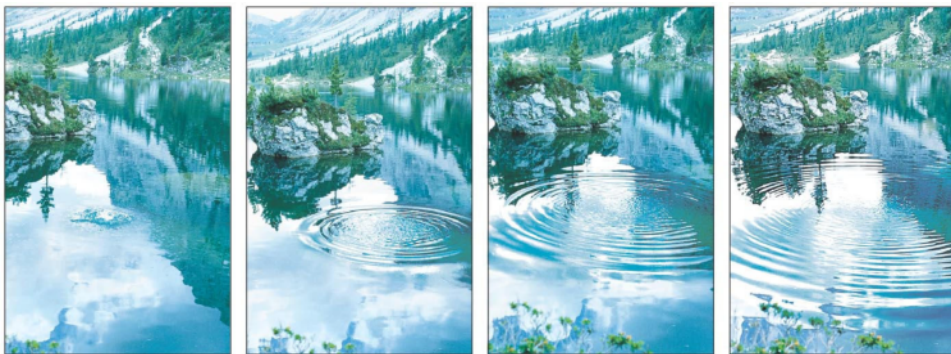




Capítulo 15

Movimiento Ondulatorio



Las ondas, como estas olas, se dispersan hacia fuera a partir de una fuente. En este caso, la fuente es un pequeño sitio del agua que oscila de arriba a abajo, brevemente, en donde se lanzó una piedra (fotografía izquierda). Otros tipos de ondas incluyen ondas en una soga o una cuerda, las cuales también se producen mediante vibración. En general, las ondas se alejan de su fuente, aunque también son de interés aquellas que, al parecer, permanecen quietas ("ondas estacionarias"). Las ondas se reflejan y pueden interferir entre sí cuando pasan por algún punto al mismo tiempo.

Unidades del Capítulo 15

- Características del Movimiento Ondulatorio
- Tipos de Ondas: Transversales y Longitudinales
- Energía Transportada por las Ondas
- Representación Matemática de una Onda Viajera
- La Ecuación de Onda
- El Principio de Superposición
- Reflexión y Transmisión

Unidades del Capítulo 15

- . Interferencia
- . Ondas Estacionarias; Resonancia
- . Refracción
- . Difracción

15-1 Características del Movimiento Ondulatorio

Las olas, así como las ondas en una cuerda, son dos ejemplos comunes de ondas mecánicas, que se propagan como oscilaciones de materia.

También hay otros tipos de ondas como las ondas de sonido, las ondas electromagnéticas y la luz.

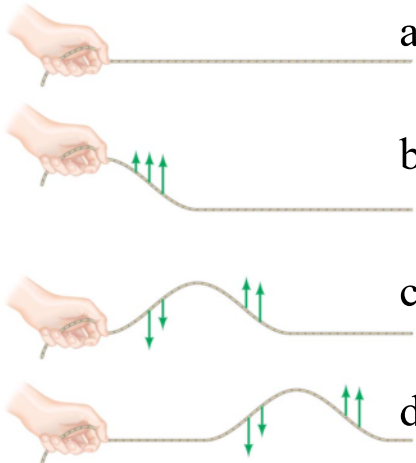
Las olas oceánicas no llevan agua, se mueven con una velocidad reconocible. Cada partícula (o molécula) del agua en sí misma simplemente oscila en torno a un punto de equilibrio.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-1 Características del Movimiento Ondulatorio

Todos los tipos de ondas viajeras transportan energía.



- a) El estudio de un pulso de onda individual muestra que se comienza con una vibración y es transmitida a través de las fuerzas internas en el medio.
- b)
- c)
- d)

Las ondas continuas comienzan también con vibraciones. Si la vibración es un MAS, entonces la onda será sinusoidal.

FIGURA 15.2 Movimiento de un pulso de onda hacia la derecha. Las flechas indican la velocidad de las partículas de la cuerda.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-1 Características del Movimiento Ondulatorio

Características de una onda:

- Amplitud, A
- Longitud de onda, λ
- Frecuencia, f y período, T
- Velocidad de la onda, $v = \lambda f$

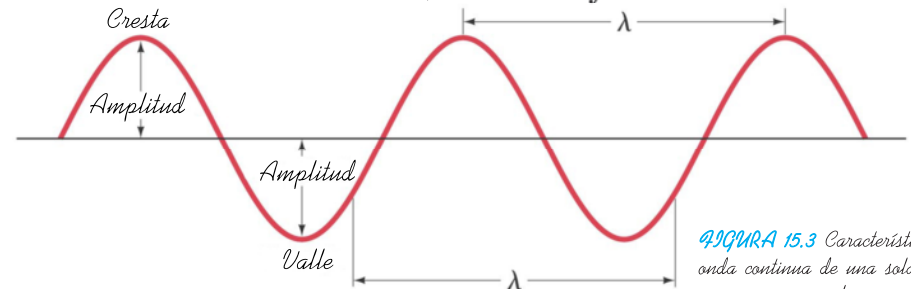


FIGURA 15.3 Características de una onda continua de una sola frecuencia que se mueve en el espacio.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

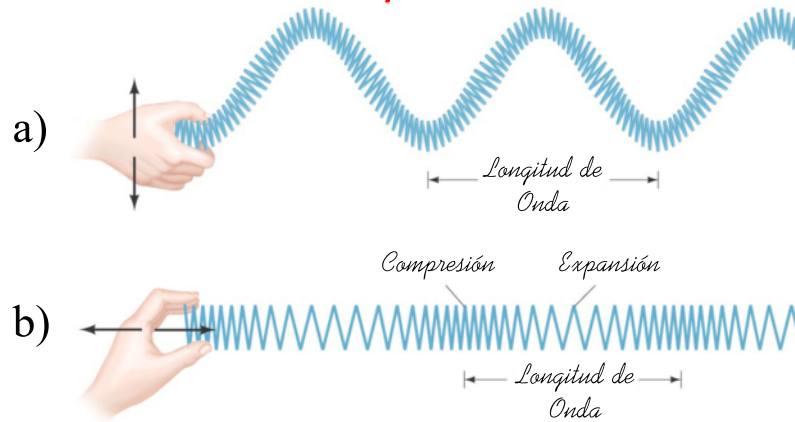


FIGURA 15.4 a) Onda transversal; b) onda longitudinal.

