaciones que produciría cada onda por separado.

Con el término interferencia nos referimos a los efectos físicos de la superposición de ondas.

El caso más sencillo lo constituye la interferencia de dos ondas con las mismas características que proceden de dos focos sincronizados, en el sentido de que las ondas mantienen una diferencia de fase constante: son coherentes.

Sean F_1 y F_2 dos focos coherentes, la perturbación en un punto P del medio será:



expresión que se transforma (*realizarlo como ejercicio*) en:

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(\omega t - kx_1) + A \cos(\omega t - kx_2)$$

$$y = A' \cos(\omega - kx) \text{ con } \left\{ \begin{array}{l} A' = 2 A \cos \frac{k(x_2 - x_1)}{2} \\ x = \frac{x_1 + x_2}{2} \end{array} \right.$$

que corresponde a una onda de la misma frecuencia pero de amplitud variable según las distancias de P a cada foco.

- Se producirá **interferencia constructiva** en aquellos puntos del medio en los que la amplitud sea máxima:

$$A = \pm 2 A \Rightarrow \cos \frac{k(x_2 - x_1)}{2} = \pm 1 \Rightarrow \frac{k(x_2 - x_1)}{2} = n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$k(x_2 - x_1) = 2n\pi \Rightarrow x_2 - x_1 = n\lambda$$

Las expresiones anteriores nos indican que se producirá interferencia constructiva en aquellos puntos en los que la diferencia de fase, en cada instante, $k(x_2 - x_1)$ sea un múltiplo entero de 2π , o, lo que es lo mismo, la diferencia de caminos $(x_2 - x_1)$ sea múltiplo entero de la longitud de onda.

- Se producirá **interferencia destructiva** en aquellos puntos donde la amplitud sea nula:

$$A' = 0$$

Ejercicio 6. Demostrar que, para que se produzcan interferencias destructivas, la diferencia de caminos debe ser un múltiplo impar de la semilongitud de onda.

Ondas estacionarias

Se producen cuando en un determinado medio interfieren dos ondas de las mismas características que se propagan en sentido contrario.

Supongamos una onda $y_1 = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - kx)$ que interfiere con otra, de las mismas características que se propaga en sentido contrario, $y_2 = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + kx)$. La perturbación resultante en un punto x es de la forma (*demuéstrese*):

$$y = y_1 + y_2 = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - kx) + A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + kx)$$

$$y = 2A \cdot \cos(kx) \cdot \text{sen}(\omega t) \quad \text{también se llega a esta otra ecuación} \quad y = 2A \cdot \text{sen}(kx) \cdot \cos(\omega t)$$

A partir de esta expresión se puede concluir:

$$y_{(x,t)} = A(x) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad ; \quad \text{amplitud} \quad A(x) = 2A \cdot \cos(kx) \quad ; \quad A(x)_{\text{max}} = 2A$$

- Cada punto del medio realiza un m.a.s. con diferente amplitud: $y = A \cdot \text{sen} \omega t$
- La amplitud es función de la posición x , de modo que unos puntos oscilan con amplitud máxima (vientres) y otros no oscilan (nodos).
- La frecuencia es la misma que la de las ondas incidentes.
- Puesto que hay puntos que no vibran, las ondas estacionarias, a diferencia de las ondas viajeras, no transportan energía y representan sólo un estado oscilatorio del medio. La energía está confinada.

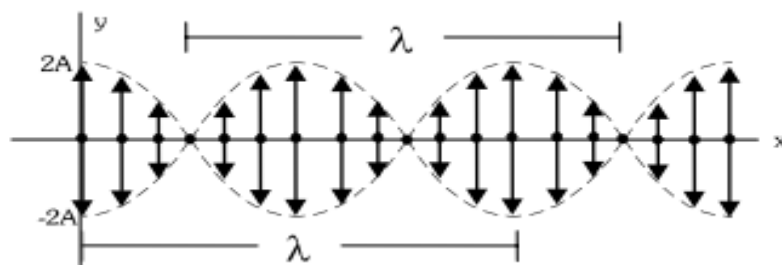
Posición de los vientres: los vientres de una onda estacionaria son los puntos de máxima amplitud, por lo cual su posición dependerá periódicamente del tiempo.

$$\cos(kx) = \pm 1 \rightarrow kx = n\pi \rightarrow x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Posición de los nodos: los nodos de la onda estacionaria son aquellos puntos con amplitud nula y se encuentran a las siguientes distancia del foco.

$$\cos(kx) = 0 \rightarrow kx = (2n+1) \frac{\pi}{2} \rightarrow x = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

La distancia entre nodos o vientres consecutivos siempre es $\frac{\lambda}{2}$



O.E. en cuerdas con extremos fijos: La onda rebotada es la inversa de la onda incidente. Para variar, supongamos que venga dada por una función coseno.

$$y_1 = A \cdot \cos(\omega t - kx) \quad ; \quad y_2 = -A \cdot \cos(\omega t + kx)$$

