

Le onde e il suono

La musica è bella ma può essere pericolosa. La prima fila del pubblico a un concerto rock si trova a circa 4 m di distanza dall'altoparlante più vicino, che emette una potenza sonora media di 100 W.

► **L'ordine di grandezza**

A quanti decibel è esposto uno spettatore della prima fila?

La risposta a pagina 355



Figura 12.1

L'onda prodotta dal motoscafo si propaga sulla superficie del lago e disturba il pescatore.

12.1 La natura delle onde

Le onde sull'acqua hanno due caratteristiche in comune con tutte le altre onde:

- un'onda è una perturbazione che si propaga nello spazio;
- un'onda trasporta energia da un posto a un altro.

Nella figura 12.1 l'onda generata dal motoscafo si muove nel lago e disturba il pescatore, perché trasferisce alla barca parte della sua energia. L'onda, però, non trasporta una massa d'acqua ed è quindi molto diversa dalla corrente in un fiume; piuttosto è una perturbazione che si propaga sulla superficie del lago.

■ Onde trasversali

Supponiamo di appoggiare su un tavolo una lunga molla elicoidale. Se muoviamo velocemente un estremo della molla in direzione perpendicolare a essa, vediamo che si propaga lungo la molla una perturbazione che chiamiamo **impulso** (figura 12.2).

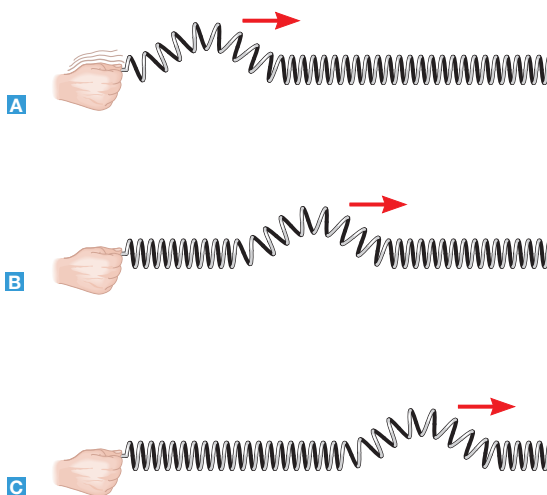


Figura 12.2

Muovendo rapidamente la molla in direzione perpendicolare al suo asse, si provoca una deformazione (impulso) che si propaga lungo la molla stessa da sinistra verso destra.

Se muoviamo l'estremo della molla con moto periodico perpendicolare a essa, lungo la molla si propaga una perturbazione detta **onda periodica**. In particolare, se questo moto è armonico sulla molla si propaga un'onda **armonica** (figura 12.3). Come mostra la parte C della figura, l'onda è formata da una successione di regioni della molla che oscillano alternativamente verso l'alto e verso il basso e si propagano verso destra trasferendo la perturbazione a ogni spira della molla. Fissando un segno colorato in un punto della molla, si nota che il segno compie oscillazioni armoniche attorno alla sua posizione di equilibrio e che i suoi spostamenti sono perpendicolari, o «trasversali», alla direzione in cui si propaga l'onda.

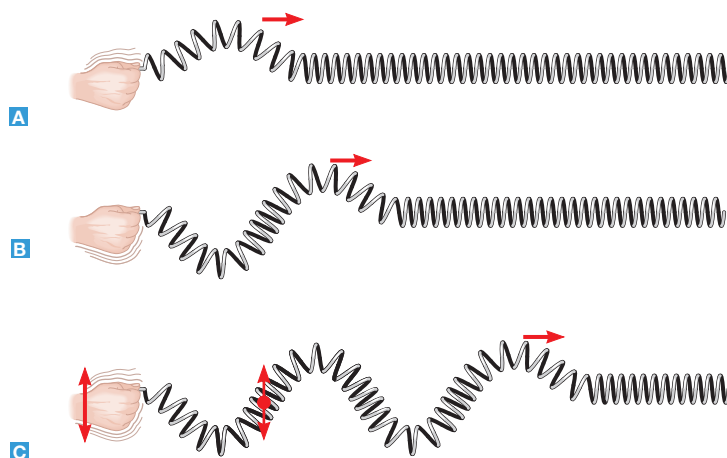


Figura 12.3

Quando si fa oscillare rapidamente e con continuità verso l'alto e verso il basso un estremo della molla, si genera un'onda trasversale che si propaga da sinistra verso destra.

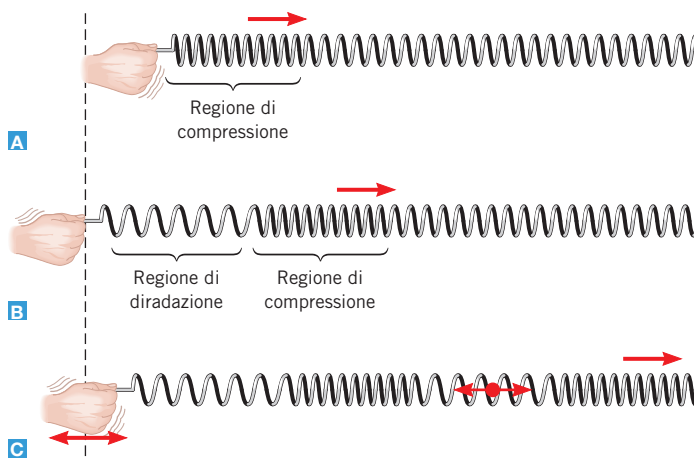
■ ONDA TRASVERSALE

Un'onda è **trasversale** quando la direzione della perturbazione è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.

Le onde radio, le onde luminose e le microonde sono esempi di onde trasversali. Sono onde trasversali anche quelle che si propagano nelle corde di strumenti musicali come la chitarra o il violino.

■ Onde longitudinali

Consideriamo nuovamente una molla elicoidale appoggiata su un tavolo. Se muoviamo avanti e indietro con moto armonico un estremo della molla nella direzione della sua lunghezza (cioè longitudinalmente), come nella figura 12.4, lungo la molla si propaga un'onda. Come mostra la parte C della figura, l'onda è formata da una successione di regioni della molla alternativamente compresse e diradate che si propagano lungo la molla. In questo caso, un segno colorato fissato sulla molla si muove avanti e indietro compiendo oscillazioni armoniche nella stessa direzione in cui si propaga l'onda.



■ ONDA LONGITUDINALE

Un'onda è **longitudinale** quando la direzione della perturbazione è uguale alla direzione di propagazione dell'onda.

Le onde sonore, per esempio, sono onde longitudinali.

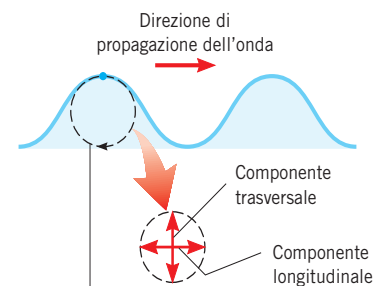
Alcuni tipi di onde non sono né trasversali né longitudinali. Per esempio, in un'onda che si propaga sulla superficie dell'acqua le particelle non si spostano né in direzione perpendicolare a quella in cui viaggia l'onda né nella stessa direzione. Come mostra la figura 12.5, i loro spostamenti hanno infatti sia una componente perpendicolare sia una componente parallela alla direzione di propagazione dell'onda. In particolare, le particelle d'acqua più vicine alla superficie descrivono traiettorie quasi circolari.

12.2 Onde periodiche

Le **onde periodiche** sono costituite da *cicli*, cioè da fenomeni che si ripetono uguali a se stessi con un ritmo regolare. Per esempio, un ciclo completo delle onde delle figure 12.3 e 12.4 è costituito da un'oscillazione armonica di ogni punto della molla intorno alla sua posizione di equilibrio.

Figura 12.4

Quando si fa oscillare rapidamente e con continuità avanti e indietro un estremo della molla, si genera un'onda longitudinale che si propaga da sinistra verso destra.



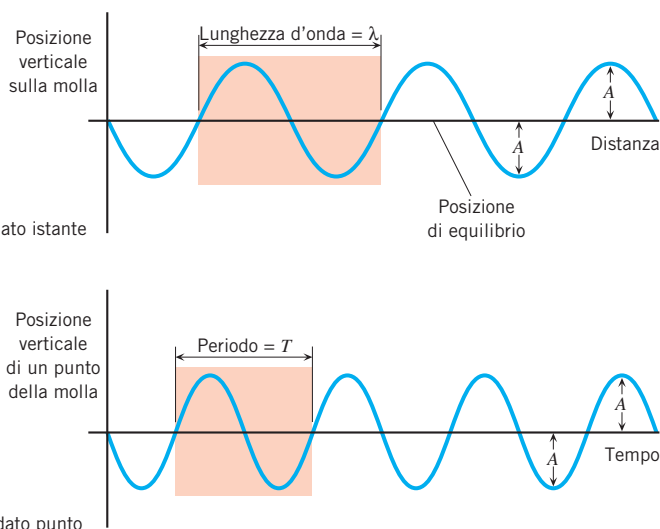
Una particella vicina alla superficie dell'acqua descrive una traiettoria circolare quando è investita da un'onda

Figura 12.5

Le onde sull'acqua non sono né trasversali né longitudinali, perché le particelle vicino alla superficie dell'acqua descrivono traiettorie quasi circolari.

Figura 12.6

Le parti evidenziate in colore rappresentano un ciclo d'onda. L'ampiezza dell'onda è indicata con A .



La figura 12.6A mostra la *rappresentazione spaziale* dell'onda, o **forma d'onda**, e corrisponde a una «fotografia» dell'onda *in un dato istante*. Un **ciclo** è la parte in colore: l'onda è formata da una successione di molti cicli.

L'**ampiezza A dell'onda** è lo spostamento massimo dalla posizione d'equilibrio di un punto del mezzo in cui si propaga l'onda. L'ampiezza dell'onda è uguale alla distanza tra una **cresta** (il punto più alto) o un **ventre** (il punto più basso) e la posizione di equilibrio.

La **lunghezza d'onda λ** (lambda) è la lunghezza di un ciclo ed è uguale alla distanza tra due creste successive, o tra due ventri successivi.

La figura 12.6B è invece una *rappresentazione temporale* dell'onda e mostra come varia la posizione di un *dato punto* del mezzo in cui si propaga l'onda al variare del tempo. Al passaggio dell'onda, il punto osservato compie oscillazioni armoniche intorno alla posizione di equilibrio.

Il **periodo T** è l'intervallo di tempo in cui viene compiuta un'oscillazione completa. In modo equivalente, si può definire il periodo come il tempo impiegato dall'onda per percorrere una distanza uguale alla lunghezza d'onda.

Il periodo e la frequenza sono legati dalla relazione:

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

Come abbiamo già visto nel capitolo 4, il periodo si misura in s e la frequenza in s^{-1} , cioè in hertz (Hz). Per esempio, se un'onda impiega un decimo di secondo per compiere un intero ciclo, in ogni secondo compie 10 cicli e quindi la sua frequenza è:

$$f = \frac{1}{0,1 \text{ s}} = 10 \text{ s}^{-1} = 10 \text{ Hz}$$

Il periodo, la lunghezza d'onda e la velocità di propagazione dell'onda sono legati da una relazione molto semplice che possiamo ricavare facendo riferimento alla figura 12.7. Immagina di essere fermo a un passaggio a livello e di osservare il passaggio di un treno che viaggia a velocità v . Il treno è formato da vagoni identici tra loro, ciascuno dei quali ha una lunghezza λ e impiega un tempo T per passarti davanti: la velocità del treno è perciò $v = \lambda/T$.

In modo analogo, si dimostra che la velocità di propagazione di un'onda di lunghezza d'onda λ e periodo T è:

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda \tag{12.1}$$

La terminologia che abbiamo introdotto e le relazioni fondamentali $f = 1/T$ e $v = f\lambda$ valgono sia per le onde trasversali sia per le onde longitudinali.

Il tempo impiegato da un vagone per attraversare l'incrocio è il periodo T

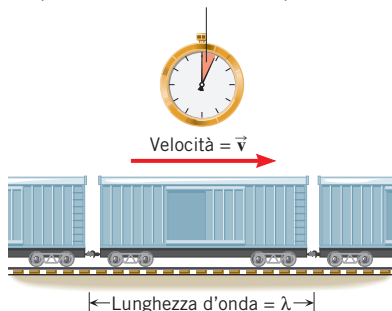


Figura 12.7

Un treno che viaggia a velocità costante può essere utilizzato come analogia per un'onda che si propaga con la stessa velocità.

ESEMPIO 1 ■ Onde trasversali**La lunghezza d'onda delle onde radio**

Le onde radio AM e FM sono onde trasversali costituite da perturbazioni di tipo elettromagnetico che si propagano a $3,00 \cdot 10^8$ m/s e che tratteremo nel capitolo 24. Una stazione radio trasmette onde radio AM con una frequenza di 1230 kHz e onde radio FM con una frequenza di 91,9 MHz.

► Calcola la lunghezza d'onda di ciascuno dei due tipi di onde.

Ragionamento e soluzione

Ricordando che $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$ e $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$, calcoliamo le lunghezze d'onda mediante la relazione $v = f\lambda$:

$$AM \quad \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1230 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = \boxed{244 \text{ m}}$$

$$FM \quad \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{91,9 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = \boxed{3,26 \text{ m}}$$

Osserva che la lunghezza d'onda di un'onda radio AM è uguale a circa due volte e mezzo la lunghezza di un campo da calcio!

■ La velocità di un'onda su una corda

La velocità di propagazione di un'onda dipende dalle caratteristiche del mezzo in cui si propaga (*).

In una corda sottoposta a una tensione T , la velocità di propagazione di un'onda trasversale aumenta all'aumentare di T e diminuisce all'aumentare della massa per unità di lunghezza m/L della corda. Si può infatti dimostrare che, per piccole ampiezze, la velocità di propagazione di un'onda trasversale in una corda è:

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \quad (12.2)$$

Negli strumenti musicali a corda, come la chitarra, il violino e il pianoforte, le onde trasversali sono generate pizzicando le corde, strofinandole con un archetto o percuotendole con un martelletto.

ESEMPIO 2 ■ Velocità di un'onda trasversale**Velocità delle onde sulle corde di una chitarra**

Quando si pizzica la corda di una chitarra, su di essa si propagano onde trasversali (figura 12.8). La lunghezza delle corde fra i due estremi fissi è 0,628 m. La massa della corda del *mi* acuto è 0,208 g, mentre quella del *mi* grave è 3,32 g. In entrambe la tensione è 226 N.

► Calcola le velocità di propagazione delle onde nelle due corde.

Ragionamento e soluzione

Poiché la tensione è uguale in entrambe le corde, ci aspettiamo che la velocità dell'onda sia maggiore nella corda che ha densità lineare minore. Infatti:

$$Mi \text{ acuto} \quad v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} = \sqrt{\frac{226 \text{ N}}{(0,208 \cdot 10^{-3} \text{ kg})/(0,628 \text{ m})}} = \boxed{826 \text{ m/s}}$$

$$Mi \text{ grave} \quad v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} = \sqrt{\frac{226 \text{ N}}{(3,32 \cdot 10^{-3} \text{ kg})/(0,628 \text{ m})}} = \boxed{207 \text{ m/s}}$$

Nota quanto sono elevate queste velocità: i due valori calcolati equivalgono rispettivamente a 2970 km/h e 745 km/h.

(*) Le onde elettromagnetiche, che verranno trattate nel capitolo 24, possono propagarsi anche nel vuoto, oltre che in materiali come il vetro e l'acqua.

Problem solving**Osservazione sulla velocità di un'onda**

La relazione $v = f\lambda$ vale per qualunque tipo di onda periodica.

**Fisica quotidiana**

Onde sulle corde di una chitarra

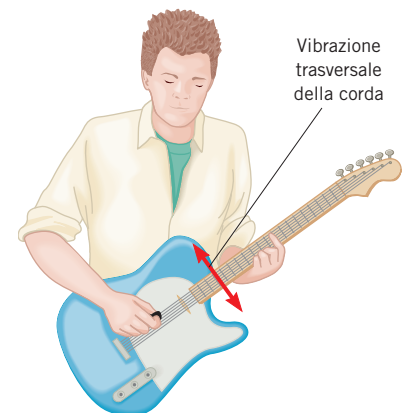


Figura 12.8

Pizzicando le corde di una chitarra si generano onde trasversali che si propagano nelle corde.

12.3 La descrizione matematica di un'onda

Quando un'onda si propaga in un mezzo sposta le particelle del mezzo dalla loro posizione di equilibrio. Nel caso di un'onda periodica generata dal moto armonico della sorgente, lo spostamento è espresso mediante una funzione goniometrica del tempo, come il seno o il coseno. Ciò era prevedibile, perché nel capitolo 4 abbiamo visto che il moto armonico si descrive mediante funzioni goniometriche e il grafico dello spostamento in funzione del tempo ha l'aspetto mostrato in figura 12.6.

Consideriamo una particella a distanza x dall'origine del sistema di riferimento; lo spostamento y di questa particella in ogni istante t in cui transita un'onda di ampiezza A , frequenza f e lunghezza d'onda λ è

$$\text{Onda che si propaga verso } +x \quad y = A \sin \left(2\pi ft - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (12.3)$$

$$\text{Onda che si propaga verso } -x \quad y = A \sin \left(2\pi ft + \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (12.4)$$

Le equazioni precedenti si applicano a onde trasversali o longitudinali tali che $y = 0$ m quando $x = 0$ m e $t = 0$ s. L'angolo $\left(2\pi ft \pm \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$ è detto **fase** dell'onda e si deve misurare in radianti.

Per comprendere il significato dell'equazione (12.3), consideriamo un'onda trasversale su una corda che si propaga verso $+x$, cioè verso x crescenti. Una particella della corda posta nell'origine ($x = 0$ m) si muove di moto armonico con una fase $2\pi ft$; quindi il suo spostamento in funzione del tempo è dato da:

$$y = A \sin (2\pi ft)$$

Una particella posta a una distanza x si muove di moto armonico con una fase:

$$2\pi ft - \frac{2\pi x}{\lambda} = 2\pi f \left(t - \frac{x}{f\lambda} \right) = 2\pi f \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

La grandezza x/v è il tempo che l'onda impiega per coprire la distanza x . Quindi il moto armonico del punto della corda a distanza x dall'origine è ritardato di un intervallo di tempo x/v rispetto al moto armonico nell'origine. In altre parole: in x un punto della corda si muove con il moto armonico che aveva un punto nell'origine x/v secondi prima.

La figura 12.9 mostra lo spostamento in funzione della posizione lungo la corda in una sequenza di istanti di tempo separati da $1/4$ di periodo T ($t = 0$ s, $T/4$, $2T/4$, $3T/4$, T). I grafici sono calcolati sostituendo i corrispondenti valori di t nell'equazione (12.3) e ricordando che $f = 1/T$. Questi grafici rappresentano una serie di fotografie istantanee prese mentre l'onda si propaga verso destra. Il quadratino colorato di ogni grafico segna il punto dell'onda che si trovava nell'origine $x = 0$ m all'istante $t = 0$ s. Al passare del tempo, il quadratino si sposta verso destra.