El movimiento de las partículas en una onda puede ser, ó bien perpendicular a la dirección de la onda (transversal) ó paralela a ella (longitudinal).

15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

Una onda longitudinal puede representarse trazando una gráfica de la densidad de las moléculas de aire versus la posición en un instante dado.

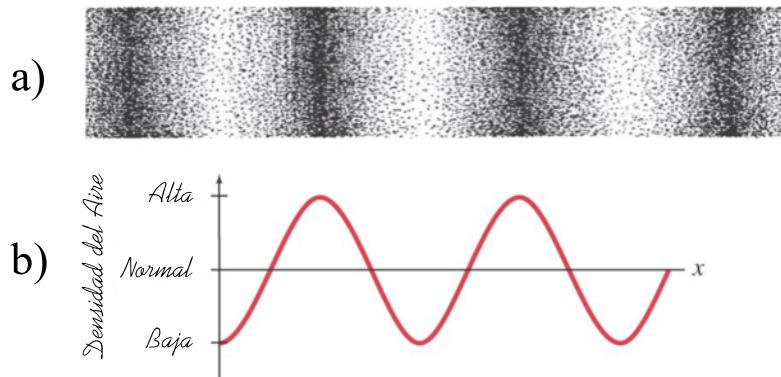


FIGURA 15.6 a) Una onda longitudinal con b) su representación gráfica en un instante particular.

15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

Las ondas de Sonido son ondas longitudinales:

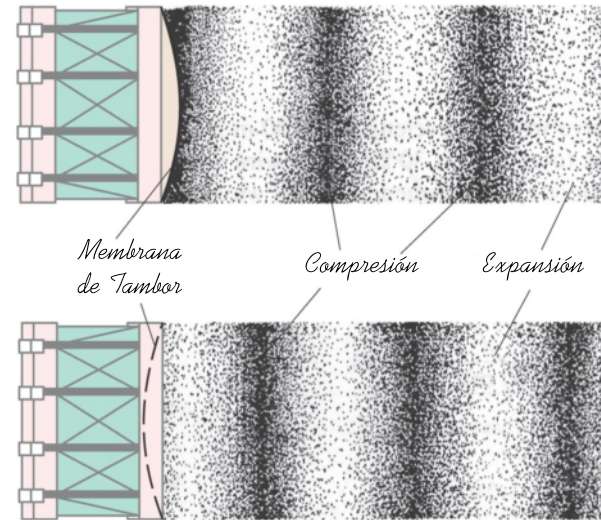


FIGURA 15.5 Producción de una onda sonora, que es longitudinal, que se muestra en dos momentos en el tiempo separados aproximadamente medio periodo ($\frac{1}{2}T$).

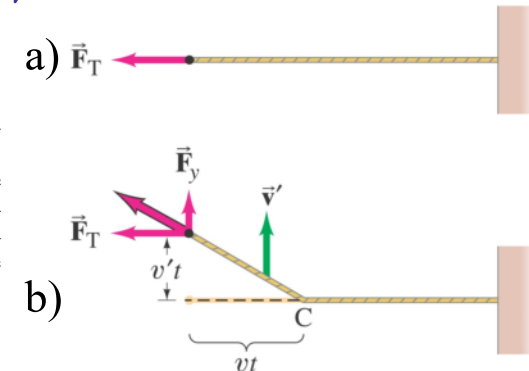
15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

La velocidad de una onda transversal sobre una cuerda está dada por:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

Como es de esperarse, la velocidad se incrementa cuando la tensión se incrementa y decrece cuando la masa se aumenta.

FIGURA 15.7 Diagrama de pulso de onda simple en una cuerda para la deducción de la ecuación arriba. El vector que se muestra en b) como el resultante de $\vec{F}_T + \vec{F}_y$ tiene que dirigirse a lo largo de la cuerda porque esta última es flexible. (El diagrama no está a escala: suponemos que $v' \ll v$; el ángulo ascendente de la cuerda está exagerado para dar mayor claridad).



15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

La velocidad de una onda longitudinal se debe a la fuerza de restauración elástica del medio y de la densidad de masa.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ó

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

donde E es el módulo elástico o módulo de Young, B es el módulo volumétrico y ρ su densidad.

15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

Un pulso de onda que viaja en un fluido dentro de un tubo largo hace que el movimiento de la onda sea unidimensional. El tubo está ajustado con un pistón en un extremo y está lleno con un fluido con densidad y presión uniformes.