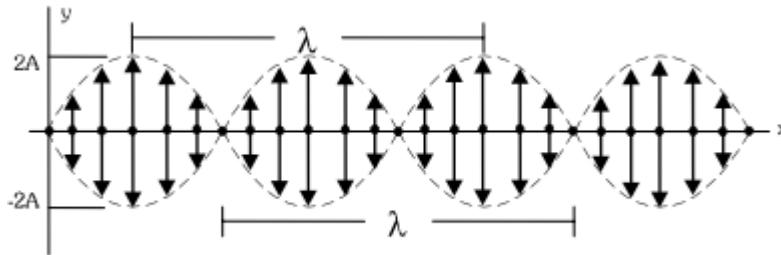
$$y = y_1 + y_2 = A \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(kx) + A \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(kx) - A \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(kx) + A \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(kx)$$

$$y = 2A \cdot \text{sen}(kx) \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$A(x) = 2A \cdot \text{sen}(kx) \quad \text{Expresión similar a la anterior.}$$

$$\text{vientres: } \sin(kx) = \pm 1 \rightarrow x = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad \text{Nodos: } \sin(kx) = 0 \rightarrow x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{Distancia entre nodos: } \frac{\lambda}{2}$$



Ejercicio 7 Representa gráficamente la onda estacionaria $y = 4 \cos \pi x \cdot \cos \frac{\pi}{2} t$ para distintos valores de t (se representa y en función de x)

El sonido

Es una onda que se transmite cuando se hacen vibrar las partículas de un medio elástico de modo que se produzcan variaciones en su densidad o presión.

- Es una onda mecánica ya que necesita de un medio material para su propagación. No se propaga en el vacío.
- Es una onda longitudinal, las partículas del medio vibran en la misma dirección en la que se propaga la perturbación.
- Su velocidad de propagación depende de las características del medio y de las condiciones de presión y temperatura. En el aire, a 15 °C y 1 atm, se propaga a 340 m/s.
- Lleva asociados, como cualquier onda mecánica, los fenómenos de reflexión, refracción, interferencias y difracción.

Se distinguen tres cualidades en el sonido:

- Tono. Es la cualidad que permite distinguir entre sonidos graves (baja frecuencia) y agudos (alta frecuencia). El oído humano percibe frecuencias entre 20 y 20.000 Hz.
- Intensidad. Es la cualidad que permite distinguir entre sonidos débiles y fuertes. Está relacionada con la amplitud de la onda sonora, concretamente con la energía, por unidad de tiempo y de área, que se transmite. El umbral de audición en las personas es del orden de 10^{-12} W/m² y pueden percibir hasta 100 W/m² donde se encuentra el umbral de la sensación de dolor.

No hay una relación lineal entre la intensidad de la onda y la percepción subjetiva del sonido, que se conoce como sonoridad o intensidad sonora. La relación es logarítmica y, por ejemplo, para apreciar que “el volumen” de un sonido es el doble que otro, su intensidad debe ser diez veces mayor.

Se define el nivel de intensidad sonora: $\beta = 10 \cdot \log I/I_0$ donde I es la intensidad de la onda e $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ la intensidad umbral. Se mide en decibelios (dB).

- Timbre. Es la cualidad que permite distinguir sonidos de la misma frecuencia e intensidad que proceden de instrumentos distintos. Está relacionada con los armónicos, frecuencias que acompañan a la frecuencia fundamental.

Entre las aplicaciones tecnológicas del sonido se pueden citar:

- El sonar: instrumento usado en navegación para la localización del fondo marino, bancos de peces, obstáculos, etc. Los ultrasonidos emitidos por el aparato se reflejan en los obstáculos y son captados de nuevo. Midiendo el tiempo entre la emisión y la recepción se determina la distancia al obstáculo (la velocidad de la onda sonora en el agua del mar es de unos 1500 m/s).
- La ecografía: Los ultrasonidos penetran en los tejidos y se propagan a distinta velocidad dependiendo de la densidad de los mismos. El eco recibido se transforma en una señal eléctrica y ésta en una imagen.
- Litroticia: destrucción de cálculos biliares mediante ultrasonidos.
- Telémetro: medida de distancias en cámaras fotográficas para el enfoque.

El efecto Doppler

Se produce cuando existe movimiento relativo entre el foco emisor de ondas y el receptor y consiste en que se produce una diferencia entre las frecuencias emitidas y recibidas. Es un fenómeno que aparece para todo tipo de ondas y que se percibe fácilmente en las ondas sonoras. Por ejemplo, cuando el coche de la policía se acerca, con la sirena activada, se percibe un sonido cada vez más agudo, que se va tornando a grave a medida que se aleja.

Supongamos un observador (O) en reposo y un foco emisor de ondas (F) que se aleja con velocidad v_F . Si emite ondas sonoras de periodo T que se propagan con velocidad v , el periodo percibido por O será: $T' = T + \frac{v_F T}{v} = T \left(1 + \frac{v_F}{v} \right)$ ya que, durante el tiempo T , el foco se aleja una distancia $v_F \cdot T$ y, por tanto, el sonido debe recorrer esa distancia extra, invirtiendo un tiempo $\frac{v_F T}{v}$.