In modo analogo, si può verificare che l'equazione (12.4) rappresenta un'onda che si propaga verso sinistra, cioè nella direzione negativa delle x .

12.4 La natura del suono

■ Onde sonore longitudinali

Il suono è costituito da onde longitudinali generate da un oggetto che vibra, la **sorgente sonora**, come la corda di una chitarra, le corde vocali umane o la membrana di un altoparlante. Il suono può essere generato e trasmesso solo in un mezzo materiale, come un gas, un liquido o un solido. Quindi il suono non si propaga nel vuoto.

Per capire come si generano le onde sonore e perché sono onde longitudinali, consideriamo la membrana di un altoparlante. Come mostra la figura 12.10A, quando la membrana si muove verso l'esterno, comprime lo strato d'aria davanti a essa,

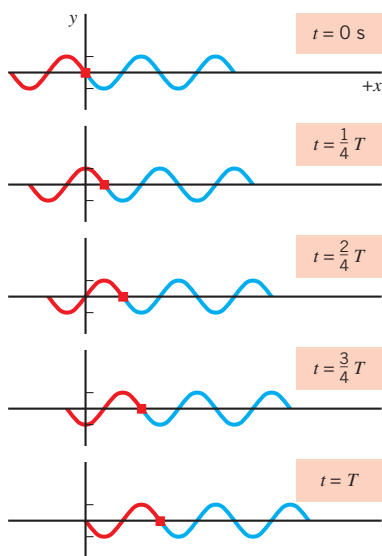
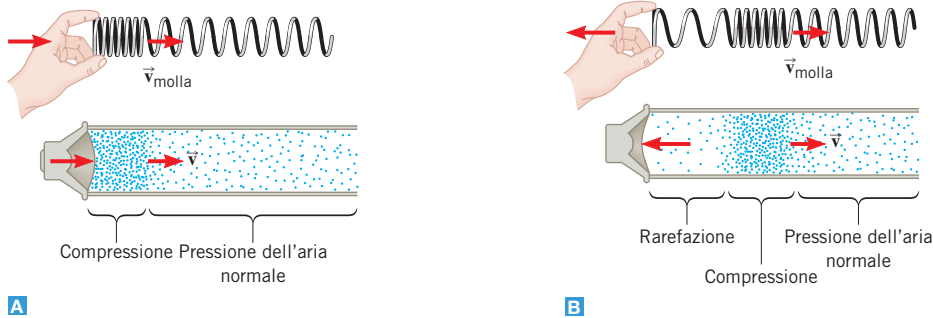


Figura 12.9

I grafici rappresentano la forma di un'onda che si propaga verso destra e sono stati calcolati a partire dall'equazione (12.3) per gli istanti di tempo di volta in volta indicati. Il quadratino colorato in ciascun grafico segna il punto dell'onda che nell'istante $t = 0$ s si trovava nel punto $x = 0$ m. Al passare del tempo, l'onda si propaga verso destra.

provocando un leggero aumento della pressione dell'aria in questa regione. La regione di aria compressa è chiamata **compressione** e si allontana dall'altoparlante con la velocità del suono. La compressione è analoga alla regione di spire compresse in un'onda longitudinale che si propaga in una molla.



Dopo aver prodotto la compressione, la membrana dell'altoparlante torna indietro, muovendosi verso l'interno, come mostra la figura 12.10B, e producendo nello strato d'aria a contatto con essa una regione chiamata **rarefazione**, in cui la pressione dell'aria è leggermente minore di quella normale. La rarefazione è analoga alla regione di spire diradate di un'onda longitudinale che si propaga in una molla. Anche la rarefazione si allontana dall'altoparlante alla velocità del suono seguendo la compressione.

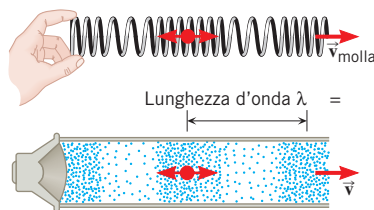


Figura 12.11

Sia l'onda che si propaga nella molla sia l'onda sonora generata dalla membrana di un altoparlante sono onde longitudinali. I pallini colorati attaccati a una spira della molla e a una molecola d'aria vibrano avanti e indietro in direzione parallela a quella in cui si propaga l'onda.

Continuando a vibrare, la membrana genera una successione di zone in cui l'aria è alternativamente compressa e rarefatta: è questa **l'onda sonora**. La figura 12.11 mostra che le molecole d'aria, come le particelle della molla, oscillano avanti e indietro nella stessa direzione in cui si propaga l'onda: quindi l'onda sonora è longitudinale. La figura mostra anche che la lunghezza d'onda λ è uguale alla distanza tra i centri di due compressioni successive o di due rarefazioni successive.

La figura 12.12 mostra come si propaga nello spazio l'onda sonora generata dalla membrana dell'altoparlante. Quando le compressioni e le rarefazioni arrivano all'orecchio, fanno vibrare il timpano con la stessa frequenza della membrana vibrante. Il moto vibratorio del timpano viene interpretato come suono dal cervello. È importante ricordare che il suono non è generato dagli spostamenti di masse d'aria come quelli che danno origine ai venti. Le compressioni e le rarefazioni generate dall'altoparlante non trasportano le molecole dell'aria, ma le fanno oscillare attorno alla loro posizione d'equilibrio, a cui ritornano quando l'onda è passata.

■ Frequenza di un'onda sonora

Ogni ciclo di un'onda sonora è composto da una compressione e una rarefazione, e la **frequenza** dell'onda è il numero di cicli che passano in un secondo in uno stesso punto del mezzo in cui l'onda si propaga.

Per esempio, se la membrana di un altoparlante oscilla avanti e indietro con moto armonico di frequenza 1000 Hz, essa genera in un secondo una successione di 1000 compressioni seguite da 1000 rarefazioni, cioè genera un'onda sonora che ha una frequenza di 1000 Hz.



Fisica quotidiana

La membrana di un altoparlante

Figura 12.10

A. Quando la membrana vibrante di un altoparlante si muove verso l'esterno, produce una compressione dello strato d'aria a contatto con essa.
B. Quando la membrana si muove verso l'interno, produce una rarefazione dello strato d'aria a contatto con essa. Le regioni di compressione e rarefazione sono simili a quelle di un'onda longitudinale che si propaga in una molla.

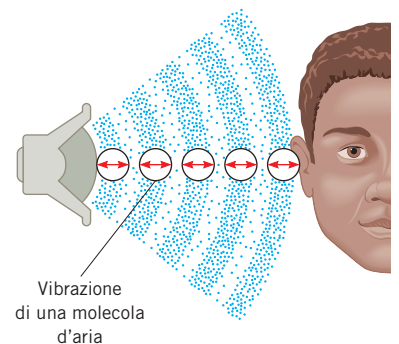
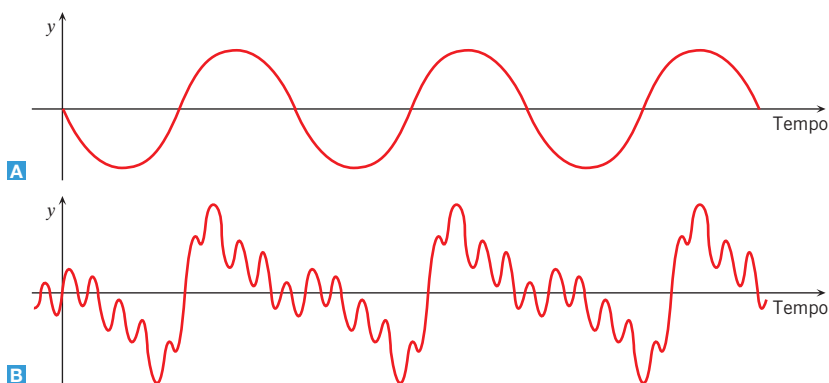


Figura 12.12

Le regioni di compressione e di rarefazione si propagano nell'aria dall'altoparlante verso l'orecchio dell'ascoltatore, ma le molecole dell'aria non sono trasportate dall'onda. Ogni molecola vibra avanti e indietro intorno alla sua posizione di equilibrio.

Figura 12.13

La rappresentazione temporale di un suono puro (A) e di un suono complesso (B). In questo caso la frequenza fondamentale del suono complesso è la stessa del suono puro.

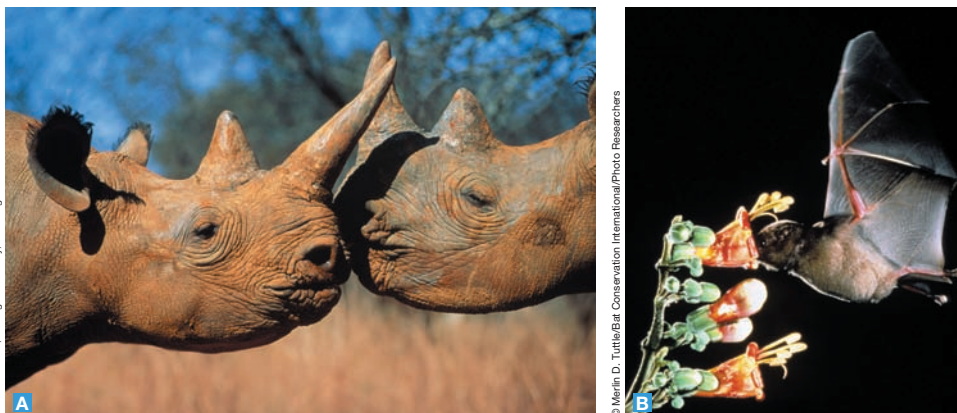


Un suono si dice **puro** quando le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico (figura 12.13A): la frequenza di oscillazione delle particelle è la frequenza del suono puro. Quando le particelle oscillano di moto periodico ma non armonico (figura 12.13B), il suono si dice **complesso**: anche in questo caso, si può individuare una frequenza che caratterizza il suono, detta **frequenza fondamentale**.

Una persona giovane riesce a sentire suoni che hanno frequenze comprese tra 20 Hz e 20 000 Hz (cioè 20 kHz). La capacità di sentire i suoni con frequenza maggiore diminuisce con l'età: una persona di mezz'età non riesce più a percepire suoni con frequenze superiori a 12-14 kHz.

Figura 12.14

A. I rinoceronti si chiamano tra loro usando infrasuoni.
B. I pipistrelli usano ultrasuoni per orientarsi nel volo e per individuare la posizione degli oggetti.



È possibile generare suoni che hanno frequenze minori o maggiori dei limiti di udibilità, anche se normalmente questi suoni non vengono percepiti dall'orecchio umano. I suoni con frequenza minore di 20 Hz sono chiamati **infrasuoni**, mentre quelli con frequenza maggiore di 20 kHz sono chiamati **ultrasuoni**. I rinoceronti (figura 12.14A) si chiamano tra loro emettendo infrasuoni con frequenza di circa 5 Hz, mentre i pipistrelli (figura 12.14B) usano ultrasuoni con frequenze fino a 100 kHz per individuare la posizione degli oggetti e per orientarsi nel volo.

Un suono puro può essere generato con un diapason (figura 12.15), mentre gli strumenti musicali non emettono suoni puri ma suoni complessi caratterizzati da forme d'onda molto differenti tra loro (figura 12.16).

■ **Altezza e timbro**

La frequenza è una *caratteristica oggettiva* del suono perché può essere misurata con un apposito strumento. Invece il modo in cui la frequenza viene percepita cambia da un ascoltatore all'altro. Il nostro cervello, infatti, interpreta le frequenze rilevate dall'orecchio in termini di una qualità soggettiva detta **altezza**: un suono con una frequenza fondamentale alta è interpretato come un suono alto o **acuto**, mentre un suono con una frequenza fondamentale bassa è interpretato come un suono basso o **grave**. Per esempio, un ottavino produce suoni acuti, mentre una tuba produce suoni gravi.



Figura 12.15

Il diapason è uno strumento sonoro formato da una forcilla d'acciaio a due rami (rebbi) che, percossi, emettono un suono puro. Del diapason ripareremo più diffusamente nel paragrafo 12.9.

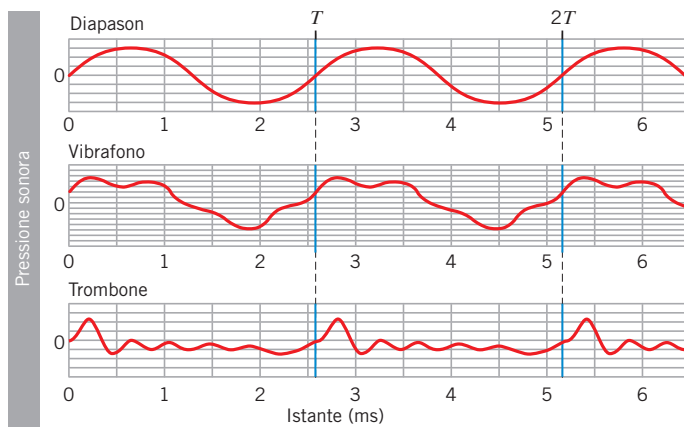


Figura 12.16

Ogni strumento musicale ha un proprio timbro a cui corrisponde un tipo particolare di onda periodica. La figura riporta le forme d'onda sonora relative a una stessa nota (sol) emessa da un diapason, da un vibrafono e da un trombone. Le tre onde hanno lo stesso periodo di 2,6 ms, ma forme molto diverse.

Le note della scala musicale corrispondono a ben precise frequenze sonore. Senza entrare nel dettaglio della notazione musicale, ci limitiamo a riportare in figura 12.17 le frequenze dei diversi *do* nella tastiera di un pianoforte.

Nel complesso, il nostro udito è uno strumento assai raffinato. Infatti, quando ascoltiamo una stessa nota musicale suonata da strumenti diversi, siamo in grado di distinguerli anche se gli strumenti stanno emettendo suoni con la stessa frequenza fondamentale. Questa diversa percezione è legata a una caratteristica del suono, chiamata **timbro**, che dipende dalla particolare legge periodica con cui oscillano le particelle quando sono investite dall'onda sonora.

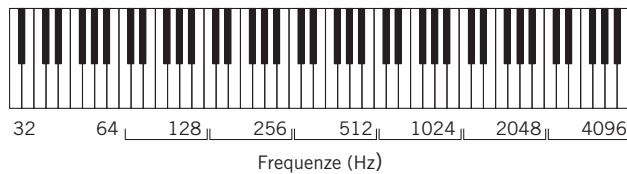


Figura 12.17

Frequenze dei diversi *do* nella tastiera di un pianoforte.

■ L'ampiezza di un'onda sonora

La figura 12.18 rappresenta un suono puro che si propaga all'interno di un tubo. Alcuni manometri disposti lungo il tubo misurano i valori della pressione in vari punti dell'onda. Il grafico che si ottiene riportando i valori della pressione al variare della posizione del punto sorgente è una sinusoide. Anche se questo grafico è simile a quello della forma d'onda di un'onda trasversale, ricordiamo che un'onda sonora è un'onda longitudinale e che il grafico posizione-pressione non va confuso con il grafico posizione-spostamento.

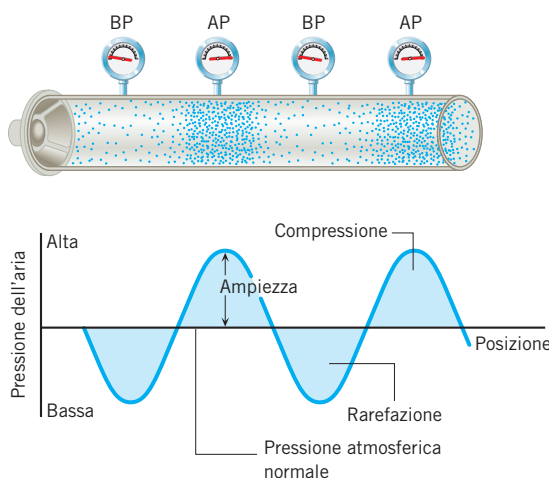


Figura 12.18

Un'onda sonora è costituita da una successione di regioni di compressione e regioni di rarefazione. Il grafico mostra che la pressione dell'aria nelle regioni di compressione è maggiore della pressione atmosferica ed è minore della pressione atmosferica nelle regioni di rarefazione (AP, alta pressione; BP, bassa pressione).

Tabella 12.1 Velocità del suono in alcuni sostanze gassose, liquide e solide

Sostanza	Velocità (m/s)
Gas	
Aria (a 0 °C)	331
Aria (a 20 °C)	343
Biossido di carbonio (a 0 °C)	259
Elio (a 0 °C)	965
Ossigeno (a 0 °C)	361
Liquidi	
Acqua dolce (a 20 °C)	1482
Acqua di mare (a 20 °C)	1522
Alcol etilico (a 20 °C)	1162
Cloroformio (a 20 °C)	1004
Mercurio (a 20 °C)	1450
Solidi	
Acciaio	5960
Piombo	5010
Rame	1960
Vetro (Pyrex)	5640

Il grafico mostra che la pressione è maggiore della pressione atmosferica nelle regioni di compressione e minore della pressione atmosferica nelle regioni di rarefazione. Il grafico mostra anche l'**ampiezza della pressione**, che è il valore massimo della differenza tra la pressione in una regione di compressione e il valore della pressione atmosferica normale. Anche in questo caso osserviamo che l'ampiezza della pressione non va confusa con l'ampiezza dell'onda.

Le variazioni di pressione in un'onda sonora sono in genere molto piccole. Per esempio, in una normale conversazione tra due persone l'ampiezza della pressione è di circa $3 \cdot 10^{-2}$ Pa, ben minore della pressione atmosferica normale che è pari a $1,013 \cdot 10^5$ Pa.

La caratteristica del suono che dipende dall'ampiezza della pressione è la sua **intensità**: tanto maggiore è l'ampiezza della pressione, tanto più forte è il suono. L'intensità di un suono è una caratteristica sia oggettiva sia soggettiva. Infatti l'ampiezza della pressione può essere misurata con opportuni strumenti, ma uno stesso suono può essere percepito come più forte o più debole da persone diverse a seconda della sensibilità del loro apparato uditivo.

■ La velocità del suono

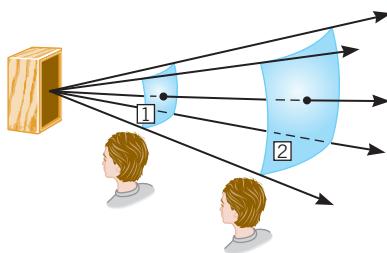
Come mostra la tabella 12.1, il suono si propaga a velocità molto diverse nei gas, nei liquidi e nei solidi. A temperatura ambiente la velocità del suono nell'aria è di 343 m/s (pari a circa 123018 km/h) ed è notevolmente maggiore nei liquidi e nei solidi. Per esempio, la velocità del suono nell'acqua è circa quattro volte maggiore di quella nell'aria e la sua velocità nell'acciaio è più di diciassette volte maggiore di quella nell'aria. In generale, il suono viaggia più lentamente nei gas, più velocemente nei liquidi e ancora più velocemente nei solidi.