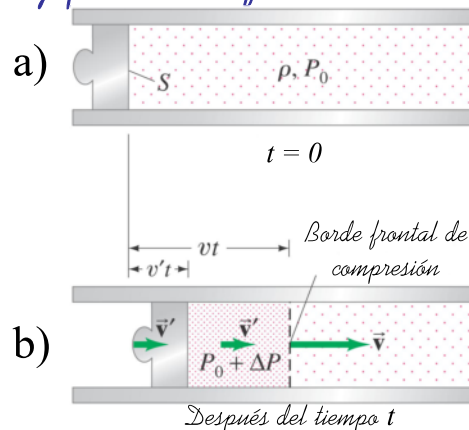


FIGURA 15.8 Determinación de la rapidez de una onda longitudinal unidimensional en un fluido contenido en un tubo largo y estrecho.

TABLA 12-1 Módulo elástico

Material	Módulo de Young, E (N/m ²)	Módulo de corte, G (N/m ²)	Módulo volumétrico, B (N/m ²)
Sólidos			
Hierro colado	100×10^9	40×10^9	90×10^9
Acero	200×10^9	80×10^9	140×10^9
Bronce	100×10^9	35×10^9	80×10^9
Aluminio	70×10^9	25×10^9	70×10^9
Concreto	20×10^9		
Ladrillo	14×10^9		
Mármol	50×10^9		70×10^9
Granito	45×10^9		45×10^9
Madera (pino)	(paralelo al grano)	10×10^9	
	(perpendicular al grano)	1×10^9	
Nylon	5×10^9		
Hueso (extremidad)	15×10^9	80×10^9	
Líquidos			
Agua			2.0×10^9
Alcohol (etílico)			1.0×10^9
Mercurio			2.5×10^9
Gases[†]			
Aire, H ₂ , He, CO ₂			1.01×10^5

[†]A presión atmosférica normal y sin variación de temperatura en el proceso.

15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

Los terremotos producen ambos tipos de ondas longitudinales y transversales. Ambos tipos pueden viajar a través de un material sólido, pero solamente las ondas longitudinales pueden propagarse a través de un fluido—en la dirección transversal, un fluido no tiene fuerza restauradora.

Las ondas superficiales son ondas que pueden viajar a lo largo de la frontera entre dos materiales.

15-2 Tipos de ondas: Transversales y Longitudinales

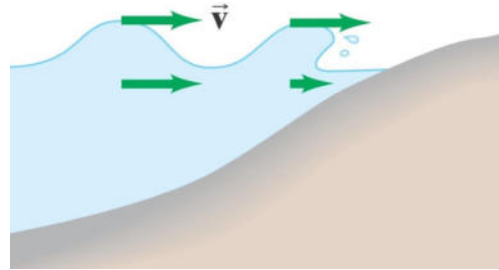
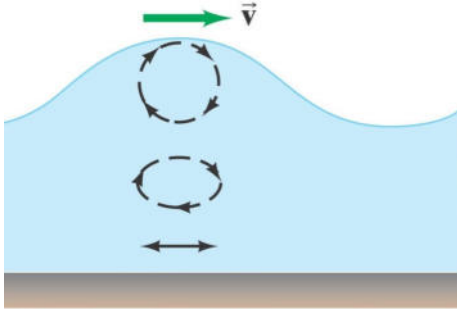
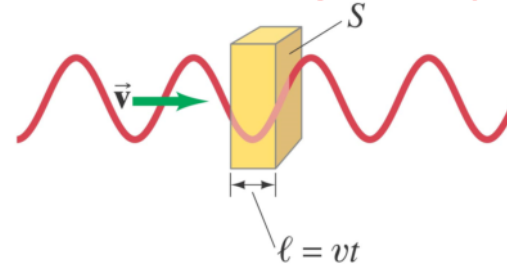


FIGURA 15.9 Una ola es un ejemplo de una onda superficial, que es una combinación de movimientos de onda transversal y longitudinal.

FIGURA 15.10 Cómo rompe una ola. Las flechas representan la velocidad local de las moléculas de agua.

15-3 Energía transportada por las Ondas



Al mirar la energía de una partícula de materia en el medio de una onda, se tiene:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = 2\pi^2mf^2A^2.$$

FIGURA 15.11 Cálculo de la energía transportada por una onda que se mueve con velocidad v .

Entonces, suponiendo que todo el medio tiene la misma densidad, se encuentra:

$$I = \frac{\bar{P}}{S} = 2\pi^2v\rho f^2A^2.$$

Así, la intensidad es proporcional al cuadrado de la frecuencia y al cuadrado de la amplitud.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-3 Energía transportada por las Ondas

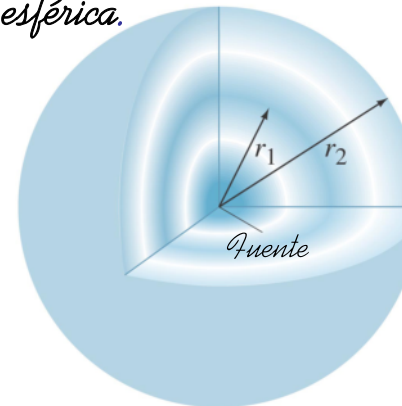
La intensidad, I , de una onda se define como la potencia promedio transferida a través de un área unitaria perpendicular a la dirección de flujo de la energía.

En el sistema de unidades SI: W/m^2

Si una onda fluye en todas las direcciones, es una onda tridimensional. Ejemplos de ello son el sonido que viaja en el aire abierto, las ondas sísmicas y las ondas de luz.

15-3 Energía transportada por las Ondas

Si una onda es capaz de propagarse en tres-dimensiones desde su frente, y el medio es uniforme (isotrópico), la onda es esférica.