Como la frecuencia es la inversa del periodo, se llega en este caso a: $f' = f \frac{v}{v + v_F}$

Para el caso general, la expresión es: $f' = f \frac{v \pm v_O}{v \mp v_F}$ donde los signos superiores, de numerador y denominador, corresponden a un acercamiento entre foco y observador y los inferiores a un alejamiento.

Ejercicio 8. Una sirena emite una onda sonora de 1000 Hz y se aleja de cierto observador, en reposo, hacia un acantilado a 20 m/s. Determina la frecuencia que percibe el observador del sonido directo y del sonido reflejado en el acantilado. Velocidad del sonido 340 m/s.

Controversia sobre la naturaleza de la luz

Naturaleza corpuscular (Newton):

- La luz está compuesta por diminutas partículas que se propagan en línea recta.
- Explica la reflexión, como choques elásticos de las partículas luminosas con las superficies reflectoras.
- Explica la refracción indicando que la atracción por el medio más denso aumenta la componente normal de la velocidad. Concluye que la luz se propaga a mayor velocidad en el agua que en el aire, algo que no es cierto.
- No explica otros fenómenos como interferencias o difracción.

Naturaleza ondulatoria:

- La luz se propaga mediante ondas mecánicas, análogas al sonido, por un medio muy especial (nunca se encontró) denominado éter.
- Huygens explica, admitiendo naturaleza ondulatoria, la reflexión y la refracción y concluye que la velocidad es menor en el agua que en el aire.
- Young explica las interferencias luminosas como superposición de ondas.
- Fresnel explica la difracción.
- Foucault mide la velocidad de la luz en medios más densos que el aire.
- Maxwell llega a la conclusión de que la luz es una onda electromagnética.

Naturaleza dual:

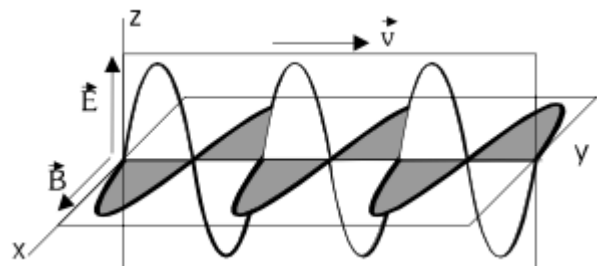
- Para explicar el efecto fotoeléctrico, Einstein supone que la luz está formada por unas partículas muy peculiares (poseen energía, pero no tienen masa en reposo) a las que denomina “fotones”. En cierta manera es una vuelta al modelo corpuscular.
- Es imprescindible, sin embargo, mantener el modelo ondulatorio para explicar las interferencias y la difracción.
- Actualmente hay que admitir que la luz tiene un comportamiento dual. Se sustituye la pregunta: “¿qué es?” por la pregunta: “¿cómo se comporta?”

Ondas electromagnéticas

Fueron predichas teóricamente por Maxwell y descubiertas experimentalmente por Hertz. Están formadas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan por el espacio.

Características de las ondas
electromagnéticas:

- Se trata de ondas armónicas.
- Transversales.
- No necesitan medio material para propagarse.
- Perturbaciones: Campos \vec{E} y \vec{B} variables



$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \text{sen}(\omega t \pm kx) \quad \vec{B} = \vec{B}_0 \cdot \text{sen}(\omega t \pm kx)$$

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$$

- Las o.e.m no están polarizadas, normalmente. Pueden polarizarse tanto lineal como circularmente.
- Velocidad de propagación:

En el vacío $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

En cualquier otro medio $v < c$

Índice de refracción de un medio (n) : se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, c, y la velocidad en el medio considerado:

$$n = \frac{c}{v} \text{ siempre } n \geq 1$$

Algunos n:	
Vacío	1
Aire	~ 1
Agua:	1,33
Etanol:	1,362
Cuarzo:	1,544
Vidrio:	1,5 - 2
Diamante:	2,42

Espectro electromagnético:

El espectro electromagnético es el conjunto de frecuencias cubierto por todas las ondas electromagnéticas:

Las ondas electromagnéticas se clasifican según su frecuencia ν (o su longitud de onda λ). La siguiente tabla están clasificados los diferentes tipos en orden creciente de frecuencia (de creciente λ), hay que tener en cuenta que ν y λ son inversamente proporcionales: $\nu = \frac{c}{\lambda}$

ν (Hz)	Radiación	λ (m)
10^{22}	Rayos γ	10^{-14}
10^{21}		10^{-13}
10^{20}		10^{-12}
10^{19}	Rayos X	10^{-11}
10^{18}		10^{-10}
10^{17}	Rayos UVA, UVB	10^{-9}
10^{16}		10^{-8}
10^{15}		10^{-7}
10^{14}	Luz visible	10^{-6}
10^{13}	Infrarrojo	10^{-5}
10^{12}		10^{-4}
10^{11}	microondas	10^{-3}
10^{10}	Telecomunicaciones, microondas	10^{-2}
10^9		10^{-1}
10^8	Radio FM, Televisión, Telefonía	1
10^7		10^1
10^6	Ondas de radio AM	10^2
10^5		10^3
10^4	Ondas de radio largas	10^4
10^3		10^5
$< 10^3$	Ruido eléctrico	$> 10^5$