12.5 L'intensità del suono

Le onde sonore trasportano energia che può essere usata per compiere lavoro, per esempio per far vibrare il timpano del nostro orecchio. La quantità di energia trasportata in un secondo da un'onda è chiamata **potenza** dell'onda e nel Sistema Internazionale si misura in joule al secondo (J/s), cioè in watt (W).

■ Intensità di un suono

Quando si allontana dalla sorgente che l'ha emessa, come l'altoparlante della figura 12.19, un'onda sonora si propaga attraversando superfici di area sempre maggiore. Attraverso le superfici indicate in figura con 1 e 2 passa la stessa potenza, ma l'intensità del suono è minore nella superficie più lontana.

**Figura 12.19**

La potenza trasportata da un'onda sonora si propaga con l'onda dopo che è stata emessa dalla sorgente, che in questa figura è l'altoparlante. Perciò l'onda attraversa perpendicolarmente prima la superficie 1 e poi la superficie 2 che ha un'area maggiore.

■ INTENSITÀ DI UN SUONO

L'**intensità di un suono** I è definita come rapporto tra la potenza sonora media \bar{P} che attraversa perpendicolarmente una data superficie e l'area A della superficie:

$$I = \frac{\bar{P}}{A} \quad (12.5)$$

Unità di misura: watt al metro quadrato (W/m^2).

ESEMPIO 3 ■ Intensità di un suono**Suoni da un altoparlante**

L'altoparlante della figura 12.19 genera una potenza sonora di $12 \cdot 10^{-5} \text{ W}$ che attraversa perpendicolarmente le superfici indicate con 1 e 2, di area rispettivamente $A_1 = 4,0 \text{ m}^2$ e $A_2 = 12 \text{ m}^2$.

► Calcola l'intensità del suono in ciascuna delle due superfici e spiega perché l'osservatore 2 sente un suono più debole di quello che sente l'osservatore 1.

Ragionamento e soluzione

Le superfici 1 e 2 sono attraversate dalla stessa potenza, ma l'area della superficie 2 è maggiore di quella della superficie 1, quindi l'intensità del suono nella superficie 2 è minore di quella nella superficie 1. Dall'equazione (12.5):

$$\text{Superficie 1} \quad I_1 = \frac{\bar{P}}{A_1} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \text{ W}}{4,0 \text{ m}^2} = \boxed{3,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2}$$

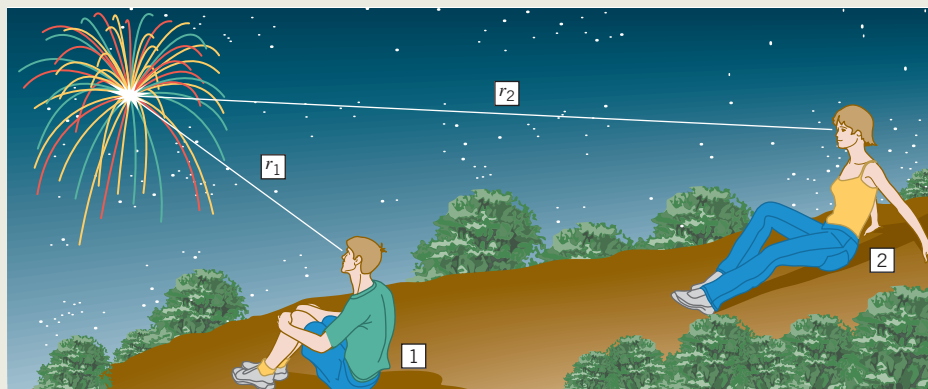
$$\text{Superficie 2} \quad I_2 = \frac{\bar{P}}{A_2} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \text{ W}}{12 \text{ m}^2} = \boxed{1,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2}$$

L'orecchio di un osservatore, che ha sempre la stessa superficie, è attraversato da una potenza minore dove l'intensità del suono (cioè la potenza sonora per unità di superficie) è minore. Quindi l'osservatore 2 sente un suono più debole.

Se una sorgente emette onde sonore in modo uniforme in tutte le direzioni, l'intensità sonora è legata alla distanza da una relazione molto semplice. La figura 12.20 mostra una sorgente di questo tipo al centro di una sfera immaginaria (di cui per chiarezza è rappresentata solo una metà) di raggio r . Poiché l'intera superficie sferica (di area $A = 4\pi r^2$) è attraversata dalla stessa potenza P , l'intensità del suono I in un punto a distanza r dalla sorgente è:

$$\text{Onda sferica uniforme} \quad I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (12.6)$$

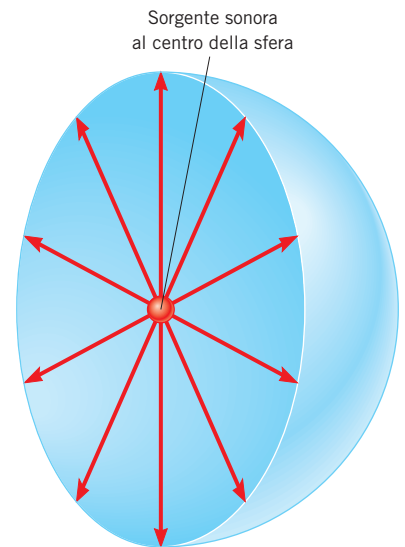
Dall'equazione precedente si può vedere che l'intensità di un'onda sferica uniforme è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente che l'ha emessa. Per esempio, se la distanza raddoppia l'intensità del suono diventa un quarto: $(1/2)^2 = 1/4$.

ESEMPIO 4 ■ Onde sferiche**Fuochi d'artificio**

La figura 12.21 mostra l'esplosione di un fuoco d'artificio. Supponi che il suono generato dallo scoppio si propaghi uniformemente in tutte le direzioni e che il suono riflesso dal suolo sia trascurabile. Quando il suono arriva all'osservatore 2, che si trova a una distanza $r_2 = 640 \text{ m}$ dalla sorgente, la sua intensità è $I_2 = 0,10 \text{ W/m}^2$.

Problem solving**Intensità sonora e potenza sonora**

L'intensità sonora I e la potenza sonora P sono due grandezze diverse e non vanno confuse. Sono comunque due grandezze collegate, perché la potenza sonora è uguale all'intensità sonora per unità di superficie.

**Figura 12.20**

La sorgente sonora al centro della sfera (di cui è rappresentata per chiarezza solo una metà) emette onde sonore uniformemente in tutte le direzioni.

Figura 12.21

Se il suono prodotto dallo scoppio di un fuoco d'artificio si propaga uniformemente in tutte le direzioni, la sua intensità in un punto a distanza r dalla sorgente è $I = P/4\pi r^2$, dove P è la potenza sonora generata dallo scoppio.

Problem solving

Osservazione sulle onde sferiche

L'equazione (12.6) può essere usata solo quando l'onda sonora si propaga uniformemente in tutte le direzioni e non ci sono ostacoli che possano rifletterla.

- Qual è l'intensità del suono che arriva all'osservatore 1 che si trova a una distanza $r_1 = 160$ m dalla sorgente?

Ragionamento e soluzione

Calcoliamo il rapporto tra le intensità sonore percepite dai due ascoltatori mediante l'equazione (12.6):

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{(640 \text{ m})^2}{(160 \text{ m})^2} = 16$$

Di conseguenza:

$$\begin{aligned} I_1 &= 16 \cdot I_2 = 16 \cdot (0,10 \text{ W/m}^2) = \\ &= \boxed{1,6 \text{ W/m}^2} \end{aligned}$$

■ Livello di intensità sonora

L'intensità minima I_0 di un suono puro con una frequenza di 1000 Hz che può essere percepita da un orecchio umano è $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Questo valore dell'intensità è chiamato **soglia minima udibile**. All'altro estremo si trova la **soglia massima sopportabile** (o **soglia del dolore**), che è circa 10 W/m^2 , ma già un'esposizione continua a suoni di intensità superiore a 1 W/m^2 provoca dolori e danni permanenti all'apparato uditivo. È comunque notevole l'ampiezza dell'intervallo di intensità a cui l'orecchio umano è sensibile: l'intensità massima che l'orecchio umano può tollerare senza dolore è mille miliardi di volte l'intensità minima percepibile.

La nostra percezione del volume di un suono dipende dall'intensità sonora secondo una relazione che non è lineare ma logaritmica. Per questa ragione si sceglie di misurare l'intensità con cui percepiamo un suono di intensità I mediante il **livello di intensità sonora** β , così definito:

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

dove $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ è la minima intensità sonora udibile. Nel Sistema Internazionale il livello di intensità sonora è espresso in **decibel (dB)** (tabella 12.2). Esperimenti di fisiologia dimostrano che il volume percepito sembra raddoppiare quando il livello di intensità sonora aumenta di 10 dB.

Tabella 12.2 Intensità sonore e livelli di intensità sonora per alcune tipologie di suono

	Intensità sonora I (W/m^2)	Livello di intensità sonora β (dB)
Soglia di udibilità	$1,0 \cdot 10^{-12}$	0
Fruscio di foglie	$1,0 \cdot 10^{-11}$	10
Bisbiglio	$1,0 \cdot 10^{-10}$	20
Conversazione normale (a 1 metro)	$3,2 \cdot 10^{-6}$	65
Interno di un'automobile nel traffico	$1,0 \cdot 10^{-4}$	80
Rumore di un'automobile senza marmitta	$1,0 \cdot 10^{-2}$	100
Concerto rock dal vivo	1,0	120
Soglia del dolore	10	130

12.6 L'effetto Doppler

Quando un camion dei pompieri si avvicina a noi il suono della sua sirena è più acuto di quando il camion è fermo o si allontana. Qualcosa di simile accade quando ci avviciniamo a una sorgente sonora ferma o ci allontaniamo da essa. Questi fenomeni furono spiegati nel 1842 dal fisico austriaco Christian Doppler (1803-1853) e sono chiamati collettivamente «effetto Doppler».

L'effetto Doppler è la variazione di frequenza del suono rilevato dal ricevitore perché la sorgente sonora e il ricevitore hanno velocità diverse rispetto al mezzo in cui il suono si propaga.

■ Sorgente in movimento e ricevitore fermo

Per capire come si verifica l'effetto Doppler nel caso in cui la sorgente sonora è in movimento e il ricevitore è fermo, consideriamo prima il suono emesso dalla sirena del camion dei pompieri fermo, rappresentato nella figura 12.22A. Supponiamo che, oltre al camion, anche l'aria sia ferma rispetto alla Terra.

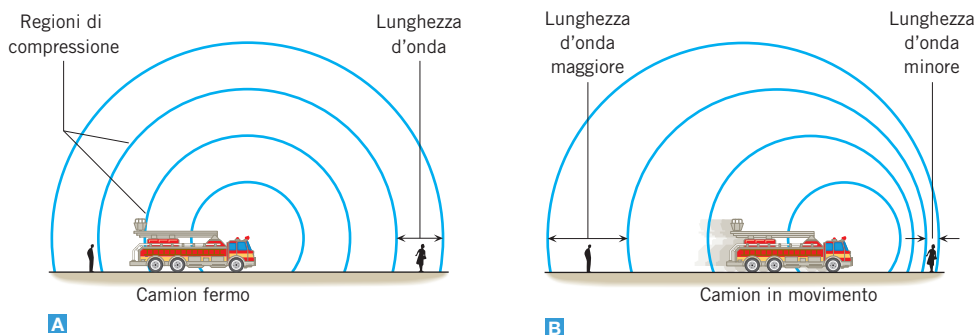


Figura 12.22

- A.** Quando il camion è fermo, la frequenza del suono emesso dalla sirena è uguale sia davanti al camion sia dietro di esso.
B. Quando il camion è in movimento, la lunghezza d'onda del suono davanti al camion diminuisce mentre quella del suono dietro il camion aumenta.

Ciascuno degli archi disegnati in blu nella figura rappresenta una regione di compressione dell'onda sonora. Poiché le compressioni e le rarefazioni sono simmetriche rispetto alla sorgente, sia il ricevitore davanti al camion sia il ricevitore dietro il camion ricevono lo stesso numero di compressioni al secondo, quindi i suoni che essi percepiscono hanno la stessa frequenza.

Quando il camion comincia a muoversi, la situazione cambia nel modo rappresentato nella parte B della figura. Le compressioni davanti al camion risultano ora più vicine tra loro e ciò provoca una diminuzione della lunghezza d'onda. Questo «addensamento» è dovuto al fatto che, prima di emettere un'altra compressione, il camion «guadagna terreno» rispetto alla compressione precedente.

Poiché le compressioni davanti al camion sono più vicine tra loro, l'osservatore davanti al camion riceve un numero di compressioni al secondo maggiore di quello che riceveva quando il camion era fermo. Questo significa che il suono percepito dall'osservatore ha una frequenza maggiore, cioè è più acuto, del suono percepito quando il camion era fermo.

Invece le compressioni dietro il camion sono più lontane tra loro quando il camion è in moto rispetto a quando il camion è fermo, e ciò provoca un aumento della lunghezza d'onda. L'allontanamento delle compressioni dietro il camion è dovuto al fatto che il camion «perde terreno» rispetto alle compressioni emesse in precedenza. L'osservatore dietro il camion riceve perciò un numero di compressioni al secondo minore di quello che riceveva quando il camion era fermo. Questo significa che il suono percepito dall'osservatore ha una frequenza minore, cioè è più grave, rispetto al suono percepito quando il camion era fermo.

Se la sirena del camion fermo della figura 12.22A emette una compressione nell'istante $t = 0$ s, emetterà la compressione successiva nell'istante T , dove T è il periodo dell'onda. Come mostra la figura 12.23A, la distanza tra queste due compressioni è la lunghezza d'onda λ dell'onda sonora emessa dalla sorgente ferma. Quando il camion si muove con velocità v_s (dove «s» sta per «sorgente» del suono) verso un osservatore fermo, la sirena emette compressioni negli istanti $t = 0$ s e $t = T$.

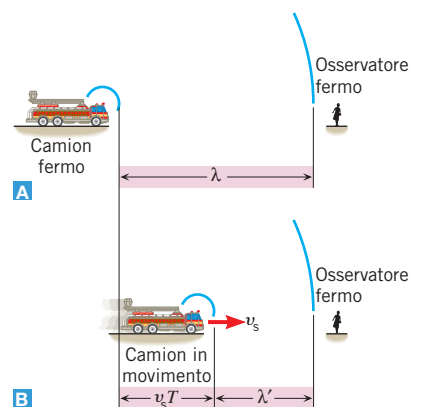


Figura 12.23

- A.** Quando il camion è fermo, la distanza tra due regioni di compressione successive è uguale alla lunghezza d'onda λ del suono emesso dalla sirena.
B. Quando il camion si muove con velocità v_s , la lunghezza d'onda λ' del suono davanti al camion è minore di quella del suono emesso dalla sirena.

Tuttavia, prima di emettere la seconda compressione, il camion si è avvicinato al ricevitore spostandosi in avanti di $v_s T$, come si può vedere nella figura 12.23B. Di conseguenza, la distanza fra due compressioni successive non è più uguale alla lunghezza d'onda λ del suono emesso dalla sorgente ferma, ma è λ' (minore di) λ' e dato da:

$$\lambda' = \lambda - v_s T,$$

Indicando con f_r la frequenza percepita dal ricevitore (dove «r» sta per «ricevitore»), dall'equazione (12.1) si ricava che f_r è uguale al rapporto tra la velocità del suono v e la lunghezza d'onda λ' :

$$f_r = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - v_s T}$$

La lunghezza d'onda del suono emesso dalla sirena ferma è $\lambda = v/f_s$, dove f_s è la frequenza dell'onda emessa dalla sorgente, mentre il suo periodo è $T = 1/f_s$. Sostituendo questi valori di λ e di T nell'equazione precedente e risolvendo l'equazione rispetto a f_r , si ottiene:

$$\begin{array}{l} \text{Sorgente in moto} \\ \text{verso un osservatore fermo} \end{array} \quad f_r = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}} \quad (12.7)$$

Poiché il termine $1 - v_s/v$ che compare al denominatore della frazione nell'equazione (12.7) è minore di uno, la frequenza f_r del suono percepito dal ricevitore è maggiore della frequenza f_s del suono emesso dalla sorgente. La differenza $f_r - f_s$ tra queste due frequenze è chiamata **spostamento Doppler** e il suo valore dipende dal valore del rapporto tra la velocità della sorgente v_s e la velocità del suono v .

Quando la sirena, invece di avvicinarsi al ricevitore, si allontana da esso, la lunghezza d'onda tra due regioni di compressione successive λ' è *maggiore* di λ e il suo valore è dato da:

$$\lambda' = \lambda + v_s T$$

Applicando lo stesso procedimento che abbiamo usato per ricavare l'equazione (12.7), possiamo trovare il valore f_r della frequenza percepita dal ricevitore in questo caso:

$$\begin{array}{l} \text{Sorgente che si allontana} \\ \text{da un osservatore fermo} \end{array} \quad f_r = f_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}} \quad (12.8)$$

Poiché il termine $1 + v_s/v$ che compare al denominatore della frazione nell'equazione (12.8) è maggiore di uno, la frequenza f_r del suono percepito dal ricevitore è minore della frequenza f_s del suono emesso dalla sorgente.

ESEMPIO 5 ■ Effetto Doppler

Il fischio di un treno che passa

Mentre un treno ad alta velocità sta viaggiando a una velocità di 44,7 m/s (161 km/h) il macchinista attiva l'avvisatore acustico che emette un fischio di frequenza di 415 Hz. La velocità del suono è 343 m/s. Quali sono le frequenze e le lunghezze d'onda dei suoni percepiti da una persona ferma a un passaggio a livello quando:

- ▶ il treno si sta avvicinando?
- ▶ il treno si sta allontanando?

Ragionamento e soluzione

- Quando il treno si avvicina, la frequenza del suono percepito dalla persona ferma è:

$$f_r = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}} = (415 \text{ Hz}) \left(\frac{1}{1 - \frac{44,7 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s}}} \right) = \boxed{477 \text{ Hz}}$$

La lunghezza d'onda di questo suono è:

$$\lambda' = \frac{v}{f_r} = \frac{343 \text{ m/s}}{477 \text{ Hz}} = \boxed{0,719 \text{ m}}$$

- Quando il treno si allontana, la frequenza del suono percepito dalla persona ferma è:

$$f_r = f_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}} = (415 \text{ Hz}) \left(\frac{1}{1 + \frac{44,7 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s}}} \right) = \boxed{367 \text{ Hz}}$$

La lunghezza d'onda di questo suono è:

$$\lambda' = \frac{v}{f_r} = \frac{343 \text{ m/s}}{367 \text{ Hz}} = \boxed{0,935 \text{ m}}$$

■ Osservatore in movimento e sorgente ferma

La figura 12.24 mostra come si verifica l'effetto Doppler quando la sorgente sonora è ferma e il ricevitore è in movimento, sempre nell'ipotesi che anche l'aria sia ferma.