Solamente a partir de consideraciones geométricas, siempre y cuando la potencia de salida sea constante, se ve que:

$$I \propto \frac{1}{r^2}.$$

FIGURA 15.12 Una onda que viaja hacia fuera desde una fuente puntual tiene forma esférica. Se muestran dos diferentes crestas (o compresiones), con radios r_1 y r_2 .

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-4 Representación matemática de una Onda Viajera

Supón que la forma de una onda viene dada por:

$$D(x) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} x.$$

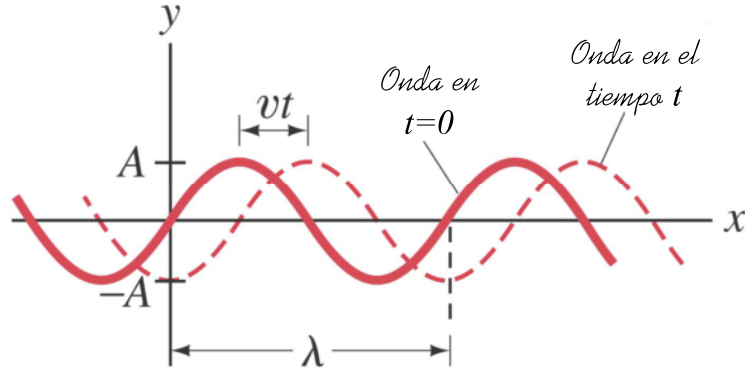


FIGURA 15.13 Una onda viajera. En el tiempo t, la onda se mueve una distancia vt.

15-4 Representación matemática de una Onda Viajera

Después de un tiempo t, la cresta de la onda ha viajado una distancia vt, entonces:

$$D(x, t) = A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right].$$

ó: $D(x, t) = A \sin(kx - \omega t),$

con $\omega = 2\pi f$ y $k = \frac{2\pi}{\lambda}.$

donde k es el número de onda y v la velocidad de fase.

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}.$$

15-5 La Ecuación de Onda

Mira ahora un segmento de cuerda bajo tensión:

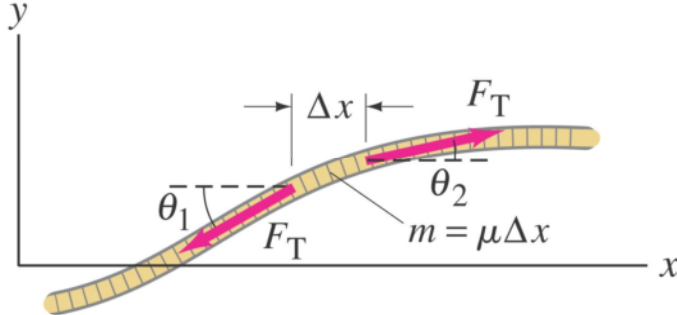


FIGURA 15.15 Derivación de la ecuación de onda a partir de la segunda ley de Newton: un segmento de cuerda bajo tensión F_T .

La segunda ley de Newton te da:

$$\Sigma F_y = ma_y$$

$$F_T \sin \theta_2 - F_T \sin \theta_1 = (\mu \Delta x) \frac{\partial^2 D}{\partial t^2}.$$

15-5 La Ecuación de Onda

Asumiendo ángulos pequeños (Rad), y tomando el límite $\Delta x \rightarrow 0$, te da (después de algo de manipulación):

$$\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 D}{\partial t^2}.$$

Esta es la ecuación de una onda unidimensional; la cual es una ecuación diferencial de segundo orden en derivadas parciales en x y t. Sus soluciones son ondas sinusoidales.

15-6 El Principio de Superposición

Superposición: El desplazamiento en cualquier punto es la suma vectorial de los desplazamientos de todas las ondas que pasan a través de dicho punto en ese instante.

Teorema de Fourier: Cualquier onda periódica compleja puede escribirse como la suma de ondas sinusoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y fases.

15-6 El Principio de Superposición

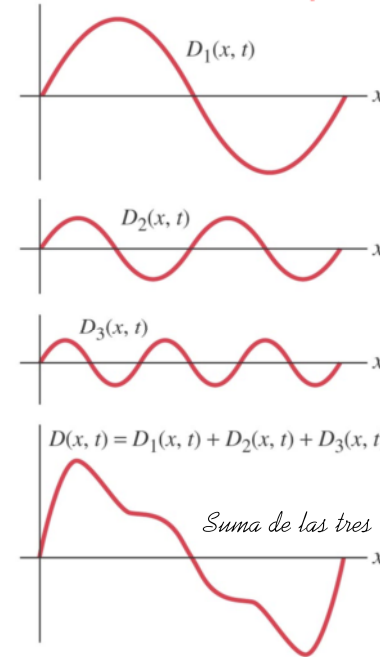
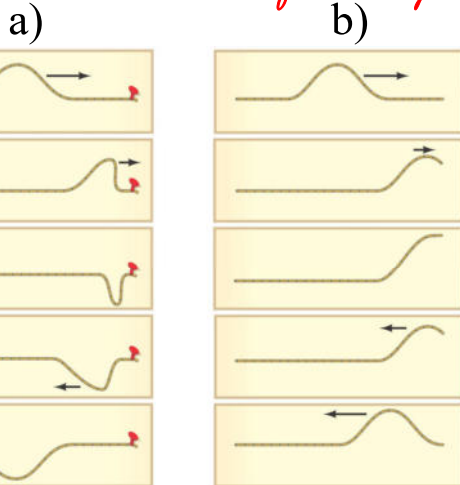


FIGURA 15.16 El principio de superposición para ondas unidimensionales. Una onda compuesta formada a partir de tres ondas sinusoidales de diferentes amplitudes y frecuencias (f_0 , $2f_0$, $3f_0$) en cierto instante en el tiempo. La amplitud de la onda compuesta en cada punto del espacio, en cualquier momento, es la suma algebraica de las amplitudes de las ondas componentes. Las amplitudes se muestran exageradas; para que se sostenga el principio de superposición, las amplitudes deben ser pequeñas comparadas con las longitudes de onda.