ESPECTRO VISIBLE

ν (Hz)	Color	λ (m)
$7,7 - 6,6 \cdot 10^{14}$	Violeta	$3,9 - 4,6 \cdot 10^{-7}$
$6,6 - 6,1 \cdot 10^{14}$	Azul	$4,6 - 4,9 \cdot 10^{-7}$
$6,1 - 5,2 \cdot 10^{14}$	Verde	$4,9 - 5,8 \cdot 10^{-7}$
$5,2 - 5,0 \cdot 10^{14}$	Amarillo	$5,8 - 6,0 \cdot 10^{-7}$
$5,0 - 4,8 \cdot 10^{14}$	Anaranjado	$6,0 - 6,2 \cdot 10^{-7}$
$4,8 - 3,8 \cdot 10^{14}$	Rojo	$6,2 - 7,8 \cdot 10^{-7}$

Fuente: M.Alonso , E.J. Finn. *Física*. Edit. Pearson, 2000

Radioondas. Son ondas electromagnéticas producidas por circuitos eléctricos. Su longitud de onda está comprendida entre 10 km y 10 cm. Se emplean en radiodifusión y telecomunicaciones.

Microondas. Son producidas por vibraciones de moléculas. Su longitud de onda está comprendida entre 10 cm y 10^{-4}

m. Se emplean en radioastronomía, comunicaciones (radar, maser).

Rayos infrarrojos. Son producidas en los cuerpos calientes y son debidas a oscilaciones de átomos. Su longitud de onda oscila entre 10^{-4} m y 7500 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m). Se emplean en la industria y en medicina (termoterapia).

Luz visible. Son producidas por oscilaciones de los electrones más externos del átomo. Su longitud de onda va de 7500 \AA a 4000 \AA . Son percibidas por nuestra retina. Se emplean en la visión, láser, etc.

Rayos ultravioleta. Son producidas por oscilaciones de los electrones más internos. Su longitud de onda está comprendida entre 4000 \AA y 30 \AA . Se emplean en medicina, por su poder ionizante. Son los responsables de las quemaduras por el sol y de la aparición de los cáncer de piel. El Sol es un poderoso emisor de rayos ultravioleta.

Rayos X. Son producidos por oscilaciones de los electrones próximos al núcleo. Su longitud de onda es del orden de 30 \AA - $0,4 \text{ \AA}$. Se utilizan en la industria, en medicina (radiografías y radioterapia). Son peligrosos para los tejidos debido a su poder energético.

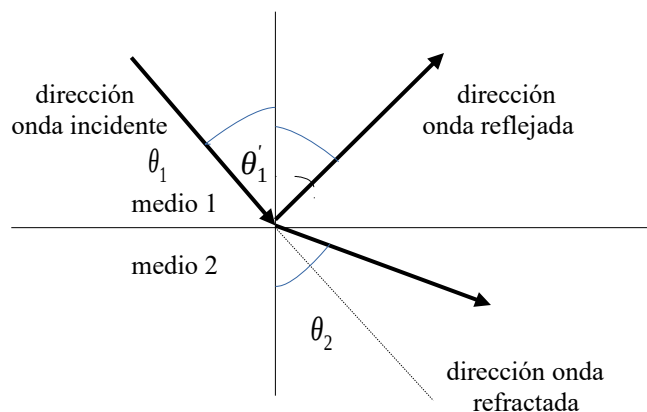
Rayos gamma (γ). Son producidos por oscilaciones nucleares, en los fenómenos radiactivos y en reacciones nucleares. Tienen una longitud de onda del orden de 10^{-5} \AA . Tienen gran poder de penetración, lo que hace que sean nocivos para los seres vivos.

Ejercicio 9. Una onda de radio de 25 MHz se propaga por un medio de índice de refracción 1,5. Si la amplitud es de $2 \cdot 10^{-4}$ V/m y se propaga en el eje X, escribe la ecuación de onda del campo eléctrico.

Reflexión y refracción de la luz

Las leyes que rigen estos fenómenos son:

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado están en el mismo plano que contiene a la normal a la superficie de separación de los dos medios.
2. Los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales: $\theta_1 = \theta'_1$
3. Los ángulos de incidencia y de refracción están relacionados por la expresión: $n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$ (ley de Snell), donde n es el índice de refracción del medio, que compara la velocidad de propagación de la luz en el vacío (c) con la que tiene en ese medio (v) ($n = c/v$).