Quando il ricevitore si muove con velocità di modulo v_r verso la sorgente ferma, percorre una distanza $v_r t$ in un tempo t . Durante questo tempo incontra tutte le regioni di compressione che avrebbe incontrato se fosse stato fermo più un certo numero di zone di compressione che è dato dal rapporto $v_r t / \lambda$ tra la distanza $v_r t$ che ha percorso e la distanza λ tra due regioni di compressione successive. Il numero di regioni di compressione in più che incontra in un secondo è perciò v_r / λ . Poiché un osservatore fermo sentirebbe un suono con la frequenza f_s emessa dalla sorgente, il ricevitore in moto sente un suono con una frequenza maggiore f_r data da:

$$f_r = f_s + \frac{v_r}{\lambda} = f_s \left(1 + \frac{v_r}{f_s \lambda} \right)$$

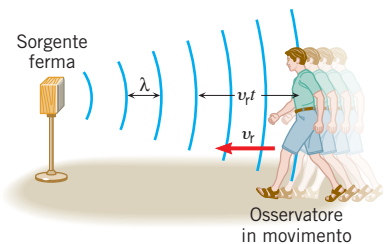
Ricordando che $v = f_s \lambda$, si ottiene:

$$\text{Osservatore che si avvicina a una sorgente ferma} \quad f_r = f_s \left(1 + \frac{v_r}{v} \right) \quad (12.9)$$

Un osservatore che si allontana da una sorgente ferma si muove nella stessa direzione dell'onda sonora emessa dalla sorgente e quindi incontra un numero minore di regioni di compressione rispetto a quelle che incontrerebbe un osservatore fermo. In questo caso il ricevitore sente quindi un suono con una frequenza minore f_r data da:

$$\text{Osservatore che si allontana da una sorgente ferma} \quad f_r = f_s \left(1 - \frac{v_r}{v} \right) \quad (12.10)$$

Il meccanismo fisico che produce l'effetto Doppler quando si muove il ricevitore è diverso da quello che lo produce quando si muove la sorgente. Quando si muove la sorgente e il ricevitore è fermo, la lunghezza d'onda λ rappresentata nella figura 12.23B cambia e di conseguenza cambia la frequenza f_r del suono percepito dal ricevitore. Quando invece si muove il ricevitore e la sorgente è ferma, la lunghezza d'onda λ rappresentata nella figura 12.24 non cambia. Quello che cambia è il numero di regioni di compressione al secondo incontrate da un osservatore in moto rispetto a quelle incontrate da un osservatore fermo e ciò fa sì che la frequenza f_r del suono percepito dal ricevitore in moto sia diversa.


Figura 12.24

Un osservatore che si muove con velocità v_r verso una sorgente sonora ferma incontra un numero maggiore di regioni di compressione al secondo rispetto a un osservatore fermo.

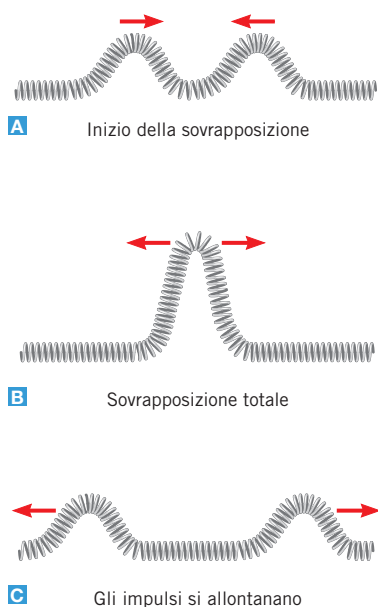


Figura 12.25

Due impulsi trasversali rivolti verso l'alto che si attraversano.

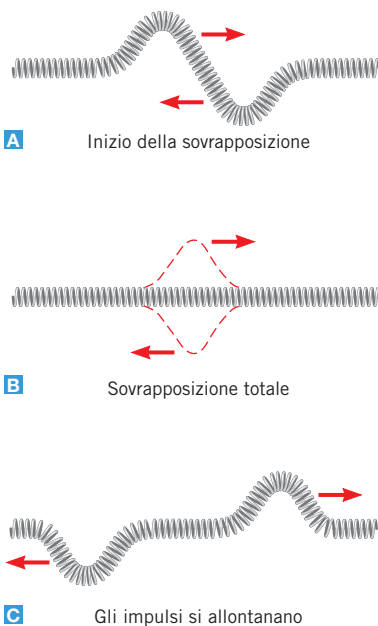


Figura 12.26

Due impulsi trasversali, uno rivolto verso l'alto e uno rivolto verso il basso, che si attraversano.

■ Caso generale

Può succedere che sia il ricevitore sia la sorgente si muovano rispetto al mezzo in cui si propaga il suono. Se il mezzo è fermo, la frequenza f_r del suono percepito dal ricevitore è data da una combinazione delle equazioni (12.7) e (12.10):

$$\text{Osservatore e sorgente in moto relativo} \quad f_r = f_s \left(\frac{1 \pm \frac{v_r}{v}}{1 \mp \frac{v_s}{v}} \right) \quad (12.11)$$

Nel numeratore dell'equazione precedente si deve usare il segno più quando il ricevitore si muove verso la sorgente e il segno meno quando il ricevitore si allontana dalla sorgente. Nel denominatore si deve usare il segno meno quando la sorgente si muove verso il ricevitore e il segno più quando la sorgente si allontana dal ricevitore. I simboli v_r , v_s e v indicano misure senza segno perché i segni più e meno che compaiono nell'equazione tengono già conto dei versi della direzione del moto del ricevitore e della direzione di propagazione dell'onda.

12.7 Il principio di sovrapposizione

Succede spesso che in uno stesso punto giungano contemporaneamente due o più onde sonore, come capita per esempio quando più persone parlano tra loro o quando una musica arriva dalle casse acustiche di un impianto stereo. Per capire che cosa succede in queste situazioni osserviamo le figure 12.25 e 12.26, che mostrano due impulsi trasversali di ampiezza uguale che viaggiano uno verso l'altro su una molla.

Nella figura 12.25 entrambi gli impulsi sono perturbazioni costituite da spostamenti verso l'alto delle spire della molla, mentre nella figura 12.26 un impulso è verso l'alto e l'altro verso il basso. Le parti A delle due figure mostrano che cosa succede quando i due impulsi incominciano a sovrapporsi. I due impulsi si combinano senza disturbarsi e la molla assume una forma che è la somma delle due forme che avrebbe avuto al passaggio dei due impulsi separati. Perciò, quando i due impulsi della figura 12.25A si sovrappongono completamente, si verifica la situazione mostrata nella parte B della figura, cioè l'ampiezza dell'impulso è il doppio di quella dei due impulsi separati. Analogamente, quando i due impulsi della figura 12.26A si sovrappongono completamente, si verifica la situazione mostrata nella parte B della figura, cioè la somma dei due impulsi è temporaneamente nulla e la molla si appiattisce. In entrambi i casi, dopo la sovrapposizione i due impulsi continuano a viaggiare separatamente e la molla si comporta come si comporterebbe se fosse attraversata da due impulsi separati.

Il fatto che due impulsi singoli si sommino senza disturbarsi dando luogo a un impulso risultante esemplifica una legge più generale chiamata **principio di sovrapposizione**.

■ PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

Quando due o più onde sono presenti contemporaneamente in uno stesso punto, la perturbazione in quel punto è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde.

Questo principio vale fra l'altro per le onde sonore, le onde sull'acqua e le onde elettromagnetiche come la luce.

12.8 Interferenza e diffrazione di onde sonore

■ Interferenza

Supponiamo che due onde sonore provenienti da due altoparlanti si sovrappongano in un punto al centro della zona di ascolto, come nella figura 12.27, e che esse

abbiano la stessa ampiezza e la stessa frequenza. Per semplicità supponiamo inoltre che la loro lunghezza d'onda sia $\lambda = 1$ m e che le membrane degli altoparlanti vibrino **in fase**, cioè che esse comincino a muoversi verso l'esterno nello stesso istante e tornino verso l'interno nello stesso istante.

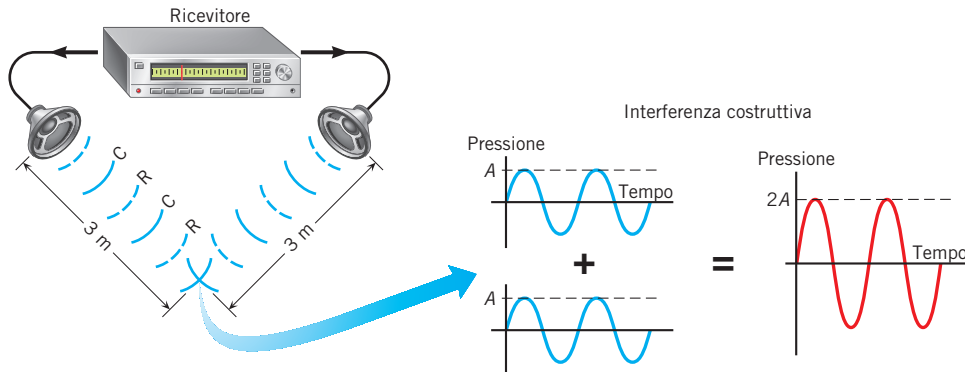


Figura 12.27

Per effetto dell'interferenza costruttiva tra due onde sonore con la stessa ampiezza A , in un punto posto a distanze uguali dalle due casse acustiche che emettono onde in fase (C, compressioni; R, rarefazioni) si sente un suono più intenso (di ampiezza $2A$).

Se i due altoparlanti sono alla stessa distanza dal punto in cui le onde si sovrappongono, si ha sempre la sovrapposizione delle compressioni (C) di un'onda con le compressioni dell'altra e la sovrapposizione delle rarefazioni (R) di un'onda con le rarefazioni dell'altra. Per il principio di sovrapposizione la forma dell'onda che risulta dalla combinazione delle due onde è uguale alla somma delle forme delle due onde. Di conseguenza, l'ampiezza delle variazioni di pressione nel punto di sovrapposizione è il doppio dell'ampiezza A delle due onde singole: in questo punto il suono è più forte di quello che proviene da uno solo degli altoparlanti. Quando due onde si combinano in modo che una compressione si sovrappone sempre a una compressione e una rarefazione si sovrappone sempre a una rarefazione, si dice che sono **in fase** (o **in concordanza di fase**) e che danno luogo a **interferenza costruttiva**.

Supponiamo di allontanare dal punto di sovrapposizione l'altoparlante di sinistra di mezza lunghezza d'onda (figura 12.28). Nel punto di sovrapposizione una compressione proveniente dall'altoparlante di sinistra incontra una rarefazione proveniente dall'altoparlante di destra e, analogamente, una rarefazione proveniente da sinistra incontra una compressione proveniente da destra. Per il principio di sovrapposizione, l'ampiezza dell'onda che risulta dalla combinazione di queste due onde è nulla: le rarefazioni prodotte da un'onda compensano esattamente le compressioni prodotte dall'altra (*). Il risultato è che *la pressione dell'aria rimane costante*: in quel punto non si sente alcun suono. Quando due onde si combinano in modo che una compressione si sovrappone sempre a una rarefazione, si dice che sono **in opposizione di fase** e che danno luogo a **interferenza distruttiva**.

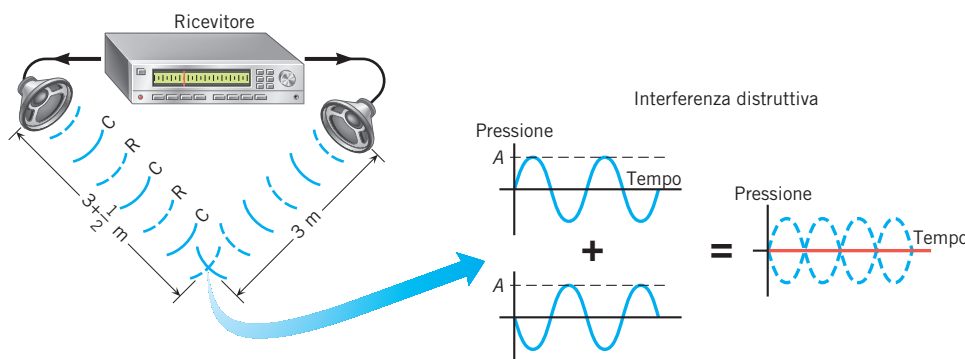


Figura 12.28

Le onde sonore emesse dagli altoparlanti sono in fase. Tuttavia, il fatto che l'altoparlante di sinistra sia a una distanza dal punto di sovrapposizione maggiore di mezza lunghezza d'onda rispetto alla distanza dell'altoparlante di destra produce un fenomeno di interferenza distruttiva tra le due onde (C, compressioni; R, rarefazioni). Pertanto, nel punto di sovrapposizione non si sente alcun suono.

(*) Quando si allontana la cassa acustica di sinistra, l'intensità del suono emesso da questa cassa, e quindi anche l'ampiezza della pressione nel punto di sovrapposizione, diminuiscono leggermente. Per fare in modo che l'ampiezza della pressione delle due onde che si sovrappongono sia uguale, in questo capitolo supporremo che la potenza sonora trasmessa dal ricevitore alla cassa acustica di sinistra sia leggermente superiore a quella trasmessa alla cassa acustica di destra.

Fisica quotidiana

Le cuffie antirumore



L'interferenza distruttiva è alla base di una tecnica molto utile per ridurre l'intensità di un suono o di un rumore indesiderato. Per esempio, la figura 12.29 mostra una coppia di cuffie che limitano i rumori esterni. Dentro le cuffie sono inseriti dei piccoli microfoni che ricevono i suoni (rumori) provenienti dall'esterno. I suoni ricevuti vengono trasformati in segnali che li riproducono esattamente in opposizione di fase. Questi suoni sono inviati agli altoparlanti delle cuffie e producono un fenomeno di interferenza distruttiva con il suono originale: in questo modo il rumore arriva alle orecchie molto attenuato.

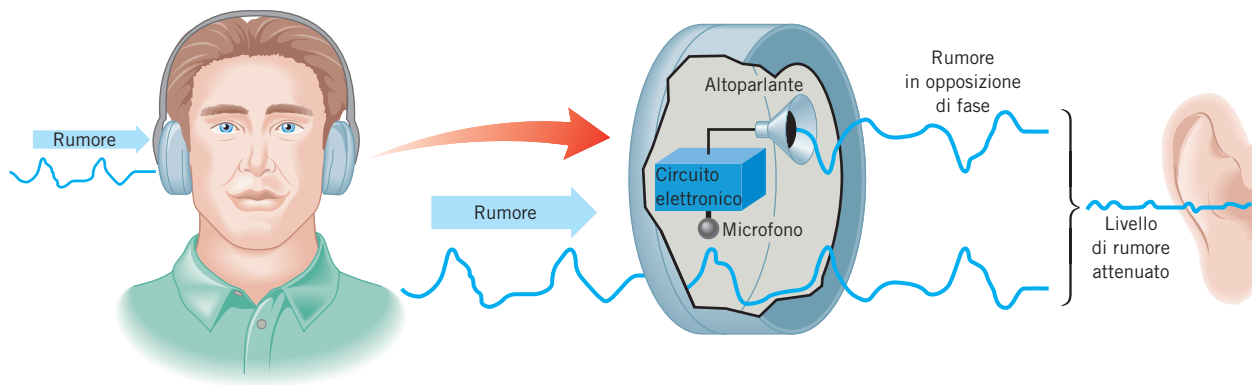


Figura 12.29

Le cuffie antirumore, dette anche cuffie attive, utilizzano il fenomeno dell'interferenza distruttiva.

■ **Condizioni di interferenza**

In generale, non conta il cammino percorso da ciascuna onda, quanto la *differenza* tra i cammini percorsi per arrivare al punto di sovrapposizione.

■ **CONDIZIONI DI INTERFERENZA COSTRUTTIVA**

Quando due sorgenti sonore sono in fase, una differenza di cammino rispetto al punto di sovrapposizione pari a zero oppure a un numero intero (1, 2, 3,...) di lunghezze d'onda produce un fenomeno di **interferenza costruttiva**.

■ **CONDIZIONI DI INTERFERENZA DISTRUTTIVA**

Quando due sorgenti sonore sono in fase, una differenza di cammino rispetto al punto di sovrapposizione pari a mezza lunghezza d'onda o a un numero intero di lunghezze d'onda più mezza lunghezza d'onda

$$\left(\frac{1}{2}, 1 + \frac{1}{2}, 2 + \frac{1}{2}, 3 + \frac{1}{2}, \dots \right)$$

produce un fenomeno di **interferenza distruttiva**.

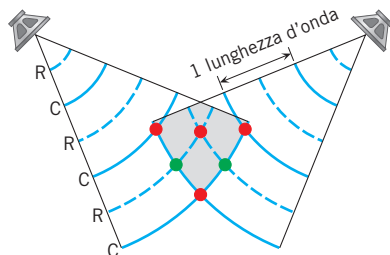


Figura 12.30

Due onde sonore si sovrappongono nella zona ombreggiata. Gli archi a tratto pieno indicano le parti centrali delle regioni di compressione (C) mentre quelli tratteggiati indicano le parti centrali delle regioni di rarefazione (R). In ciascuno dei punti indicati con un pallino rosso (●) si ha interferenza costruttiva, mentre in ciascuno dei punti indicati con un pallino verde (◐) si ha interferenza distruttiva.

L'interferenza costruttiva avviene in tutti i punti in cui si sovrappongono due compressioni o due rarefazioni (quattro di questi punti sono indicati con pallini rossi nella figura 12.30). Un osservatore che si trovasse in uno qualunque di questi punti sentirebbe un suono più intenso di quello emesso da ciascuna delle due sorgenti separatamente. Viceversa, l'interferenza distruttiva avviene in tutti i punti in cui si sovrappongono una compressione e una rarefazione (due di questi punti sono indicati in figura con pallini verdi). Un osservatore che si trovasse in uno qualunque di questi punti non sentirebbe alcun suono.

Nei punti in cui non si ha né interferenza costruttiva né interferenza distruttiva le due onde si combinano dando luogo a suoni di intensità un po' maggiore oppure un po' minore del suono emesso da ciascun altoparlante, a seconda delle distanze del punto dalle due casse. Pertanto è possibile che un osservatore senta suoni di intensità molto variabile attraversando la regione di sovrapposizione delle onde.

Ciascuna delle due onde sonore della figura 12.30 trasporta energia e l'energia complessiva trasportata nella zona in cui le onde si sovrappongono è la somma delle energie trasportate da ciascuna onda. Una delle conseguenze più interessanti del

fenomeno dell'interferenza è che l'energia trasportata dalle onde si conserva, ma viene ridistribuita in modo che ci sono zone in cui il suono è più intenso e zone in cui non c'è più alcun suono.

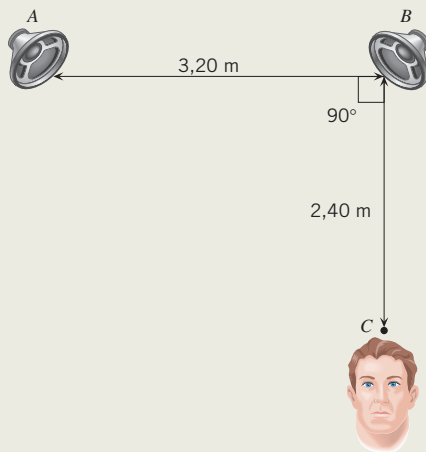
Il fenomeno dell'interferenza riguarda tutti i tipi di onde, non solo le onde sonore. Parleremo di nuovo dell'interferenza nel capitolo 15, quando tratteremo l'interferenza delle onde luminose.