15-7 Reflexión y Transmisión



Una onda alcanza el final de su medio, pero si el medio es aún libre para moverse, se reflejará (b), y su reflexión será vertical.

Una onda que choca contra un obstáculo se reflejará (a), y su reflejo será invertido.

FIGURA 15.18 Reflexión de un pulso de onda en una cuerda que yace sobre una mesa. a) El extremo de la cuerda está fijo a un pivote. b) El extremo de la cuerda tiene libertad de movimiento.

15-7 Reflexión y Transmisión

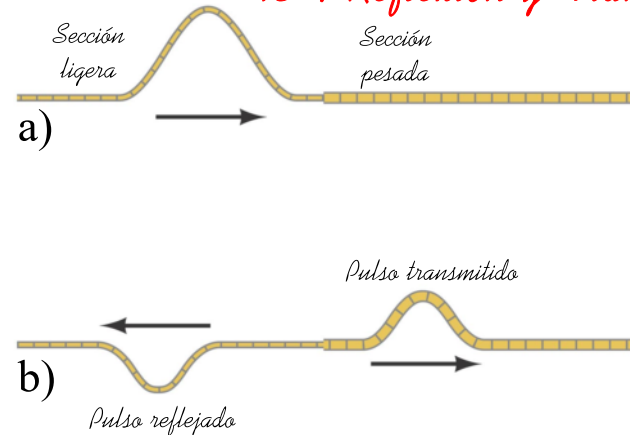
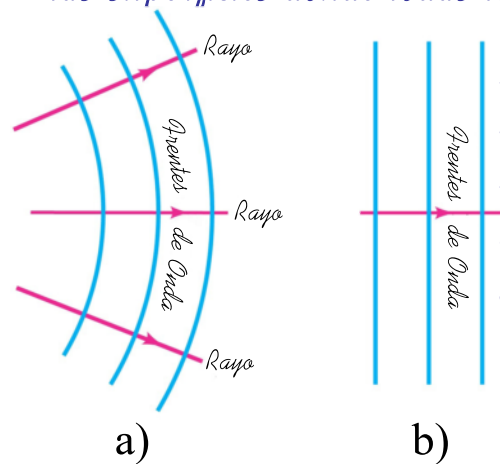


FIGURA 15.19 Cuando un pulso de onda que viaja hacia la derecha a lo largo de una cuerda delgada a) alcanza una discontinuidad donde la cuerda se vuelve más gruesa y pesada; entonces, parte se refleja y parte se transmite b).

Una onda que encuentre un medio más denso será parcialmente reflejada y parcialmente transmitida; si la rapidez de la onda es menor en el medio más denso, la longitud de onda será más corta.

15-7 Reflexión y Transmisión

Las ondas en dos o tres dimensiones pueden ser representadas por frentes de onda, que son las curvas de las superficies donde todas las ondas tienen la misma fase.



Las líneas perpendiculares a los frentes de onda son llamados rayos; estos apuntan en la dirección de propagación de la onda.

FIGURA 15.20 Los rayos, que significan la dirección del movimiento, siempre son perpendiculares a los frentes de onda (crestas de onda). a) Ondas circulares o esféricas cerca de la fuente. b) Lejos de la fuente, los frentes de onda son casi rectos o planos, y se llaman ondas planas.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D.

15-7 Reflexión y Transmisión

La ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

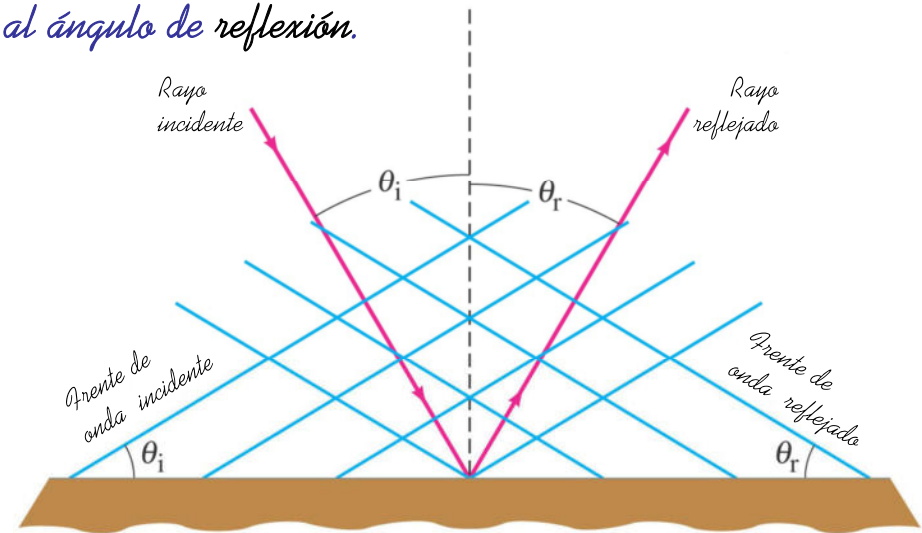


FIGURA 15.21 Ley de reflexión: $\theta_r = \theta_i$

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D.