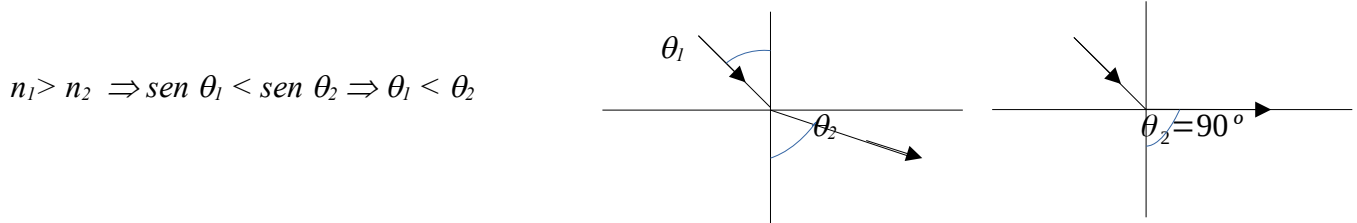


- Reflexión nítida (especular): se produce cuando las irregularidades de la superficie reflectora son pequeñas en relación con la longitud de onda (un haz reflejado emerge en una sola dirección).

- Reflexión difusa: se producen reflexiones en todas las direcciones debido a las irregularidades (nos permite ver los objetos).

- **Reflexión total:**

Si el rayo pasa de un medio de mayor índice a otro de menor, el rayo refractado se aparta de la normal, siendo mayor el ángulo de refracción que el de incidencia:



Se llama *ángulo límite* al ángulo de incidencia para el cual el ángulo refractado es de 90°. No hay en este caso refracción y por eso se habla de reflexión total.

Si $\theta_1 = \theta_L \Rightarrow \theta_2 = 90^\circ \Rightarrow n_1 \text{sen } \theta_L = n_2 \Rightarrow \theta_L = \text{arcsen } n_2/n_1$

Expresión que permite calcular el ángulo límite conociendo los índices de refracción.

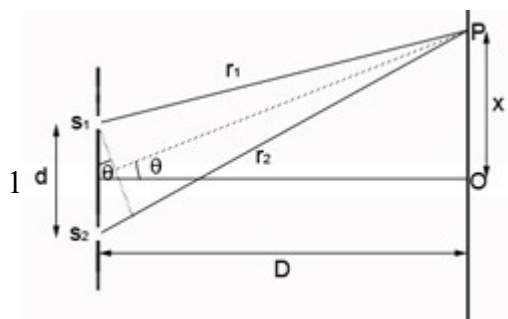
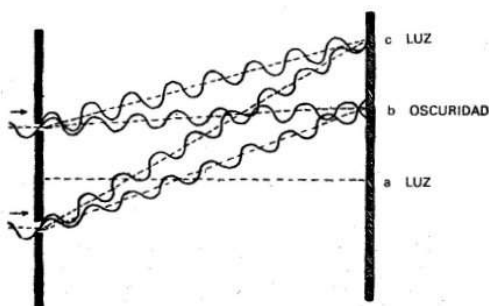
Las condiciones para que se produzca la reflexión total son, por tanto, las siguientes:

1. La luz debe pasar de un medio de índice mayor a otro de índice menor, $n_1 > n_2$. Por ejemplo, del vidrio al aire, del agua al aire, etc.
2. El ángulo de incidencia debe ser mayor o igual que el ángulo límite.

Tiene aplicación en fibra óptica, en fuentes de colores,...

Interferencias luminosas

- La superposición de ondas luminosas puede dar lugar a la aparición de una secuencia alternada de zonas iluminadas y oscuras, fenómeno que se conoce como interferencia luminosa.
- Apoyan el carácter ondulatorio de la luz, ya que es un fenómeno típico de todo tipo de ondas.
- Para que se produzcan interferencias luminosas, las luces deben ser *coherentes*, es decir, tener la misma longitud de onda y mantener una diferencia de fase constante.
- En general luces de focos distintos, procedentes de emisiones aleatorias de los átomos, son incoherentes y no se podrán observar patrones de interferencia.
- T. Young en 1801 obtuvo evidencias de la naturaleza ondulatoria de la luz con su experiencia de la doble rendija, en la que se observa un patrón de franjas de interferencia.



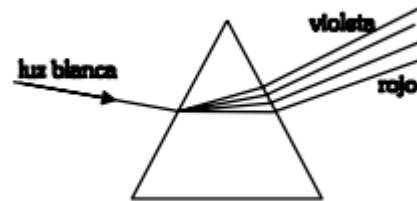
- La diferencia de caminos que recorren los haces (desde las rendijas a la pantalla) condiciona las interferencias constructivas o destructivas

$$d \sin \theta = n \lambda \quad (\text{constructivas}) \qquad d \sin \theta = (2n+1) \frac{\lambda}{2} \quad (\text{destructivas})$$

Dispersión

- Fenómeno que se produce en aquellos medios en los que el índice de refracción depende de la longitud de onda transmitida. Las luces con distinta longitud de onda (frecuencia) se propaga con distinta velocidad.
- El prisma es un medio dispersivo. Si v depende de la frecuencia, n depende de la frecuencia, por lo que el ángulo de refracción es distinto (ley de refracción) para las diferentes frecuencias: los colores se separan.
- El azul del cielo y el arco iris son otros ejemplos de dispersión de la luz.
- Para cualquiera de las sustancias que se utilizan normalmente en óptica (vidrio al boro, cuarzo, vidrio silíceo,..) el índice de refracción aumenta al disminuir la longitud de onda.