ESEMPIO 6 ■ Condizioni di interferenza

Che cosa sente un ascoltatore?

I due altoparlanti di figura 12.31 emettono in fase due suoni identici di frequenza 214 Hz e velocità 343 m/s.

► L'ascoltatore sente un suono intenso o non sente alcun suono?



Ragionamento e soluzione

Per stabilire quale tipo di interferenza si verifica in C , calcoliamo la differenza $AC - BC$ tra i cammini percorsi dalle due onde per arrivare nel punto C . Poiché ABC è un triangolo rettangolo di cui AC è l'ipotenusa, la distanza AC tra l'altoparlante A e il ricevitore si può calcolare applicando il teorema di Pitagora:

$$AC = \sqrt{(3,20 \text{ m})^2 + (2,40 \text{ m})^2} = 4,00 \text{ m}$$

La distanza BC è indicata dal problema come 2,40 m. Perciò la differenza di cammino tra le due onde è:

$$AC - BC = 4,00 \text{ m} - 2,40 \text{ m} = 1,60 \text{ m}$$

La lunghezza d'onda del suono emesso dai due altoparlanti è:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{214 \text{ Hz}} = 1,60 \text{ m}$$

Poiché la differenza di cammino è pari a una lunghezza d'onda, nel punto C si ha interferenza costruttiva e l'ascoltatore sente un suono intenso.

■ Diffrazione

Quando incontra un ostacolo oppure i bordi di una fenditura, un'onda devia dalla sua direzione di propagazione e prosegue al di là dell'ostacolo o della fenditura. Per esempio, nel superare una porta aperta un'onda sonora si incurva nel modo rappresentato in figura 12.32A. Se ciò non avvenisse, fuori dalla stanza il suono si sentirebbe solo nei punti situati direttamente davanti alla porta, come indica la parte B della figura (supponiamo che l'onda sonora non si propaghi attraverso le pareti della stanza).

Problem solving

Osservazione sulle condizioni di interferenza

Per decidere se le onde sonore emesse da due sorgenti interferiscono costruttivamente o distruttivamente in un punto, occorre calcolare la differenza tra i cammini percorsi dalle due onde per arrivare in quel punto e confrontare il risultato ottenuto con la lunghezza d'onda del suono.

Figura 12.31

Sovrapposizione di due onde sonore con una frequenza di 214 Hz.

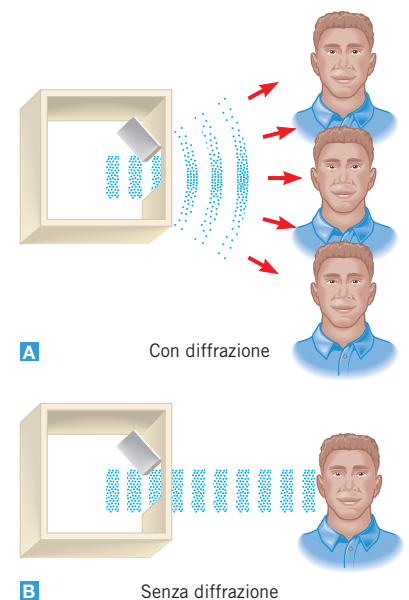


Figura 12.32

A. La curvatura di un'onda sonora attorno ai bordi di una porta è un esempio di diffrazione. La sorgente sonora dentro la stanza non è rappresentata.
B. Se non ci fosse il fenomeno della diffrazione, l'onda sonora non si incurverebbe attraversando la porta.

La deviazione dalla direzione di propagazione di un'onda attorno a un ostacolo o ai bordi di una fenditura è chiamato **diffrazione**. Questo fenomeno riguarda tutti i tipi di onde. Studieremo in maggior dettaglio la diffrazione nel capitolo 15.

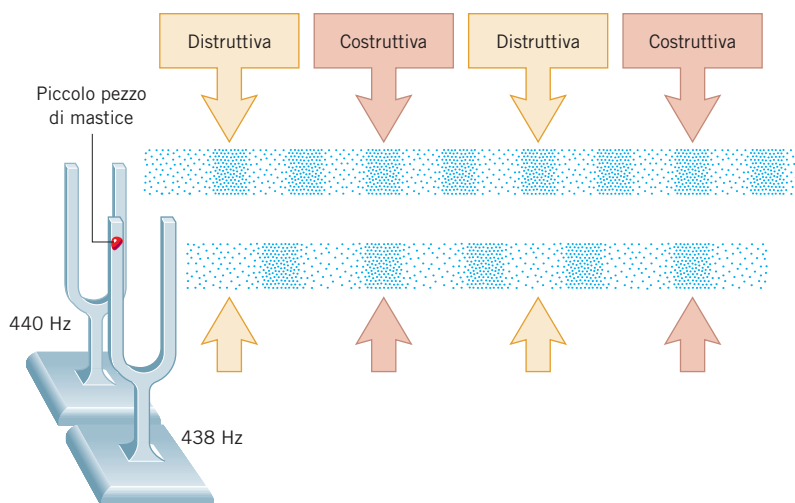
Per il momento ci limitiamo a osservare che la diffrazione è provocata dall'interferenza delle onde e il suo effetto è quello di far arrivare l'energia trasportata dall'onda in regioni che altrimenti non sarebbero accessibili. Naturalmente l'energia complessiva si conserva: la diffrazione provoca solo una sua redistribuzione e non si ha né creazione né distruzione di energia.

12.9 Battimenti

Il diapason è uno strumento costituito da una forcella d'acciaio che emette un suono puro, con una frequenza di 440 Hz, quando viene percosso con un colpo secco. La figura 12.33 mostra le onde sonore emesse da due diapason identici posti uno accanto all'altro. A uno dei due diapason è però stato attaccato un pezzetto di mastice: l'aumento della massa fa diminuire la frequenza del suono emesso da questo diapason a 438 Hz. Quando entrambi i diapason emettono il suono, l'intensità del suono totale aumenta e diminuisce periodicamente: debole, poi forte, poi di nuovo debole e di nuovo forte e così via. Queste variazioni periodiche dell'intensità del suono sono chiamate **battimenti** e sono dovute all'interferenza di due onde sonore con frequenze leggermente diverse.

Figura 12.33

Quando i due diapason con frequenze di vibrazione leggermente diverse (440 Hz e 438 Hz) vengono messi in vibrazione contemporaneamente si verifica il fenomeno dei battimenti. Le onde sonore emesse dai due diapason non sono rappresentate in scala.



Per ragioni di chiarezza nella figura 12.33 le regioni di compressione e di rarefazione delle due onde sonore sono rappresentate separatamente, ma in realtà esse si diffondono nello spazio e si sovrappongono e, come previsto dal principio di sovrapposizione, il suono percepito da un osservatore è la somma dei due suoni. Il suono percepito è forte quando all'orecchio arriva una regione di interferenza costruttiva e debole quando arriva una regione di interferenza distruttiva. Il numero di volte in cui l'intensità del suono passa da forte a debole in un secondo è chiamato **frequenza dei battimenti**.

■ La frequenza dei battimenti

Consideriamo due onde sonore che giungono in un punto fissato, che per semplicità scegliamo nell'origine del sistema di riferimento in modo che sia $x = 0$ m. Le due onde sono rappresentate da equazioni analoghe all'equazione (12.3), dove lo spostamento è espresso mediante la funzione coseno:

$$y_1 = A \cos(2\pi f_1 t) \quad y_2 = A \cos(2\pi f_2 t)$$

Per determinare l'ampiezza dell'onda risultante $y = y_1 + y_2$ applichiamo le formule di prostaferesi:

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t) = A[\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)] = \\ &= 2A \cos\left(\frac{2\pi f_1 t - 2\pi f_2 t}{2}\right) \cos\left(\frac{2\pi f_1 t + 2\pi f_2 t}{2}\right) = \\ &= 2A \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \end{aligned}$$

L'ultima formula descrive l'andamento in funzione del tempo di un'onda in cui:

- la frequenza $(f_1 + f_2)/2$ è la media aritmetica delle frequenze delle due onde;
- l'ampiezza dipende dal tempo secondo la legge:

$$2A \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right)$$

Poiché il volume del suono è nullo quando questo termine si annulla, e ciò avviene due volte ogni ciclo, la frequenza dei battimenti è:

$$2 \left| \frac{f_1 - f_2}{2} \right| = |f_1 - f_2|$$

In altri termini, la frequenza dei battimenti è uguale alla **differenza** tra le frequenze dei due suoni.

Nella situazione rappresentata nella figura 12.33 la frequenza dei battimenti è 2 Hz, (cioè 440 Hz – 438 Hz), quindi un osservatore sente due battimenti al secondo. La figura 12.34 mostra i grafici della pressione dell'onda sonora in un punto fissato in funzione del tempo per un'onda con frequenza di 10 Hz, per un'onda con frequenza di 12 Hz e per l'onda che risulta dalla loro sovrapposizione. Queste due frequenze sono state scelte solo per semplificare la rappresentazione grafica, perché in realtà sono minori del limite di udibilità e quindi un osservatore non sente alcun battimento. Comunque le onde con frequenze minori o maggiori dei limiti di udibilità si comportano esattamente come quelle udibili e quindi la descrizione del fenomeno dei battimenti è la stessa.

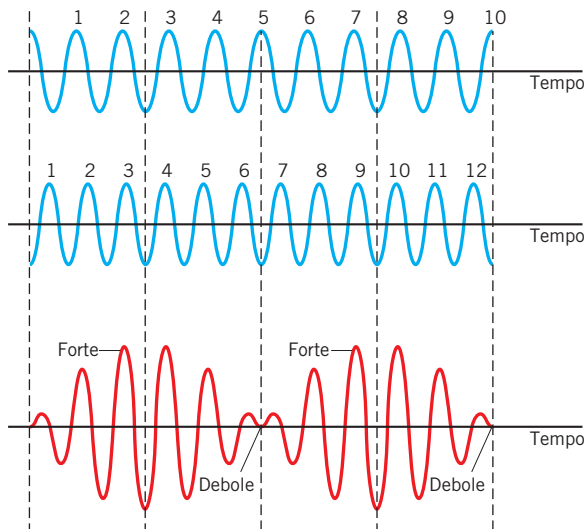


Figura 12.34

La sovrapposizione di due onde sonore con frequenze di 10 Hz e 12 Hz dà origine a un'onda sonora in cui sono presenti battimenti con una frequenza di 2 Hz. I grafici rappresentano come variano nel tempo le pressioni delle onde sonore che si sovrappongono (in blu) e la pressione dell'onda che risulta dalla sovrapposizione (in rosso). L'intervallo di tempo tra due linee verticali tratteggiate è 1 secondo.

I due grafici disegnati in blu rappresentano le variazioni di pressione in un intervallo di tempo di 1 s per le due onde emesse dai due diapason. Il grafico disegnato in rosso rappresenta le variazioni di pressione della somma delle due onde calcolata applicando il principio di sovrapposizione. Osserviamo che l'ampiezza della pressione nel grafico in rosso non è costante, ma varia periodicamente da un valore massimo a un valore minimo. Quando queste variazioni di pressione raggiungono l'orecchio di un osservatore e la loro frequenza appartiene all'intervallo di udibilità, esse producono un suono forte quando l'ampiezza della pressione è massima e un

**Fisica quotidiana**

Accordare uno strumento musicale

suono debole quando l'ampiezza della pressione è minima. Nel grafico in rosso si possono osservare due variazioni da debole a forte, cioè due battimenti in 1 s. Quindi la frequenza dei battimenti è 2 Hz, pari alla differenza delle frequenze delle due onde sonore ($12 \text{ Hz} - 10 \text{ Hz} = 2 \text{ Hz}$).

Il fenomeno dei battimenti è spesso usato dai musicisti per accordare i loro strumenti. Per esempio, per accordare una corda del suo strumento, un chitarrista la pizzica e contemporaneamente fa suonare un diapason o un altro strumento di cui sa che la frequenza è quella corretta e continua a regolare la tensione della corda fino a quando non sente più battimenti. Infatti, se non ci sono battimenti, le frequenze emesse dalla corda e dal diapason sono uguali.

12.10 Onde stazionarie

Un importante fenomeno provocato dall'interferenza è quello delle **onde stazionarie**, che possono essere prodotte sia dalle onde trasversali sia dalle onde sonore longitudinali.

■ Modi normali

La figura 12.35 mostra alcune delle caratteristiche principali delle onde stazionarie trasversali. In questa figura l'estremo sinistro di ciascuna corda viene fatto vibrare avanti e indietro, mentre l'estremo destro è fissato a una parete. Le regioni della corda si muovono così velocemente che le fotografie delle forme della corda sembrano sfuocate. Queste forme sono chiamate **modi normali** delle onde stazionarie trasversali.

Possiamo osservare che in queste forme sono presenti alcuni punti particolari, chiamati **nodi** e **ventri**. I nodi sono i punti in cui non c'è alcuna vibrazione, mentre i ventri sono i punti in cui l'ampiezza della vibrazione è massima. A destra di ciascuna fotografia c'è un grafico che è sovrapponibile alla forma dell'onda e aiuta a visualizzare il moto della corda mentre vibra in uno dei suoi modi normali. I disegni rappresentano «fotografie» delle forme della corda in istanti diversi e mettono in evidenza l'ampiezza massima della vibrazione che si verifica in un ventre con pallini rossi attaccati alla corda.

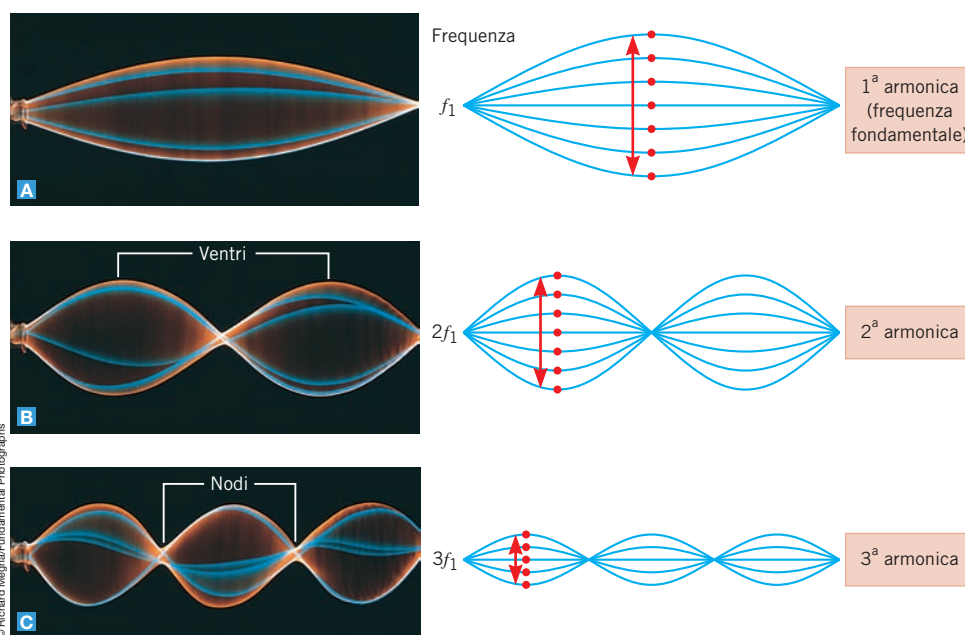


Figura 12.35

Quando una corda fissata ai due estremi vibra a ben precise frequenze, essa diventa sede di onde stazionarie trasversali, come le tre onde mostrate nelle fotografie a sinistra. I disegni a fianco di ciascuna fotografia mostrano le forme assunte dalla corda nei tre casi e i pallini rossi attaccati alla corda mettono in evidenza le ampiezze massime delle vibrazioni che si verificano nei ventri delle onde.


FILM

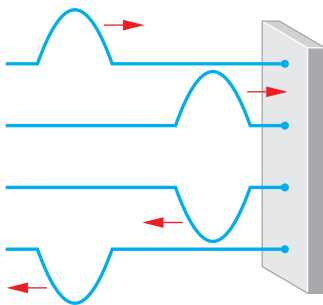
Le armoniche

Ciascuno dei modi normali di un'onda stazionaria si verifica per un valore ben preciso della frequenza della vibrazione. Queste frequenze formano una serie, chiamata **serie armonica**. Come mostra la figura 12.35, la frequenza minore della serie, chiamata **prima armonica** o **frequenza fondamentale** e indicata con f_1 , corrisponde al modo normale in cui la corda ha due nodi e un ventre, mentre le frequenze successive sono multipli interi della frequenza fondamentale ($2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$) e sono chiamate rispettivamente **seconda, terza, quarta, ... armonica**. Il numero dell'armonica (prima, seconda, terza ecc.) corrisponde al numero di ventri nel modo normale dell'onda stazionaria.

■ L'origine delle onde stazionarie su una corda

Le onde stazionarie si formano perché sulla corda si propagano onde identiche che *viaggiano in versi opposti* e si sommano come previsto dal principio di sovrapposizione. Il motivo per cui queste onde sono chiamate *stazionarie* è che non si propagano, né in un verso né nell'altro, come invece fanno le onde che le producono, e al passare del tempo mantengono le loro caratteristiche invariate.

La figura 12.36 spiega il motivo per cui su una corda in cui si formano onde stazionarie ci sono onde che viaggiano in versi opposti. Nel primo grafico dall'alto è rappresentato per semplicità solo mezzo ciclo di un'onda che viaggia verso la parete a destra. Quando questo mezzo ciclo raggiunge la parete, la corda esercita una spinta verso l'alto sulla parete. Di conseguenza, per la terza legge di Newton, la parete esercita una spinta verso il basso sulla corda e in questo modo produce un mezzo ciclo che viaggia sulla corda verso sinistra. In altre parole, l'onda viene riflessa dalla parete. Quando l'onda riflessa arriva al punto di origine, viene riflessa di nuovo, questa volta per effetto della vibrazione impartita alla corda dalla mano. Per vibrazioni di ampiezza piccola la mano rimane praticamente ferma e riflette l'onda come se fosse una parete fissa. Queste continue riflessioni ai due estremi della corda danno origine a un grande numero di cicli che viaggiano in versi opposti sulla corda.


Figura 12.36

Quando il mezzo ciclo d'onda che viaggia verso la parete a destra viene riflesso dalla parete, diventa un mezzo ciclo d'onda che viaggia verso sinistra ed è capovolto.

Quando si forma un nuovo ciclo nell'estremo della corda mantenuto in vibrazione dalla mano, arrivano alla mano i cicli precedenti che erano stati riflessi dalla parete. Tuttavia, se non si riesce a far vibrare la corda con la frequenza corretta, i cicli nuovi e quelli precedenti tendono a cancellarsi a vicenda quando si sovrappongono e non si formano le onde stazionarie. Pensiamo, per esempio, a che cosa succede se stiamo spingendo una persona su un'altalena e diamo ogni spinta nel momento giusto per rinforzare ogni volta l'ampiezza dell'oscillazione dell'altalena. Questo è quello che succede quando le vibrazioni della mano hanno la frequenza giusta e ogni nuovo ciclo provoca la formazione di un'onda stazionaria di grande ampiezza.