15-8 Interferencia

El principio de superposición dice que cuando dos ondas pasan a través del mismo punto, el desplazamiento es la suma aritmética de los desplazamientos individuales.

En la figura, (a) presenta una interferencia destructiva y (b) presenta una interferencia constructiva.

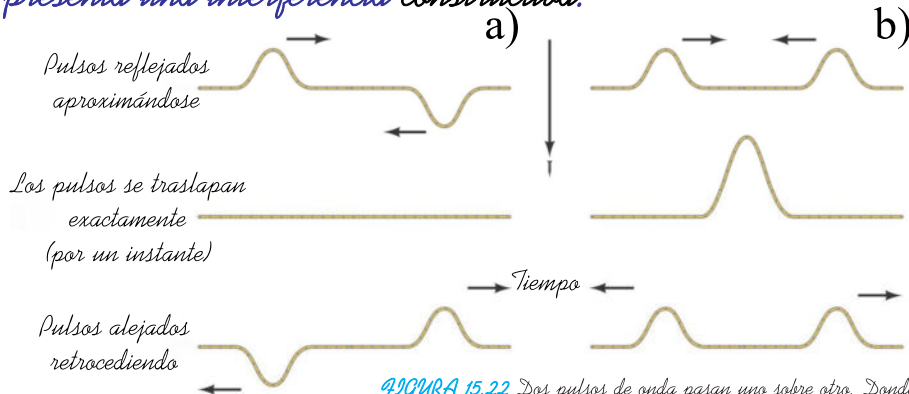


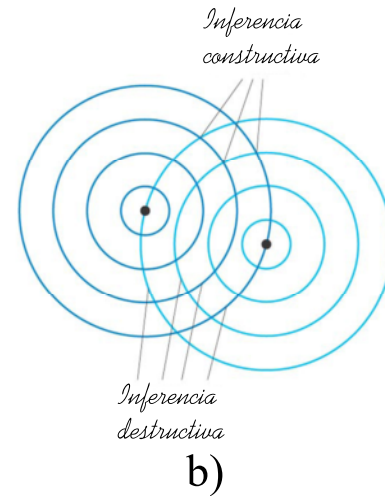
FIGURA 15.22 Dos pulsos de onda pasan uno sobre otro. Donde se traslapan, ocurre interferencia: a) destructiva y b) constructiva.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D.

15-8 Interferencia



a)



b)

FIGURA 15.23 a) Interferencia de ondas en el agua. b) La interferencia constructiva ocurre donde el máximo de una onda (una cresta) encuentra el máximo de otra. La interferencia destructiva ("agua plana") ocurre donde el máximo de una onda (una cresta) encuentra el mínimo de otra (un valle).

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D.

15-8 Interferencia

Estos gráficos muestran la suma de dos ondas. En (a) las ondas interfieren constructivamente; en (b) destructivamente; y en (c) de manera parcialmente destructiva.

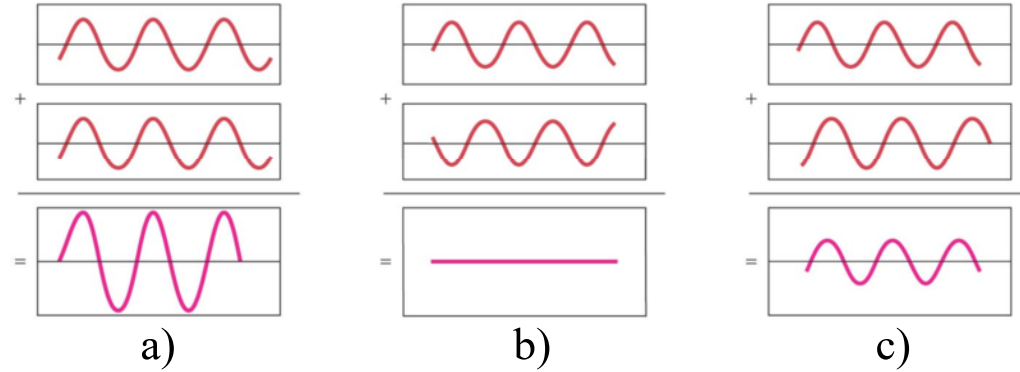


FIGURA 15.24 Gráficos que muestran dos ondas idénticas, y su suma, como función del tiempo en tres ubicaciones. En a) las dos ondas interfieren constructivamente, en b) destructivamente y en c) de manera parcialmente destructiva.

Capítulo 15. Física Básica. Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-9 Ondas Estacionarias; Resonancia

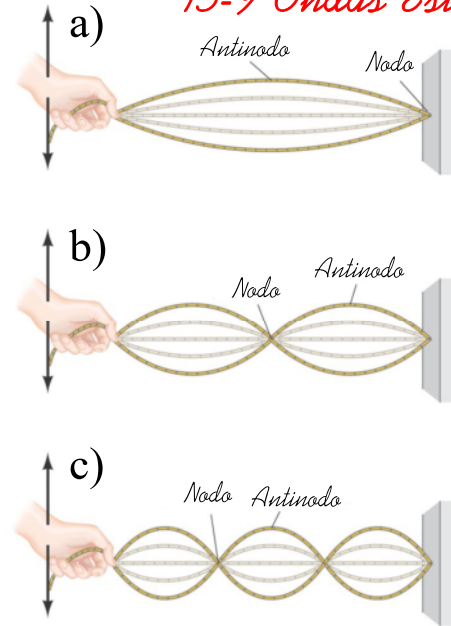


FIGURA 15.25 Ondas estacionarias correspondientes a tres frecuencias resonantes.