Descomposición de la luz en un prisma:



¿Por qué el Sol se ve rojizo al amanecer y al atardecer? Al amanecer y al atardecer la cantidad de atmósfera que deben atravesar los rayos de luz es mayor. Se produce entonces mayor dispersión. Se dispersan todos los colores menos el rojo, que es el que vemos.



El color

En Física, cuando se emplea la palabra color, se hace únicamente de forma vaga o someramente descriptiva, pues físicamente lo que distingue una sensación de color de otra es la longitud de onda de la radiación luminosa que impresiona nuestro sentido de la vista, y si, como generalmente sucede, la radiación es compuesta, el ojo no puede analizar las distintas radiaciones o longitudes de onda que recibe y aprecia tan sólo el tinte o “color” resultante.

Es interesante diferenciar el color por emisión, por reflexión o por transparencia. El color de la luz emitida por un cuerpo en la oscuridad depende de la longitud de onda de la radiación que, a su vez, es función de la temperatura. Un objeto que está a una temperatura inferior a 500 °C, nos da una radiación infrarroja, a partir de dicha temperatura, la radiación impregna nuestra retina. Por ejemplo, la superficie exterior del Sol está a unos 6000 K, temperatura a la cuál un cuerpo emite radiación que denominamos amarilla.

Decimos que un objeto tiene un color cuando, con preferencia, refleja o transmite las radiaciones correspondientes a tal color. Por ejemplo, un cuerpo es rojo por reflexión o transparencia cuando absorbe en casi su totalidad, todas las radiaciones menos las rojas, las cuales refleja o se deja atravesar por ellas.

El color de los cuerpos no es una propiedad intrínseca de ellos, sino que va ligado a la naturaleza de la luz que reciben. Si una superficie refleja toda la luz que cae sobre ella, el color de la superficie será blanco cuando lo ilumine la luz blanca, rojo cuando lo ilumine la luz roja y así sucesivamente. Una superficie que refleja únicamente la luz verde, por ejemplo, se verá verde únicamente cuando la luz que está iluminándola contiene el color verde; si no es así, se verá negra. Una superficie que absorbe toda la luz que le llega, se verá de color negro.

PROBLEMAS ONDAS

1. El movimiento de un oscilador armónico se ajusta a la siguiente ecuación:

$$x = 3 \cos\left(3\pi t + \frac{\pi}{3}\right) \quad \text{S.I.}$$

a) ¿Cuánto valen la amplitud, la frecuencia angular, la fase inicial, el periodo y la frecuencia de oscilación?

b) Calcula su elongación, velocidad y aceleración en $t = 3$ s. $a = 133 \text{ m/s}^2$

2. Una partícula describe un m.a.s. de ecuación:

$$x = 0,2 \text{ sen}\pi(6t+1) \quad \text{S.I.}$$

Calcula: a) características del movimiento; b) instantes en los que la partícula pasa por el origen, c) velocidad inicial y velocidad máxima.

$$b) t = (n-1)/6 \quad ; \quad c) -1,2\pi; 1,2\pi \text{ m/s}$$

3. Un m.a.s. tiene de ecuación $x = 2,4 \cos(5\pi t/4 + \pi/6)$ donde t está en segundos y x en metros. Encuentra: a) periodo y frecuencia; b) posición y velocidad en el instante inicial; c) la velocidad y la aceleración para $t = 1,0$ s.

$$1,6 \text{ s}, 0,62 \text{ Hz}; 2,1 \text{ m}, -4,7 \text{ m/s}; 9,1 \text{ m/s}, 9,6 \text{ m/s}^2$$

4. Una partícula oscila en el eje X con movimiento armónico simple. Empezamos a contar el tiempo cuando se encuentra en la posición de equilibrio y oscilando hacia la derecha. Si su amplitud es 4 cm y su frecuencia 1/3 Hz, determina: a) ecuación de movimiento en función seno y en función coseno; b) velocidad y aceleración en $t = 5$ s; c) velocidad cuando pasa por $x = -1$ cm; d) espacio recorrido en el primer segundo.

$$a) x = 4 \text{ sen}2\pi t/3 = 4 \cos(2\pi t/3 - \pi/2); b) -4,18 \text{ cm/s}, 15,18 \text{ cm/s}^2; c) -8,11 \text{ cm/s}; d) 4,54 \text{ cm}$$

5. Una partícula que realiza oscilaciones armónicas con una frecuencia de 10 Hz, pasa la posición de equilibrio a la velocidad de 6,28 m/s. Determinar: a) la elongación y la aceleración máximas; b) la ecuación del movimiento si la fase inicial es nula.