Calcoliamo quale deve essere la frequenza delle vibrazioni impartite della mano per ottenere questo risultato. Supponiamo che la lunghezza della corda sia L e che il suo estremo sinistro venga fatto vibrare a una frequenza f_1 . L'intervallo di tempo necessario per produrre un nuovo ciclo è il periodo T dell'onda, dove $T = 1/f_1$. Invece il tempo impiegato da un ciclo per viaggiare dalla mano alla parete e dalla parete alla mano, cioè per percorrere una distanza $2L$, è $2L/v$, dove v è la velocità del-

l'onda. I cicli nuovi rinforzano quelli precedenti quando questi due intervalli di tempo sono uguali, cioè quando $1/f_1 = 2L/v$. Perciò, per generare un'onda stazionaria occorre far vibrare la corda con una frequenza:

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

I continui rinforzi tra i nuovi cicli prodotti dalla mano e i cicli riflessi portano alla formazione di un'onda stazionaria di grande ampiezza sulla corda, anche quando l'ampiezza delle vibrazioni impartite dalla mano è piccola.

■ Frequenze dei modi normali

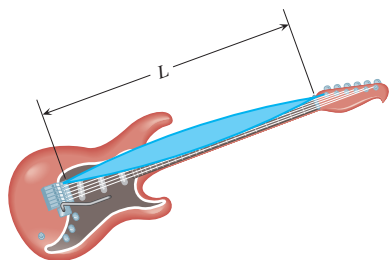
La frequenza minima a cui si deve far vibrare una corda per generare un'onda stazionaria è chiamata **frequenza naturale** della corda. Ogni corda ha però una serie di modi normali, a ciascuno dei quali corrisponde una ben precisa frequenza.

Questa serie è dovuta al fatto che, per generare un'onda stazionaria, non è necessario che ogni nuovo ciclo venga rinforzato da un ciclo che ritorna al punto di origine. Per esempio, si può avere un rinforzo anche un nuovo ciclo sì e uno no, come avviene quando la corda viene fatta vibrare con la frequenza $2f_1$, oppure ogni tre nuovi cicli, come avviene quando la corda viene fatta vibrare con la frequenza $3f_1$. Lo stesso ragionamento vale per qualunque frequenza $f_n = nf_1$, dove n è un numero naturale.

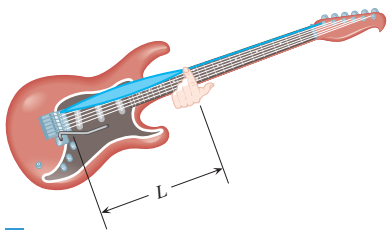
Di conseguenza, la serie di frequenze che danno luogo alla formazione di onde stazionarie in una corda fissata a entrambi i suoi estremi è

$$\text{Corda fissata a entrambi gli estremi} \quad f_n = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (12.12)$$

Le onde stazionarie svolgono un ruolo molto importante nel modo in cui molti strumenti musicali producono i loro suoni. Per esempio, una corda di chitarra è tesa tra due estremi fissi e quando viene pizzicata le sue vibrazioni sono quelle della serie di frequenze date dall'equazione (12.12).



A



B

Figura 12.37

La figura mostra le onde stazionarie (in blu) che si formano su una corda di chitarra in diverse condizioni.

ESEMPIO 7 ■ Onde stazionarie

Suonare una chitarra

Quando è pizzicata, la corda più pesante di una chitarra produce la nota *mi*. Un chitarrista vuole che la corda emetta il *mi* dell'ottava superiore. Per ottenere questo risultato deve premere il tasto giusto prima di pizzicare la corda (figura 12.37B).

► Calcola la distanza L tra il tasto su cui premere la corda e il ponte della chitarra.

Ragionamento e soluzione

La frequenza fondamentale è:

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

Per ottenere l'ottava superiore, cioè una frequenza doppia, con una corda di lunghezza x , deve essere:

$$2 \frac{v}{2L} = \frac{v}{2x}$$

da cui segue:

$$x = \boxed{\frac{L}{2}}$$

Quindi la lunghezza della corda oscillante deve essere $L/2$, cioè la metà della lunghezza totale della corda.

L'ordine di grandezza

A quanti decibel è esposto uno spettatore della prima fila?

Per calcolare a quanti decibel è sottoposto uno spettatore che si trova a 4 metri da un altoparlante, bisogna moltiplicare per 10 il logaritmo in base 10 del rapporto fra l'intensità dell'onda nel punto in cui è lo spettatore e l'intensità minima udibile dall'orecchio umano.



IL MODELLO

(decibel prodotti dall'altoparlante nel punto in cui è lo spettatore) = $10 \left[\log_{10} \left(\frac{\text{intensità dell'onda sonora nel punto in cui è lo spettatore}}{\text{intensità minima udibile dall'orecchio umano}} \right) \right]$

I NUMERI

■ **Intensità dell'onda sonora prodotta dall'altoparlante nel punto in cui è lo spettatore** =

= (potenza sonora totale emessa dall'altoparlante) / (area attraverso la quale si distribuisce il segnale sonoro in corrispondenza del punto occupato dallo spettatore) =
 = $(1 \cdot 10^2 \text{ W}) / (\text{area della semisfera centrata sull'altoparlante e passante per il punto in cui è lo spettatore}) =$
 = $(1 \cdot 10^2 \text{ W}) / [2\pi (4\text{m})^2] = (1 \cdot 10^2 \text{ W}) / (1 \cdot 10^2 \text{ m}^2) =$
 = 1 W/m^2

■ **Intensità minima udibile dall'orecchio umano** =
 = $1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$

IL RISULTATO

Intensità dell'onda sonora =
 = $10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \cdot \log_{10} 10^{12} =$
 = **120 dB**

L'ordine di grandezza è: **10² dB**

Ascoltare la musica a 120 dB può provocare dolore e danni permanenti all'udito.

Un paragone Se gli altoparlanti vicini fossero due invece di uno, come spesso accade, lo spettatore sarebbe esposto all'intensità sonora di soli 3 dB in più. Infatti

$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2 \cdot 1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10} (2 \cdot 10^{12}) \text{ dB} =$
 = $10 (\log_{10} 2 + \log_{10} 10^{12}) \text{ dB} = 10 (0,30 + 12) \text{ dB} =$
 = $(3 + 120) \text{ dB}$

Stima l'ordine di grandezza



Qual è la forza che si esercita sui tuoi timpani quando ascolti l'iPod a tutto volume?

IL MODELLO

(forza esercitata sul timpano) = (pressione dell'onda sonora) (superficie del timpano)

I NUMERI

Pressione dell'onda sonora = (minima pressione acustica udibile) ·

$\cdot 10 \frac{(\text{decibel prodotti dall'iPod a volume massimo})}{20} =$
 = $(2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}) \cdot 10 \frac{115}{20} = 11 \text{ Pa}$

Superficie del timpano = $9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

IL RISULTATO

Forza esercitata dall'iPod = N

Le fonti

Pressione minima rilevabile dall'orecchio umano: Stanford University Center for Computer Research in Music and Acoustics (www-ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/DB_SPL.html)

Decibel prodotti dall'iPod a volume massimo: UAB Health System (www.health.uab.edu/17730/)

Superficie del timpano: *Anatomia del Gray*, Zanichelli

I concetti fondamentali

1. La natura delle onde

Onde trasversali e onde longitudinali

- Un'onda è una perturbazione che si propaga nello spazio trasportando energia ma non materia. In un'onda trasversale la direzione della perturbazione è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. In un'onda longitudinale la direzione della perturbazione è parallela alla direzione di propagazione dell'onda.

2. Onde periodiche

Onda periodica

- Un'onda periodica è una perturbazione formata da cicli che si ripetono uguali a se stessi per tutto il tempo in cui la sorgente della perturbazione continua a produrla.

Ampiezza e lunghezza d'onda

- L'ampiezza dell'onda è lo spostamento massimo di una particella del mezzo in cui si propaga l'onda dalla sua posizione di equilibrio. La lunghezza d'onda λ è la distanza che l'onda percorre mentre compie un ciclo completo ed è uguale alla distanza tra due punti equivalenti successivi, come due creste.

Periodo e frequenza

- Il periodo T è l'intervallo di tempo impiegato per compiere un intero ciclo ed è uguale al tempo impiegato dall'onda per percorrere una distanza uguale a una lunghezza d'onda. La frequenza f (in hertz) è il numero di cicli che avvengono in 1 s ed è uguale all'inverso del periodo (in secondi):

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

Velocità di propagazione

- La velocità di propagazione v di un'onda è legata alla sua lunghezza d'onda e alla sua frequenza dalla relazione:

$$v = f\lambda \quad (12.1)$$

Velocità di un'onda trasversale su una corda

- La velocità di propagazione di un'onda dipende dalle caratteristiche del mezzo in cui si propaga. Per un'onda trasversale che si propaga in una corda la velocità è legata alla tensione T della corda e alla sua massa per unità di lunghezza m/L dalla relazione:

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \quad (12.2)$$

3. La descrizione matematica di un'onda

Equazione di un'onda periodica che si propaga nella direzione x

- L'equazione che descrive un'onda di ampiezza A , frequenza f e lunghezza d'onda λ che si propaga lungo la direzione x è:

$$\text{Onda che si propaga verso } +x \quad y = A \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (12.3)$$

$$\text{Onda che si propaga verso } -x \quad y = A \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (12.4)$$

L'angolo $\left(2\pi ft \pm \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$ è detto fase dell'onda e si deve misurare in radianti.

4. La natura del suono

Onde sonore

- Il suono è formato da onde longitudinali, generate da un oggetto che vibra, che si propagano in un mezzo materiale e non si propagano nel vuoto. Ogni ciclo di un'onda sonora è formato da una compressione e una rarefazione.

Suoni puri e suoni complessi

- Un suono si dice puro quando le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico: la frequenza di oscillazione delle particelle è la frequenza del suono puro. Quando oscillano di moto periodico ma non armonico, il suono si dice complesso: anche in questo caso, si può individuare una frequenza che caratterizza il suono, detta frequenza fondamentale.

Infrasuoni e ultrasuoni	<ul style="list-style-type: none"> Le onde sonore con frequenza minore di 20 Hz sono chiamate infrasuoni, mentre quelle con frequenza maggiore di 20 kHz sono chiamate ultrasuoni.
Suoni alti e suoni bassi	<ul style="list-style-type: none"> Il nostro cervello interpreta le diverse frequenze delle onde che arrivano all'orecchio come suoni di altezza diversa: i suoni alti (o acuti) sono quelli con frequenza maggiore (per esempio, sono acuti i suoni emessi da un ottavino), mentre i suoni bassi (o gravi) sono quelli con frequenza minore (per esempio, sono gravi i suoni emessi da una tuba).
Ampiezza della pressione sonora	<ul style="list-style-type: none"> L'ampiezza della pressione di un'onda sonora è il valore massimo della differenza di pressione tra una regione di compressione e la pressione normale del mezzo in cui l'onda si propaga. Dall'ampiezza della pressione dipende una caratteristica soggettiva del suono che è l'intensità sonora: quanto maggiore è l'ampiezza della pressione, tanto più forte è il suono percepito.

5. L'intensità del suono

Intensità di un suono	<ul style="list-style-type: none"> L'intensità di un suono I è il rapporto tra la potenza sonora media \bar{P} che attraversa perpendicolarmente una superficie e l'area A della superficie:
-----------------------	--

$$I = \frac{\bar{P}}{A} \quad (12.5)$$

L'unità di misura SI dell'intensità del suono è il watt al metro quadrato (W/m^2).

Soglia minima udibile	<ul style="list-style-type: none"> L'intensità minima percepibile da un orecchio umano è chiamata soglia minima udibile e per un suono con una frequenza di 1 kHz vale circa $1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$.
-----------------------	--

Onda sferica uniforme	<ul style="list-style-type: none"> Quando una sorgente emette un'onda sonora che si propaga uniformemente nello spazio e non sono presenti ostacoli che possano riflettere l'onda, l'intensità del suono in un punto è inversamente proporzionale al quadrato della distanza del punto dalla sorgente:
-----------------------	---

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (12.6)$$

Livello di intensità sonora	<ul style="list-style-type: none"> L'intensità con cui percepiamo un suono di intensità I si misura mediante il livello di intensità sonora β, così definito:
-----------------------------	--

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

dove $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ è la minima intensità sonora udibile. Nel Sistema Internazionale il livello di intensità sonora è espresso in decibel (dB).

6. L'effetto Doppler

Effetto Doppler	<ul style="list-style-type: none"> L'effetto Doppler è la variazione di frequenza tra il suono emesso da una sorgente e quello percepito da un osservatore, perché la sorgente o il ricevitore o entrambi si muovono con velocità diverse rispetto al mezzo in cui si propaga l'onda sonora. Se la sorgente e il ricevitore si muovono con velocità rispettivamente v_s e v_r e il mezzo è stazionario, la frequenza f_r del suono percepito dal ricevitore è:
-----------------	--

$$f_r = f_s \frac{1 \pm \frac{v_r}{v}}{1 \mp \frac{v_s}{v}} \quad (12.11)$$

dove f_s è la frequenza del suono emesso dalla sorgente e v è la velocità del suono. Nel numeratore si deve usare il segno più quando il ricevitore si muove verso la sorgente e il segno meno quando il ricevitore si allontana dalla sorgente. Nel denominatore si deve usare il segno meno quando la sorgente si muove verso il ricevitore e il segno più quando la sorgente si allontana dal ricevitore.

7. Il principio di sovrapposizione

Principio di sovrapposizione

- Il principio di sovrapposizione afferma che, quando due o più onde sono presenti contemporaneamente in uno stesso punto, la perturbazione in quel punto è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde.

8. Interferenza e diffrazione di onde sonore

Interferenza costruttiva e interferenza distruttiva

- Quando due onde si combinano in modo che una compressione si sovrapponga sempre esattamente a una compressione e una rarefazione si sovrapponga sempre esattamente a una rarefazione, si dice che sono in fase (o in concordanza di fase) e che danno luogo a interferenza costruttiva.
Quando due onde si combinano in modo che una compressione si sovrapponga sempre esattamente a una rarefazione, si dice che sono in opposizione di fase e che danno luogo a interferenza distruttiva.

Condizioni per l'interferenza costruttiva e distruttiva

- Se la differenza tra i cammini percorsi dalle onde emesse da due sorgenti sonore che vibrano in fase per arrivare al punto in cui si sovrappongono è pari a zero o a un numero intero (1, 2, 3, ...) di lunghezze d'onda si ha il fenomeno di interferenza costruttiva. Una differenza tra i cammini percorsi pari a mezza lunghezza d'onda o a un numero intero di lunghezze d'onda più mezza lunghezza d'onda $\left(\frac{1}{2}, 1 + \frac{1}{2}, 2 + \frac{1}{2}, 3 + \frac{1}{2}, \dots\right)$ produce un fenomeno di interferenza distruttiva.

Diffrazione

- Quando incontra un ostacolo oppure i bordi di una fenditura, un'onda devia dalla sua direzione di propagazione e prosegue al di là dell'ostacolo o della fenditura; questo fenomeno è detto diffrazione.

9. Battimenti

Battimenti

- I battimenti sono variazioni periodiche dell'ampiezza provocate dall'interferenza di due onde con frequenze leggermente diverse. Se le onde sono onde sonore, esse vengono percepite come un suono unico la cui intensità varia con una frequenza uguale alla differenza tra le frequenze delle due onde.

10. Onde stazionarie

Onde stazionarie

- Un'onda stazionaria è il tipo di perturbazione che si verifica quando si sovrappongono due onde che hanno la stessa ampiezza, la stessa frequenza e versi di propagazione opposti.

Nodi e ventri

- I punti di un'onda stazionaria in cui l'ampiezza della vibrazione è nulla si chiamano nodi, mentre quelli in cui l'ampiezza della vibrazione è massima si chiamano ventri.

Serie armonica

- Le onde stazionarie possono formarsi solo quando le frequenze della vibrazione hanno valori ben precisi che fanno parte di una serie chiamata serie armonica. Le frequenze di questa serie ($f_1, 2f_1, 3f_1$ ecc.) sono chiamate armoniche. La frequenza più bassa f_1 è chiamata prima armonica o frequenza fondamentale, la frequenza successiva $2f_1$ è chiamata seconda armonica e così via.

Frequenze della serie armonica per una corda

- Per una corda di lunghezza L fissata a entrambi gli estremi le frequenze della serie armonica sono date da:

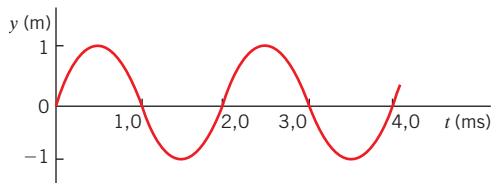
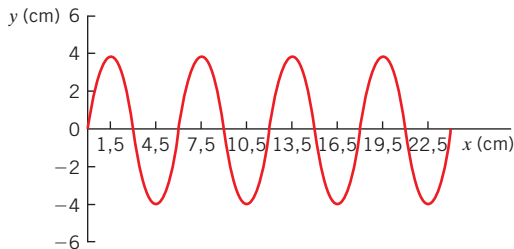
$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (12.12)$$

dove v è la velocità del suono e n è un numero naturale.

Domande

- In una molla elicoidale si propaga un'onda alla velocità di 5 m/s. Questo significa che una spira della molla si muove di 5 m in 1 s?
- Un'onda sonora si propaga in un mezzo. Esistono particelle del mezzo che rimangono sempre in quiete?
- Una sorgente emette in modo uniforme un suono che, senza alcuna riflessione, è in parte intercettato da una superficie piana. L'intensità sonora è la stessa in tutti i punti della superficie?
- Quando un'auto è ferma, il suo clacson emette un suono con una frequenza di 600 Hz. Una persona in mezzo alla strada sente il clacson a una frequenza di 580 Hz. Deve affrettarsi a raggiungere il marciapiede?
- Il principio di sovrapposizione implica che due onde sonore che passano nello stesso istante per lo stesso punto danno sempre luogo a un suono più forte?
- Se la tensione della corda di una chitarra viene raddoppiata, anche la frequenza raddoppia? In caso negativo, di quale fattore cambia? Aumenta o diminuisce?