Capítulo 15. Física Básica. Marlon Basantes Valverde, Ph.D

Las ondas estacionarias se producen cuando los dos extremos de una cuerda son fijos. En este caso, solo las ondas que son inmóviles en los extremos de la cuerda pueden persistir. Hay nodos, donde la amplitud es siempre cero y antinodos, donde la amplitud varía desde cero hasta el valor máximo.

15-9 Ondas Estacionarias; Resonancia

Las frecuencias de las ondas estacionarias en una cuerda particular se llaman frecuencias resonantes.

Estas también son conocidas como la fundamental y los armónicos.

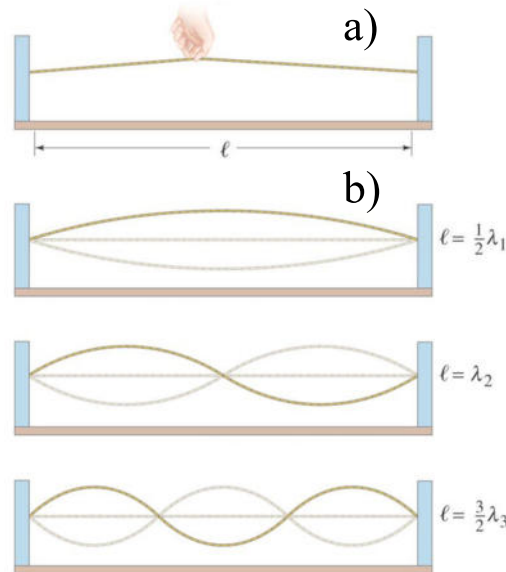


FIGURA 15.26 a) Una cuerda se pulsa. b) Sólo las ondas estacionarias correspondientes a frecuencias resonantes persisten más tiempo.

Capítulo 15. Física Básica. Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-9 Ondas Estacionarias; Resonancia

Las longitudes de onda y frecuencias de ondas estacionarias son:

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

y

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2\ell} = nf_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Capítulo 15. Física Básica. Marlon Basantes Valverde, Ph.D

15-10 Refracción

Si la onda entra en un medio donde la velocidad de la onda es diferente, esta será refractada—sus frentes de onda y rayos cambiarán de dirección.

Puedes calcular el ángulo de refracción, que depende de ambas velocidades de onda.

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}.$$

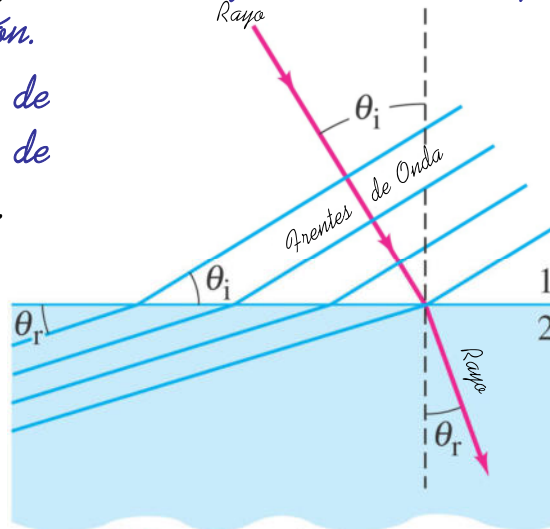


FIGURA 15.28 Refracción de ondas que pasan una frontera.

15-10 Refracción

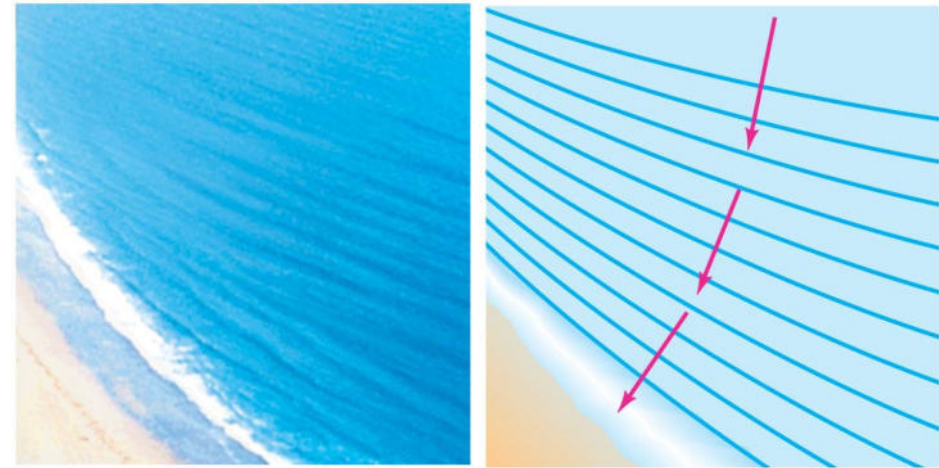


FIGURA 15.29 Las olas se refractan gradualmente conforme se aproximan a la playa y su velocidad disminuye. No hay una frontera distinguible, como en la figura 15-28, porque la velocidad de la onda cambia gradualmente.

15-10 Refracción

La ley de refracción funciona en ambos sentidos. Una onda que viaja desde un medio más lento a un medio más rápido debería seguir la línea roja en la otra dirección.