$$0,10 \text{ m}, 394 \text{ m/s}^2; x = 0,10 \text{ sen } 62,8 t$$

6. Una masa puntual de 10 g está sujeta a un muelle que vibra con una frecuencia de 3 Hz. En el instante inicial pasa por el centro de la vibración con una velocidad de 5 cm/s en sentido negativo. Determina: a) el tiempo que debe transcurrir hasta que alcance la velocidad cero; b) la ecuación del movimiento; c) la expresión de la energía cinética en función del tiempo; d) la aceleración en el instante en que, por primera vez, se anula la velocidad.

$$a) 1/12 \text{ s}; d) 94,2 \text{ cm/s}^2$$

7. Una masa de 500 g unida a un resorte oscila armónicamente con una frecuencia de 0,4 Hz. Si la energía mecánica del oscilador es de 3 J: a) calcula la constante elástica del resorte; b) determina la amplitud de oscilación; c) representa en una misma gráfica las variaciones de la E_c y de la E_p del oscilador en función de t . $3,15 \text{ N/m}; 1,38 \text{ m}$

8. Si la amplitud de un m.a.s. es A:

- a) ¿En qué punto son iguales la E_c y la E_p ?
b) ¿En qué punto la E_c es el doble que la E_p ?

$$0,70 A; 0,57A$$

9. La ecuación de una onda es: $y=10 \operatorname{sen}(2\pi t - 10\pi z)$ unidades del sistema internacional.

- Calcular: a) frecuencia, periodo, frecuencia angular, longitud de onda, vector de onda, velocidad de fase; b) aceleración máxima de las partículas del medio.

$$a) \dots 0,2 \text{ m/s}; b) 40 \pi^2 \text{ m/s}^2$$

10. Una onda mecánica tiene de ecuación:

$$y(x,t) = 4 \operatorname{sen} 2\pi (10t - x/20) \text{ (S.I.)}$$

Hallar: a) características de la onda; b) velocidad y aceleración máximas de un punto del medio alcanzado por la vibración.

$$b) 80 \pi \text{ m/s}; 1600 \pi^2 \text{ m/s}^2$$

11. La ecuación del movimiento de un impulso propagándose a lo largo de una cuerda viene dado por $y = 10 \cos(2x - 4t)$ cm, donde x está expresada en m y t en s. Calcula: a) la rapidez de propagación del impulso; b) el instante en que la velocidad de un punto de la cuerda situado a 1 m del origen es nula.

12. Una onda armónica que se propaga por una cuerda viene dada por:

$$y=25 \cos \pi(2x-5t) \quad (x, y \text{ en cm}; t \text{ en s})$$

a) Determina la longitud de onda y el periodo; b) calcula la velocidad y la aceleración, en el instante inicial, de un punto $x = 5,3$ cm.

$$1 \text{ cm}, 0,4 \text{ s}; 373 \text{ cm/s}, 1904 \text{ cm/s}^2$$

13. Se representa una onda mediante la ecuación:

$$y(x,t) = 2 \cdot \cos 2 \cdot \left(\frac{t}{4} + \frac{x}{160} + \pi \right)$$

Determina las características de la onda y la diferencia de fase, en un instante dado, entre dos puntos separados 120 cm.

$$1,5 \text{ rad}$$

14. Un m.a.s. $y = 4 \operatorname{sen} 2\pi t$ (S.I.) se propaga de derecha a izquierda en un medio elástico con velocidad de 12 m/s. Calcular la elongación de un punto, que se encuentra a 6 m del foco, en el instante $t = \frac{3}{4}$ s.

$$4 \text{ m}$$

15. El periodo de un movimiento ondulatorio que se propaga a lo largo del eje OX es 0,003 s y la distancia entre los dos puntos más próximos cuya diferencia de fase es $\pi/2$ es 30 cm. Calcular longitud de onda y velocidad de propagación.

$$120 \text{ cm}; 400 \text{ m/s}$$

16. Una onda longitudinal se propaga a lo largo de un resorte en el sentido negativo del eje OX y la distancia entre los dos puntos más próximos en fase es 20 cm. El foco emisor, fijo a un extremo del resorte, vibra con una amplitud de 3 cm y una frecuencia de 25 Hz. Determinar: a) velocidad de propagación; b) expresión de la onda sabiendo que la perturbación, en el instante inicial, en el origen es nula.

$$b) y = 3\text{sen}(50\pi t + \pi/10 x)$$

17. Se estudia la interferencia entre dos ondas de ecuaciones:

$$y_1 = 6\text{sen}(1500t - 250x) \quad y_2 = 6\text{sen}(1500t + 250x)$$

Obtener: a) ecuación de la onda estacionaria resultante; b) distancia entre dos vientres consecutivos.

$$b) \pi/250$$

19. La ecuación de una onda estacionaria en una cuerda fija por sus extremos es;

$$y = 0,3 \text{sen} 0,2x \cos 500t$$

donde x , y se miden en cm y t en s. Determina: a) longitud de onda, frecuencia, amplitud y velocidad de las ondas componentes; b) distancia entre dos nodos consecutivos; c) longitud de la cuerda, si se sabe que está vibrando en su cuarto armónico.

$$c) 62,8 \text{ cm}$$

20. Una onda estacionaria se establece en una cuerda de 2 m fija por sus extremos. Cuando la frecuencia es 200 Hz, la cuerda presenta cuatro vientres. a) ¿Cuál es la longitud de onda? b) ¿En qué armónico vibra la cuerda? c) ¿Cuál es la frecuencia fundamental?

$$1 \text{ m}; 4^\circ; 50 \text{ Hz}$$

23. Si un rayo luminoso pasa del agua ($n = 1,33$) al metacrilato ($n = 1,60$) con un ángulo de incidencia de 30° , ¿con qué ángulo se refracta? ¿Cuál será el ángulo límite para los rayos que van del agua al metacrilato? ¿Y para los que van del metacrilato al agua?