Test

- Quale fra le seguenti è un'onda longitudinale?
 - Onda sonora nell'aria.
 - Onda luminosa nell'aria.
 - Onda radio nell'aria.
 - Onda sull'acqua.
- La velocità del suono in un dato metallo è $3,00 \cdot 10^3$ m/s. Il grafico mostra l'ampiezza in metri in funzione del tempo in millisecondi di un'onda che viaggia nel metallo. Qual è la sua lunghezza d'onda?
 - 0,5 m
 - 1,5 m
 - 4,0 m
 - 6,0 m
- Un'onda ha una frequenza di 58 Hz e si propaga alla velocità di 31 m/s. Qual è la sua lunghezza d'onda?
 - 0,29 m
 - 0,53 m
 - 1,9 m
 - 3,5 m
- Nella figura seguente è rappresentata un'onda che si muove a 10,0 cm/s. Qual è l'ampiezza dell'onda?
 - 2 cm
 - 4 cm
 - 6 cm
 - 12 cm
- Qual è la frequenza dell'onda rappresentata nel grafico del quesito precedente?
 - 1,7 Hz
 - 1,3 Hz
 - 1,1 Hz
 - 0,9 Hz
- Un'onda si propaga in un mezzo con la legge: $y = (2 \text{ m}) \sin [(\pi \text{ s}^{-1}) t - (\pi \text{ m}^{-1}) x]$. La sua frequenza f e la sua lunghezza d'onda λ sono rispettivamente:
 - $f = \pi$ Hz $\lambda = \pi$ m
 - $f = \pi$ Hz $\lambda = 1/\pi$ m
 - $f = 0,5$ Hz $\lambda = 2$ m
 - $f = 2$ Hz $\lambda = 0,5$ m
- Un campanello elettrico è posto sotto una campana di vetro. Mentre sta suonando, l'aria viene tolta lentamente dalla campana. Che cosa sente un ascoltatore?
 - L'intensità del suono rimane costante.
 - L'intensità del suono diminuisce progressivamente.
 - La frequenza del suono aumenta progressivamente.
 - La frequenza del suono diminuisce progressivamente.
- Un suono si dice puro quando:
 - è emesso da uno strumento musicale.
 - le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico.
 - le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto periodico.
 - le particelle investite dall'onda sonora si muovono in modo uniforme.
- L'intensità di un'onda sferica a 4,0 m dalla sorgente è 120 W/m^2 . Qual è l'intensità a 9 m dalla sorgente?
 - 11 W/m^2
 - 24 W/m^2
 - 53 W/m^2
 - 80 W/m^2

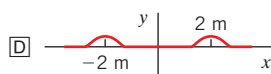
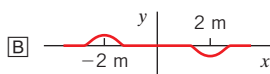
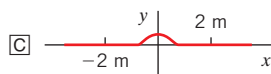
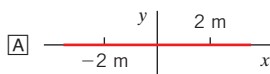
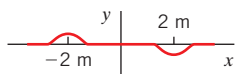
10 Un treno transita in una stazione a velocità costante. Sul treno un flautista emette un *la* a 440 Hz. Quando il treno si allontana, il suono emesso viene percepito dal capostazione come *sol* a 392 Hz. Qual è la velocità del treno?

- A) 7,3 m/s
- B) 12 m/s
- C) 26 m/s
- D) 42 m/s

11 Un automobilista si avvicina a 35 m/s a un segnale acustico di 220 Hz. Con quale frequenza lo percepisce? (Velocità del suono: 343 m/s.)

- A) 198 Hz
- B) 220 Hz
- C) 242 Hz
- D) 282 Hz

12 Due impulsi della stessa ampiezza viaggiano su una corda l'uno verso l'altro a 1,0 m/s. La figura mostra la loro posizione all'istante $t = 0$ s. Qual è la forma della corda all'istante $t = 2,0$ s?



13 Un ascoltatore dista 19 m da una cassa acustica e 15 m dall'altra. Le due casse emettono in fase lo stesso suono puro di frequenza f . La velocità del suono è 344 m/s. Qual è il più piccolo valore di f per il quale l'ascoltatore percepisce l'intensità maggiore?

- A) L'intensità non dipende da f .
- B) Non si può stabilire perché non è nota l'ampiezza.
- C) $f = 43$ Hz
- D) $f = 86$ Hz

14 Il fenomeno dei battimenti è dovuto alla:

- A) sovrapposizione di onde che viaggiano con velocità leggermente diverse.
- B) sovrapposizione di onde che viaggiano in versi opposti.
- C) sovrapposizione di onde che hanno ampiezze leggermente diverse.
- D) sovrapposizione di onde che hanno frequenze leggermente diverse.

15 Su una corda si formano onde stazionarie per effetto della:

- A) sovrapposizione di onde identiche che viaggiano con velocità diverse.
- B) sovrapposizione di onde identiche che viaggiano in versi opposti.
- C) sovrapposizione di onde che hanno stessa velocità ma ampiezze diverse.
- D) sovrapposizione di onde che hanno diversa velocità ma stessa ampiezza.

Problemi

1. La natura delle onde ■ 2. Onde periodiche

1 La luce è un'onda elettromagnetica che viaggia a una velocità di $3,00 \cdot 10^8$ m/s. La frequenza luminosa a cui l'occhio umano è più sensibile è quella della luce giallo-verde, che ha una lunghezza d'onda di $5,45 \cdot 10^{-7}$ m.

► Qual è la frequenza di questa onda luminosa?

2 Una persona su una barca ferma nel mare osserva che, dopo il passaggio della cresta di un'onda, passano altre 5 creste in 50 secondi. La distanza fra due creste successive è 32 m.

► Determina, se possibile, il periodo, la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità e l'ampiezza dell'onda.

3 Un'onda longitudinale che ha una frequenza di 3,0 Hz impiega 1,7 s per attraversare una molla lunga 2,5 m.

► Determina la sua lunghezza d'onda.

4 Supponi che la mano che fa muovere su e giù l'estremo di una molla faccia compiere all'estremo due oscillazioni complete in 1 s e che la velocità di propagazione dell'

onda così generata sia di 0,50 m/s.

► Calcola la distanza tra due creste adiacenti dell'onda.

5 The speed of a transverse wave on a string is 450 m/s, and the wavelength is 0.18 m. The amplitude of the wave is 2.0 mm.

► How much time is required for a particle of the string to move through a total distance of 1.0 km?

6 Una corda ha una massa di $5,0 \cdot 10^{-3}$ kg ed è sottoposta a una tensione di 180 N. Un'onda trasversale che si propaga lungo questa corda ha una frequenza di 260 Hz e una lunghezza d'onda di 0,60 m.

► Qual è la lunghezza della corda?

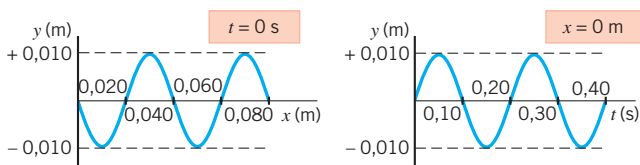
7 Una persona che fa sci d'acqua viaggia a una velocità di 12,0 m/s. Quando viaggia nella stessa direzione e nello stesso verso di un'onda, viene sollevata dalle creste dell'onda una volta ogni 0,600 s. Quando viaggia nella stessa direzione ma in verso opposto viene sollevata dalle creste dell'onda una volta ogni 0,500 s. La sua velocità è maggiore di quella dell'onda.

► Calcola la velocità e la lunghezza d'onda dell'onda.

- 8** Un'onda trasversale si propaga con una velocità di 300 m/s su una corda orizzontale.
- ▶ Se la tensione della corda viene aumentata di quattro volte, quale diventa la velocità di propagazione dell'onda?
- 9** Due fili metallici entrambi di lunghezza uguale a 50,0 m e con la stessa densità lineare di 0,020 kg/m sono paralleli tra loro e disposti uno sopra l'altro. La tensione nel filo *A* è pari a $6,00 \cdot 10^2$ N, mentre quella nel filo *B* è pari a $3,00 \cdot 10^2$ N. Due impulsi trasversali sono generati contemporaneamente all'estremo sinistro del filo *A* e all'estremo destro del filo *B*.
- ▶ Quanto tempo trascorre prima che i due impulsi passino uno sopra l'altro?
- 10** Per misurare l'accelerazione di gravità su un pianeta lontano un astronauta appende una sfera con una massa di 0,55 kg a un capo di un filo metallico lungo 0,95 m la cui densità lineare è di $1,2 \cdot 10^{-4}$ kg/m. L'astronauta misura il tempo impiegato da un impulso trasversale a propagarsi lungo il filo e ottiene un valore di 0,016 s. La massa del filo è trascurabile rispetto a quella della palla.
- ▶ Qual è l'accelerazione di gravità su quel pianeta?

3. La descrizione matematica di un'onda

- 11** Lo spostamento in metri di un'onda è:
- $$y = 0,26 \text{ m sen} [(\pi \text{ s}^{-1}) t - (3,7 \pi \text{ m}^{-1}) x].$$
- dove *t* è in secondi e *x* in metri.
- ▶ Qual è il verso di propagazione dell'onda?
 - ▶ Qual è lo spostamento quando $t = 38$ s e $x = 13$ m?
- 12** Un'onda si propaga nel verso positivo delle *x* e ha ampiezza di 0,35 m, velocità 5,2 m/s e frequenza 14 Hz.
- ▶ Scrivi l'espressione matematica dell'onda.
- 13** I due grafici sono relativi a un'onda che si propaga nella direzione $+x$.
- ▶ Scrivi l'espressione matematica dell'onda.

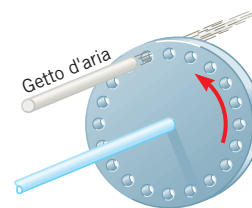


- 14** Un'onda trasversale si propaga su una corda. Lo spostamento *y* delle particelle della corda dalla posizione di equilibrio è dato dalla legge:
- $$y = (0,021 \text{ m}) \text{ sen} [(25 \text{ s}^{-1}) t - (2,0 \text{ m}^{-1}) x].$$
- L'angolo di fase $[(25 \text{ s}^{-1}) t - (2,0 \text{ m}^{-1}) x]$ è in radianti, *t* in secondi e *x* in metri. La densità lineare della corda è $1,6 \cdot 10^{-2}$ kg/m.
- ▶ Calcola la tensione della corda.

4. La natura del suono

5. L'intensità del suono

- 15** La distanza fra un altoparlante e l'orecchio sinistro di un ascoltatore è 2,70 m. Nell'aria della stanza il suono si propaga a 343 m/s e ha una frequenza di 523 Hz.
- ▶ Calcola il tempo che il suono impiega a raggiungere l'ascoltatore.
 - ▶ Calcola il numero di lunghezze d'onda presenti fra l'altoparlante e l'ascoltatore.
- 16** Come mostra la figura, si può ottenere una sirena soffiando un getto d'aria attraverso 20 fori praticati alla stessa distanza tra loro sul bordo di un disco rotante. Il tempo impiegato da ciascun foro per passare davanti al getto d'aria è il periodo del suono emesso dalla sirena.
- ▶ Se si vuole che questo suono abbia una frequenza di 2200 Hz, quale deve essere la velocità angolare ω (in rad/s) del disco rotante?



- 17** Un terremoto genera due tipi di onde sismiche che si propagano attraverso il globo terrestre: le onde primarie, o onde *P*, sono onde longitudinali che si propagano più velocemente delle onde secondarie, o onde *S*, che sono invece onde trasversali. Le onde *P* hanno una velocità di circa 8,0 km/s, mentre le onde *S* hanno una velocità di circa 4,5 km/s. Un sismografo che si trova a una certa distanza dall'ipocentro di un terremoto (cioè dal punto di origine delle onde) registra l'arrivo delle onde *P* e dopo 78 s l'arrivo delle onde *S*.
- ▶ Supponendo che le onde sismiche si propagano in linea retta, qual è la distanza tra il sismografo e l'ipocentro del terremoto?
- 18** La superficie media dell'orecchio di un adulto è di $2,1 \cdot 10^{-3}$ m². L'intensità del suono che giunge all'orecchio durante una conversazione normale è di circa $3,2 \cdot 10^{-6}$ W/m².
- ▶ Calcola la potenza sonora che giunge sull'orecchio quando il suono arriva in direzione perpendicolare a esso.
- 19** Alla distanza di 3,8 m, l'intensità del suono emesso da una sirena è $3,6 \cdot 10^{-2}$ W/m². Il suono si propaga uniformemente in tutte le direzioni.
- ▶ Calcola la potenza sonora totale emessa dalla sirena.
- 20** Supponi che un suono venga emesso uniformemente in tutte le direzioni da un altoparlante. L'intensità del suono in un punto distante 22 m dall'altoparlante è pari a $3,0 \cdot 10^{-4}$ W/m².
- ▶ Qual è l'intensità del suono in un punto a una distanza di 78 m dall'altoparlante?

21 La terapia con ultrasuoni viene spesso impiegata per accelerare la guarigione di un tendine lesionato. Il principio di funzionamento si basa sull'energia che gli ultrasuoni cedono ai tessuti che attraversano e che viene convertita in calore. Gli ultrasuoni escono da un foro circolare con il raggio di 1,8 cm e sono emessi da un generatore che produce un'intensità sonora pari a $5,9 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$.

► Quanto tempo impiega il generatore per emettere 4800 J di energia sonora?

22 In uno studio di registrazione il livello sonoro è 44 dB più basso dell'esterno. Un mattino l'intensità sonora nello studio è $1,20 \cdot 10^{-10} \text{ W/m}^2$.

► Calcola l'intensità sonora esterna.

23 Un apparecchio acustico aumenta l'intensità sonora di 30 dB.

► Calcola di quale fattore aumenta l'intensità sonora.

24 Quando una persona è esposta per 9,0 ore a un livello di intensità sonora di 90,0 dB riporta seri danni acustici. L'area di un timpano è $9,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$.

► Calcola quanta energia sonora incide sul timpano durante quell'intervallo di tempo.

6. L'effetto Doppler

25 L'antifurto di un'automobile parcheggiata emette un suono di frequenza pari a 960 Hz. La velocità del suono è di 343 m/s. Avvicinandoti, rilevi che la frequenza è cambiata di 95 Hz.

► Qual è la tua velocità?

26 Mentre stai andando in bicicletta ti allontani da una sorgente sonora e la frequenza del suono che senti è minore dell'1% rispetto alla frequenza del suono emesso dalla sorgente.

► A quale velocità stai viaggiando?

27 Sei fermo a un semaforo e un'ambulanza si avvicina a 18 m/s. La sirena dell'ambulanza emette un suono con frequenza pari a 995 Hz. La velocità del suono nell'aria è 343 m/s.

► Qual è la lunghezza d'onda del suono che senti?

28 Il pilota di un aereo ultraleggero sta volando a 39 m/s. Un'aquila vola verso l'aereo a 18 m/s. Le velocità sono riferite al terreno. L'aquila emette un fischio a 340 Hz.

► Calcola la frequenza rilevata dal pilota.

29 Una portaerei viaggia a una velocità di 13,0 m/s rispetto all'acqua. Un aereo viene catapultato dal ponte di lancio della portaerei e ha una velocità di 67,0 m/s rispetto all'acqua. I suoi motori producono un suono di frequenza pari a 1550 Hz e la velocità del suono nell'aria è di 343 m/s.

► Qual è la frequenza del suono percepito dall'equipaggio della portaerei?

30 Due sottomarini si muovono uno verso l'altro viaggiando sott'acqua. La velocità del sottomarino A è 12 m/s,

mentre quella del sottomarino B è 8 m/s. Il sottomarino A emette un'onda sonora con una frequenza di 1550 Hz e una velocità di 1552 m/s.

► Qual è la frequenza dell'onda rilevata dal sottomarino B?

Una parte dell'onda emessa dal sottomarino A viene riflessa dal sottomarino B e ritorna al sottomarino A.

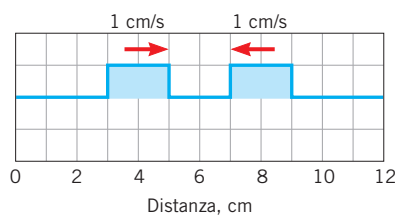
► Qual è la frequenza dell'onda riflessa rilevata dal sottomarino A?

7. Il principio di sovrapposizione

8. Interferenza e diffrazione di onde sonore

31 Il grafico rappresenta una corda su cui si propagano due impulsi, diretti l'uno verso l'altro, che viaggiano con una velocità di modulo costante uguale a 1 cm/s nell'istante $t = 0 \text{ s}$.

► Usando il principio di sovrapposizione disegna la forma degli impulsi negli istanti $t = 1 \text{ s}$, $t = 2 \text{ s}$, $t = 3 \text{ s}$ e $t = 4 \text{ s}$.



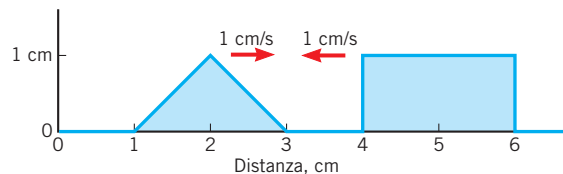
32 Due altoparlanti posti uno dietro l'altro emettono due onde sonore identiche con frequenza 245 Hz.

► Qual è la distanza minima a cui devono trovarsi i due altoparlanti perché un ascoltatore posto davanti a essi percepisca un'interferenza distruttiva? La velocità del suono è 343 m/s.

33 Due impulsi viaggiano l'uno verso l'altro con la stessa velocità di modulo 1 cm/s. La figura rappresenta le loro posizioni nell'istante $t = 0 \text{ s}$. Quando $t = 1 \text{ s}$, qual è l'ampiezza dell'impulso risultante in corrispondenza di:

► $x = 3 \text{ cm}$

► $x = 4 \text{ cm}$?



34 Supponi che la distanza tra i due altoparlanti A e B della figura 12.31 sia di 5,00 m e che gli altoparlanti siano in fase. Essi emettono due suoni identici con una frequenza di 125 Hz e la velocità del suono è 343 m/s.

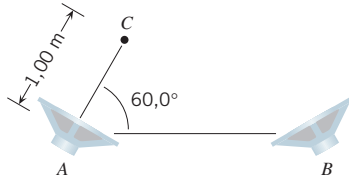
► Qual è la massima distanza possibile tra l'altoparlante B e l'ascoltatore C perché l'ascoltatore C rilevi un'interferenza distruttiva?

35 Supponi che la distanza tra i due altoparlanti A e B della figura 12.31 sia di 2,50 m. Gli altoparlanti oscillano a 429 Hz ma in opposizione di fase. La velocità del suono è 343 m/s.

► L'osservatore C rileva un'interferenza costruttiva o distruttiva quando la sua distanza dall'altoparlante B è 1,15 m e 2,00 m?

36 La figura mostra due altoparlanti e un ascoltatore C . Gli altoparlanti emettono in fase un suono di 68,6 Hz. La velocità del suono è 343 m/s.

► Calcola la minima distanza da A alla quale deve essere posto B perché l'ascoltatore non oda alcun suono.



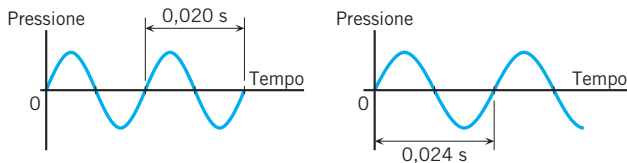
37 Gli altoparlanti A e B emettono in concordanza di fase un segnale a 73,0 Hz. Essi sono orientati uno verso l'altro e distano 7,80 m. La velocità del suono è 343 m/s. Nel segmento che li congiunge esistono tre punti in cui si ha interferenza costruttiva.

► Calcola le distanze di questi punti da A .