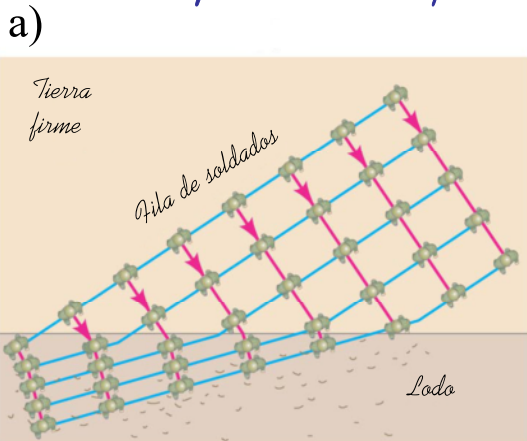
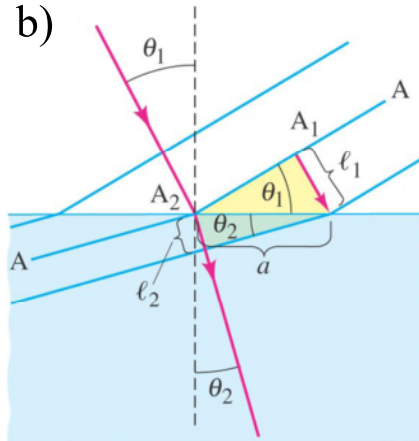
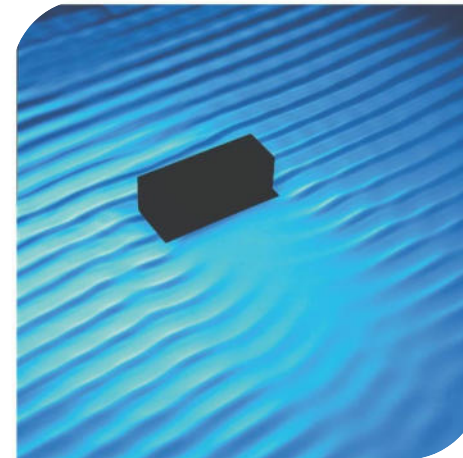


FIGURA 15.30 a) Analogía militar para deducir b) la ley de refracción para ondas.



15-11 Difracción



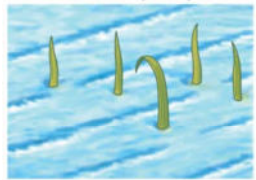
Las ondas se dispersan conforme viajan.

Cuando las ondas encuentran un obstáculo, se "doblan" a su alrededor dejando una región de "sombra". Esto se conoce como difracción.

FIGURA 15.31 Difracción de onda. Las ondas llegan desde la esquina superior izquierda. Note cómo las ondas, conforme pasan el obstáculo, se doblan alrededor del mismo, en la "región de sombra" detrás del obstáculo.

15-11 Difracción

La cantidad de difracción depende del tamaño del obstáculo en comparación de la longitud de onda. Si el obstáculo es mucho más pequeño que la longitud de onda, la onda es apenas afectada (a). Si el objeto es comparable o mayor que la longitud de onda, la difracción es mucho más significativa (b, c, d).



Olas que pasan
Hojas de
pasto firme

a)



Vara en agua

b)



Olas con longitud de onda
corta que pasan un tronco

c)



Olas con longitud de onda
larga que pasan un tronco

d)

FIGURA 15.32 Olas que pasan objetos de varios tamaños. Note que cuanto mayor sea la longitud de onda comparada con el tamaño del objeto, más difracción habrá en la "región de sombra".

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

Resumen del Capítulo 15

- Los objetos que vibran son fuentes de ondas, que pueden ser tanto pulsos o continuos.
- Longitud de onda: distancia entre crestas sucesivas.
- Frecuencia: número de crestas que pasan por un punto dado por unidad de tiempo.
- Amplitud: máxima altura de una cresta
- Velocidad de onda: $v = \lambda f$

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

Resumen del Capítulo 15

- Onda transversal: oscilaciones perpendiculares a la dirección del movimiento de las ondas.
- Ondas longitudinales: oscilaciones paralelas a la dirección del movimiento de las ondas.
- Intensidad: energía por unidad de tiempo que atraviesa una superficie unitaria (W/m^2):

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

- El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

Resumen del Capítulo 15

- Cuando dos ondas pasan a través de la misma región del espacio, interfieren. Esta interferencia puede ser constructiva o destructiva.
- Las ondas estacionarias se pueden producir en una cuerda con sus dos extremos fijos. Las ondas que persisten están en frecuencias resonantes.
- Los nodos ocurren dónde no hay movimiento; los antinodos dónde la amplitud es máxima.
- Las ondas se refractan al entrar en un medio de diferente velocidad de onda, y se difractan alrededor de obstáculos.

Capítulo 15. Física Básica, Marlon Basantes Valverde, Ph.D

Fin del Capítulo

Standard Model of Elementary Particles

LEPTONS		QUARKS						GAUGE BOSONS						SCALAR BOSONS	
CHARGES		CHARGES						CHARGES						CHARGES	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
e	μ	u	d	s	c	b	t	g	g	g	g	g	g	g	
ν_e	ν_μ	u	d	s	c	b	t	g	g	g	g	g	g	g	
ν_τ	ν_μ	u	d	s	c	b	t	g	g	g	g	g	g	g	
ν_τ	ν_μ	u	d	s	c	b	t	g	g	g	g	g	g	g	
ν_τ	ν_μ	u	d	s	c	b	t	g	g	g	g	g	g	g	
ν_τ	ν_μ	u	d	s	c	b	t	g	g	g	g	g	g	g	

parameter space of
M-Theory