24. Calcule el índice de refracción de un vidrio sabiendo que cuando se encuentra sumergido en agua, toda la luz que incide sobre la superficie vidrio-agua, con un ángulo de incidencia mayor a 60° , es reflejada. El índice de refracción del agua es 1,33.

$$1,54$$

25. Un rayo de luz amarilla tiene una longitud de onda en el vacío de $580 \cdot 10^{-9}$ m. a) Determine la velocidad de propagación y la longitud de onda de dicha luz en el interior de una fibra de cuarzo, cuyo índice de refracción es $n = 1,5$. b) ¿Pueden existir valores del ángulo de incidencia para los que el haz de luz, que se propaga en el interior de una fibra de cuarzo, no salga al exterior? Explique el fenómeno y, en su caso, calcule los valores del ángulo de incidencia para los cuales tiene lugar. $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

26. Un buceador enciende una linterna debajo del agua (*índice de refracción: 1,33*) y dirige el haz luminoso hacia arriba formando un ángulo de 40° con la vertical.

a) ¿Con qué ángulo emergerá la luz del agua?

b) ¿Cuál es el ángulo de incidencia a partir del cual la luz no saldrá del agua?

28. Sobre una lámina transparente de índice de refracción 1,5 y 1 cm de espesor, situada en el vacío, incide un rayo luminoso formando un ángulo de 30° con la normal a la cara. Calcule: a) el ángulo que forma con la normal el rayo que emerge de la lámina; b) la distancia recorrida por el rayo dentro de la lámina.

$$30^\circ, 1,06 \text{ cm}$$

29. Un rayo de luz roja que se propaga por el aire incide sobre un vidrio con un ángulo de incidencia de 30° . Si el índice de refracción del vidrio para la luz roja es 1,5, determine el ángulo que forman entre sí los rayos reflejado y refractado.

$$130,5^\circ$$

CUESTIONES SOBRE ONDAS

1. Considere la siguiente ecuación de una onda: $y = A \sin(bt - cx)$ a) ¿Qué representan los coeficientes A, b y c. ¿Cuáles son sus unidades? b) ¿Qué interpretación tendría que la función fuese coseno en lugar de seno? ¿Y que el signo fuese – en lugar de +?
2. ¿Qué es la reflexión especular? ¿Y la reflexión difusa? Si la nieve refleja la luz que incide sobre ella, ¿por qué no nos vemos reflejados en ella?
3. ¿Qué características de las ondas varían al cambiar de medio de propagación?
4. ¿En qué consiste la reflexión total? ¿A qué se llama ángulo límite? ¿Cuáles son las condiciones para que se produzca?
5. Una superficie de discontinuidad plana separa dos medios de índices de refracción n_1 y n_2 . Si un rayo incide desde el medio de índice n_1 , razona si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:
 - a) Si $n_1 > n_2$ el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia.
 - b) Si $n_1 < n_2$ a partir de un cierto ángulo de incidencia se produce el fenómeno de reflexión total.
6. ¿Qué es una onda polarizada? ¿Se puede polarizar el sonido?
7. ¿Qué requisitos se deben cumplir para que se produzcan interferencias luminosas? ¿Por qué son difíciles de observar?
8. ¿Cuáles son las características de las ondas estacionarias?
9. a) Describa brevemente el modelo corpuscular de la luz. ¿Puede explicar dicho modelo los fenómenos de la interferencia luminosa? b) Dos rayos de luz inciden sobre un punto, ¿pueden producir oscuridad? Explique razonadamente este hecho.
10. ¿En qué consiste la dispersión? ¿Por qué vemos el cielo azul? ¿Por qué lo vemos rojizo hacia el oeste al atardecer?
11. ¿Pueden tener la misma longitud de onda dos colores distintos del espectro visible?
12. ¿Es posible que un haz de luz que viaja por el aire penetre en el agua y no se desvíe?
13. ¿En qué consisten los espejismos?
14. ¿A qué distancia mínima debemos estar de una superficie reflectora del sonido para escuchar nuestro propio eco? Distinguimos sonidos en intervalos de 0,1 s.
15. ¿Se produce el efecto Doppler en la luz? ¿Es cierto que hay un desplazamiento hacia el rojo en la luz procedente de galaxias que se alejan?
16. ¿Cuál es el fundamento de la fibra óptica? ¿En qué se emplea?