9. Battimenti ■ 10. Onde stazionarie

38 Due suoni puri sono emessi contemporaneamente. I grafici mostrano la variazione della pressione di ciascuno di essi in funzione del tempo.

► Qual è la frequenza dei battimenti?



39 Due pianoforti emettono la stessa nota ma non sono accordati. Uno emette un suono di lunghezza d'onda 0,769 m e l'altro di 0,776 m. La velocità del suono è pari a 343 m/s.

► Calcola il periodo dei battimenti.

40 La corda di una chitarra deve essere accordata. Suonando contemporaneamente la corda e un diapason a 440 Hz si odono battimenti di frequenza 3 Hz. Aumentando la tensione della corda, la sua frequenza aumenta e la frequenza dei battimenti diminuisce.

► Qual era la frequenza originaria della corda?

41 In un violoncello la corda che ha la densità lineare maggiore ($1,56 \cdot 10^{-2}$ kg/m) è quella del *do*. Questa corda produce una frequenza fondamentale di 65,4 Hz e la lunghezza del tratto di corda compreso tra i due estremi fissi è 0,800 m.

► Calcola la tensione della corda.

42 Una corda lunga 0,28 m è fissata a entrambi gli estremi. La corda viene pizzicata e su di essa si forma un'onda

stazionaria che vibra alla frequenza della seconda armonica. Le onde si muovono sulla corda a una velocità di 140 m/s.

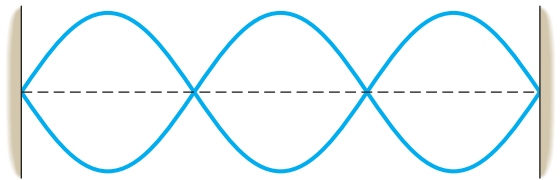
► Qual è la frequenza della seconda armonica?

43 La frequenza fondamentale di una corda fissata agli estremi è 256 Hz.

► Quanto tempo impiega un'onda a percorrere la corda?

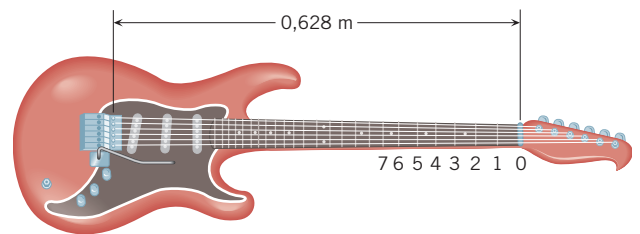
44 Una corda ha densità lineare di $8,5 \cdot 10^{-3}$ kg/m ed è sottoposta a una tensione di 280 N. La corda è lunga 1,8 m, è fissata agli estremi e oscilla come mostrato in figura.

► Determina la velocità, la lunghezza d'onda e la frequenza delle onde che formano l'onda stazionaria.



45 Come mostra la figura, la lunghezza di una corda di una chitarra è 0,628 m. Per semplicità i tasti sono numerati. Un chitarrista può suonare tutte le note della scala su una sola corda perché le distanze *tra un tasto e l'altro* sono state progettate secondo la seguente regola: quando la corda viene premuta contro un tasto qualunque di numero i , la sua frequenza fondamentale di vibrazione è maggiore di un fattore pari alla radice dodicesima di 2 ($\sqrt[12]{2}$) rispetto alla frequenza fondamentale di vibrazione che ha quando viene premuta contro il tasto numero $i - 1$.

► Supponendo che la tensione della corda rimanga uguale per tutte le note, calcola la distanza tra la barretta 1 e la barretta 0 e tra la barretta 7 e la barretta 6.



PROBLEMI FINALI

46 La densità lineare della corda del *la* di un violino è $7,8 \cdot 10^{-4}$ kg/m. Un'onda sulla corda ha una frequenza di 440 Hz e una lunghezza d'onda di 65 cm.

► Calcola la tensione della corda.

47 I 15 vagoni di un treno merci passano a velocità costante davanti ad un incrocio in 12,0 s. Ciascun vagone è lungo 14,0 m.

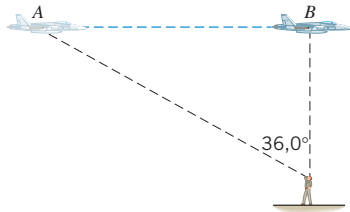
► Qual è la frequenza con cui passano i vagoni? Qual è la velocità del treno?

48 Riprendi in considerazione i grafici del problema 13.

* ► Calcola la velocità dell'onda.

49 Un aereo vola in direzione orizzontale, come mostra la figura. Quando arriva nel punto *B* che si trova sulla verticale di un osservatore a terra, l'osservatore sente il rumore prodotto dall'aereo quando si trovava nel punto *A*. La velocità del suono è 343 m/s.

► Se la velocità dell'aereo nel punto *A* è 164 m/s, qual è la sua velocità nel punto *B*, supponendo che l'aereo viaggi con accelerazione costante?



50 The average sound intensity inside a busy neighborhood restaurant is $3.2 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$.

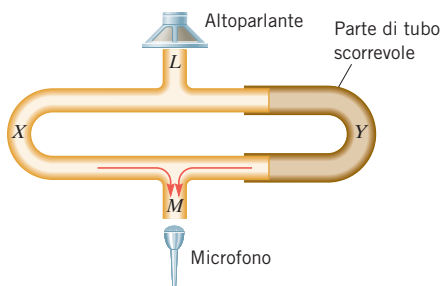
* ► How much energy goes into each ear (area = $2.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$) during a one-hour meal?

51 Mentre vola, un cardellino emette un richiamo di frequenza 1250 Hz. Una naturalista registra il richiamo, che risulta essere di 1290 Hz.

* ► Qual è la velocità con cui volava il cardellino? Esprimila in percentuale della velocità del suono.

52 Il suono prodotto dall'altoparlante rappresentato in figura ha una frequenza di 12000 Hz e arriva al microfono seguendo due cammini diversi: viaggia lungo il tubo di sinistra *LXM*, che ha una lunghezza fissa, e contemporaneamente viaggia lungo il tubo di destra *LYM*, la cui lunghezza può essere cambiata muovendo la parte di tubo scorrevole. Le onde sonore che seguono i due cammini interferiscono nel punto *M*. Quando la lunghezza del cammino *LYM* cambia, cambia anche l'intensità del suono che arriva nel punto *M*. Quando il tubo di destra viene tirato verso l'esterno di 0,020 m, l'intensità passa da un valore massimo a un valore minimo.

► Trova la velocità a cui si propaga il suono nel gas contenuto nel tubo.



53 Due altoparlanti che vibrano in fase sono disposti nello stesso modo indicato nella figura 12.31 e anche l'ascoltatore *C* si trova alla stessa distanza da essi. La velocità

del suono è 343 m/s. Gli altoparlanti emettono due suoni identici con la stessa frequenza.

► Qual è la frequenza minima perché l'ascoltatore *C* oda un'interferenza distruttiva?

54 Una corda del *la* di un contrabbasso è accordata per vibrare a una frequenza fondamentale di 55,0 Hz.

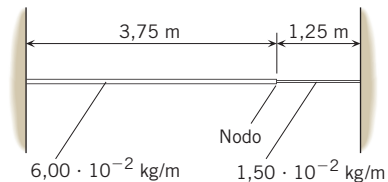
► Se la tensione della corda fosse aumentata di quattro volte, quale sarebbe la sua frequenza fondamentale di vibrazione?

55 Due ultrasuoni si combinano e danno luogo a battimenti che sono udibili dall'uomo (frequenza compresa fra 20 Hz e 20000 Hz). La frequenza di uno di essi è 70 kHz.

* ► Calcola la frequenza minore e la frequenza maggiore che può avere l'altro ultrasuono.

56 Le due corde rappresentate in figura hanno lunghezze e densità lineari diverse. Sono unite tra loro e tese in modo che la tensione in ciascuna di esse sia di 190,0 N. I due capi delle corde che non sono uniti tra loro sono fissati a due pareti.

► Calcola la frequenza minima di vibrazione per la quale nelle due corde si formano onde stazionarie con un nodo nel punto di congiunzione.



QUESITI

- 1 Illustra il fenomeno delle onde stazionarie e definisci i modi normali di oscillazione.
- 2 Descrivi e analizza il fenomeno dei battimenti.
- 3 Descrivi e analizza l'effetto Doppler quando la sorgente è ferma e il ricevitore in moto e viceversa. Confronta le frequenze registrate dal ricevitore.
- 4 Descrivi il fenomeno dell'interferenza e spiega quando si realizzano l'interferenza costruttiva e quella distruttiva.
- 5 Spiega che cos'è un'onda sonora e come è possibile generarla.

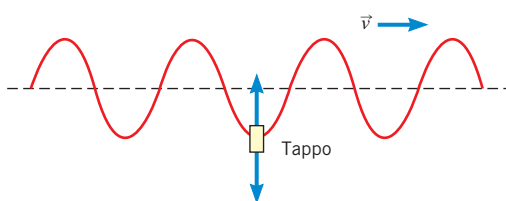
OLIMPIADI DELLA FISICA

- 1 L'equazione di un'onda armonica è:

$$y = Y_0 \text{sen} [k(x - vt)]$$
 Se $Y_0 = 3 \text{ m}$, $k = 3\pi \text{ m}^{-1}$ e $v = 8 \text{ ms}^{-1}$, qual è la frequenza dell'onda?
 A 3,0 Hz
 B 7,2 Hz
 C 8,0 Hz
 D 12 Hz
 E 24 Hz
 (Gara di 1° livello edizione 2007)

- 2** Una sorgente di onde acustiche di frequenza costante e un osservatore si muovono l'uno rispetto all'altra. La frequenza dell'onda misurata dall'osservatore cresce uniformemente col tempo. Questo accade perché rispetto a un certo sistema di riferimento:
- A l'osservatore si muove a velocità costante verso la sorgente che è ferma.
 - B la sorgente si allontana a velocità costante dall'osservatore che è fermo.
 - C l'osservatore si muove di moto uniformemente accelerato verso la sorgente ferma.
 - D la sorgente si allontana di moto uniformemente accelerato dall'osservatore fermo.
 - E l'osservatore percorre, a velocità costante, una circonferenza nel cui centro sta la sorgente.
- (Gara di 1° livello edizione 2007)

- 3** Il disegno schematizza un'onda d'acqua che si propaga alla velocità di 1 ms^{-1} e mette in moto un tappo che compie 8 oscillazioni in 4 s.

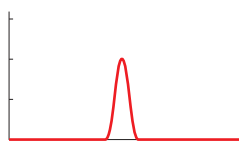


Qual è la lunghezza d'onda?

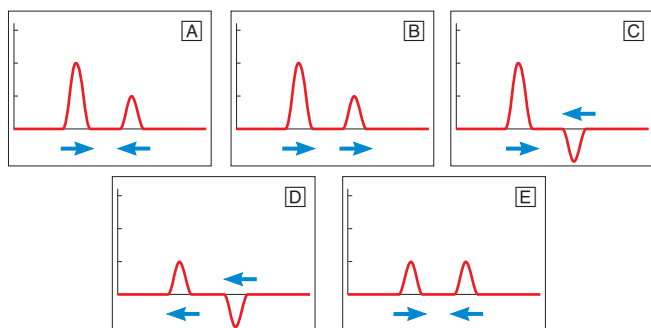
- A 0,25 m
- B 0,5 m
- C 1 m
- D 2 m
- E 4 m

(Gara di 1° livello edizione 2006)

- 4** In un determinato mezzo si propagano, nella stessa direzione, due impulsi che a un certo punto si sovrappongono. In quell'istante si ottiene l'impulso mostrato in figura, dovuto alla loro sovrapposizione.

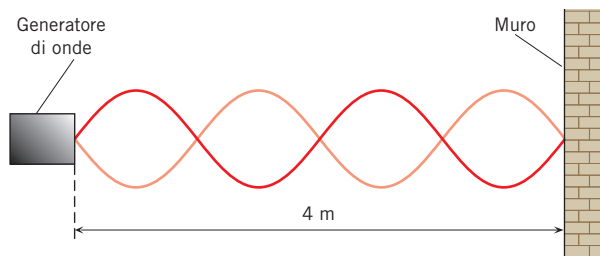


Fra i seguenti, quali possono essere gli impulsi iniziali?



(Gara di 1° livello edizione 2005)

- 5** Un generatore di onde, collocato a 4 metri di distanza da un muro riflettente, produce onde stazionarie in un nastro, come mostrato nel disegno sotto.

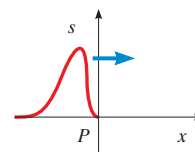


Se la velocità dell'onda vale 10 ms^{-1} , qual è la sua frequenza?

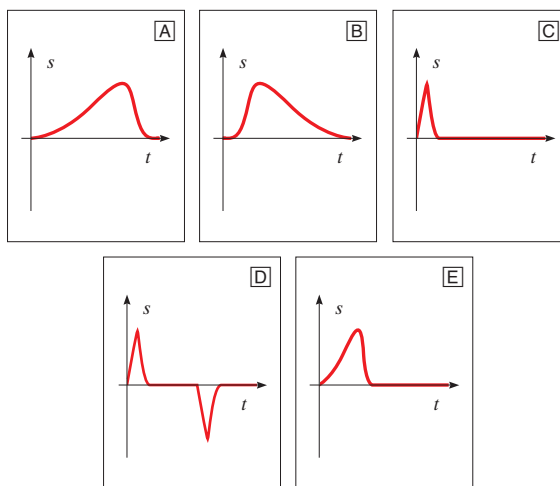
- A 0,4 Hz
- B 4 Hz
- C 5 Hz
- D 10 Hz
- E 40 Hz

(Gara di 1° livello edizione 2004)

- 6** Il grafico in figura riporta lo spostamento dalla loro posizione di equilibrio di particelle che, a un certo istante, risentono dell'effetto di un'onda che viaggia lungo l'asse x . P è un punto lungo il percorso fatto dall'onda.

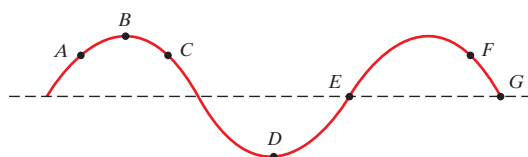


Quale dei grafici seguenti rappresenta meglio lo spostamento in funzione del tempo di una particella che si trova nel punto P ?



(Gara di 1° livello edizione 2004)

- 7** Il seguente diagramma mostra un'onda periodica.



Quale delle seguenti rappresenta una coppia di punti in fase?

- A A e C
- B B e D
- C C ed F
- D E e G
- E A ed F

(Gara di 1° livello edizione 2004)

TEST DI AMMISSIONE ALL'UNIVERSITÀ

1 Due corde dello stesso materiale e con diverso diametro, una grossa e una sottile, sono collegate tra loro. Un'onda viaggia sulla corda grossa e raggiunge la connessione con la corda sottile. Quale delle seguenti grandezze cambia alla connessione tra le due corde?

- A Frequenza.
- B Periodo.
- C Nessuna.
- D Velocità di propagazione.

(Concorso a borse di studio per l'iscrizione ai corsi di laurea della classe «Scienze e Tecnologie Fisiche» della SIF, 2006-2007)

2 Il suono è legato all'emissione, propagazione, ricezione e percezione di onde. Quale delle seguenti affermazioni è corretta?

- A Si tratta di onde elettromagnetiche.
- B Se la frequenza è di 100 000 Hz, l'orecchio umano percepisce l'onda come suono.
- C Se la frequenza è di 1 Hz, l'orecchio umano percepisce l'onda come suono.
- D Se la frequenza è di 3000 Hz, l'orecchio umano percepisce l'onda come suono.
- E Il suono si propaga in qualunque mezzo, compreso il vuoto assoluto.

(Prova di ammissione al corso di laurea in Odontoiatria e Protesi dentaria, 1999-2000)

3 Il suono è un'onda che si propaga:

- A nel vuoto con velocità di 340 m/s.
- B nel vuoto con frequenza uguale a 20 Hz.
- C in un mezzo elastico con velocità che dipende dal mezzo.
- D nel vuoto con velocità di $3 \cdot 10^8$ m/s.
- E in un mezzo elastico con velocità uguale a $3 \cdot 10^8$ m/s.

(Prova di ammissione al corso di laurea in Architettura e Ingegneria Edile, 2000-2001)

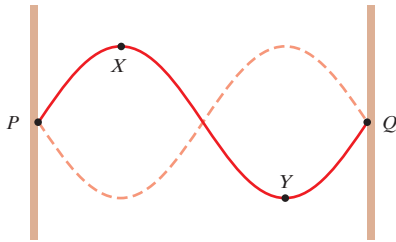
PROVE D'ESAME ALL'UNIVERSITÀ

1 Un'onda sinusoidale che si propaga lungo una corda è descritta dall'equazione $x(t) = 0,03 \sin(3,4 t)$. Si deduce che la frequenza dell'onda è:

- A 0,54 Hz
- B 1,08 Hz
- C 5,4 Hz
- D 0,11 Hz

(Esame di Fisica, corso di laurea in Infermieristica, Università di Napoli, 2005-2006)

8 Il diagramma mostra una corda elastica tesa fra i punti fissi P e Q. Sulla corda è presente un'onda stazionaria.



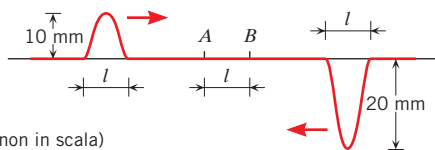
Quale o quali delle seguenti affermazioni, riguardo ai due punti indicati X e Y della corda, sono corrette?

- 1) I due punti oscillano con una differenza di fase uguale a π .
- 2) I due punti hanno lo stesso periodo di oscillazione.
- 3) La distanza tra i due punti è uguale a una lunghezza d'onda.

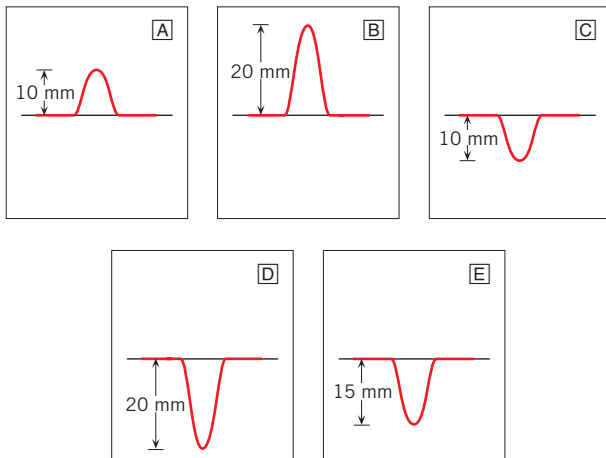
- A Tutte e tre.
- B Solo la 1 e la 2.
- C Solo la 2 e la 3.
- D Solo la 1.
- E Solo la 3.

(Gara di 1° livello edizione 2002)

9 La figura mostra due impulsi, ciascuno di lunghezza l, che si muovono lungo una corda l'uno verso l'altro alla stessa velocità. Quale disegno rappresenta meglio la forma della corda quando entrambi raggiungono il tratto AB?



(Impulsi non in scala)



(Gara di 1° livello edizione 2007)