

# Onde e suono



# 1. La natura delle onde



Figura 1 - L'onda prodotta dal motoscafo si propaga sulla superficie del lago e disturba il pescatore.

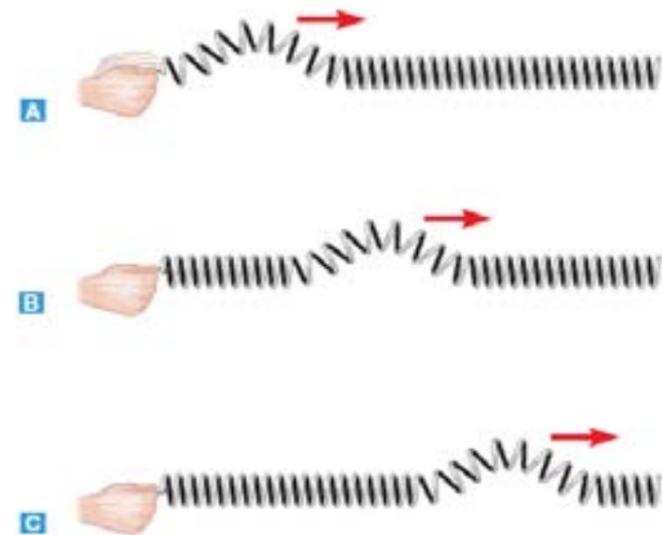
Le onde sull'acqua hanno due caratteristiche in comune con tutte le altre onde:

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

Nella figura a lato 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.

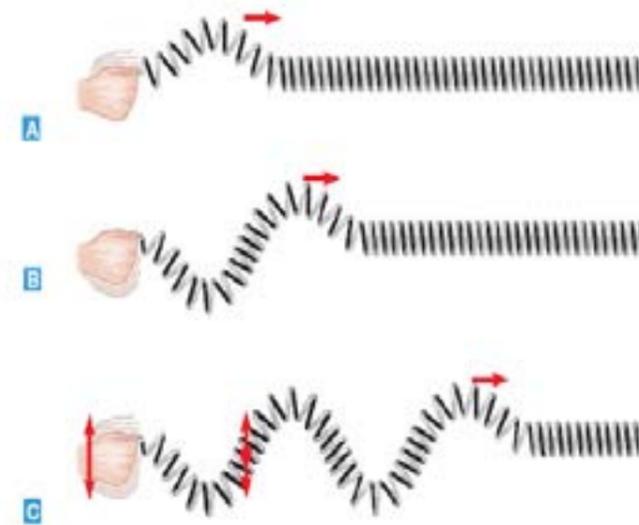
Un'onda è una perturbazione che si propaga attraverso lo spazio trasportando energia e non materia.

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



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 se-

gno 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.

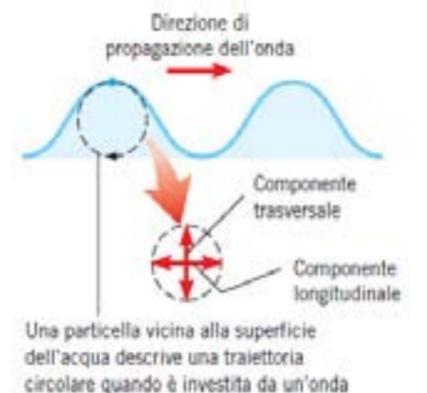
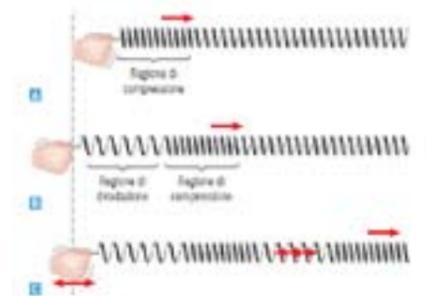


**ONDA TRASVERSALE**  
Un'onda è trasversale quando la direzione della perturbazione è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.

## 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. 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, 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.

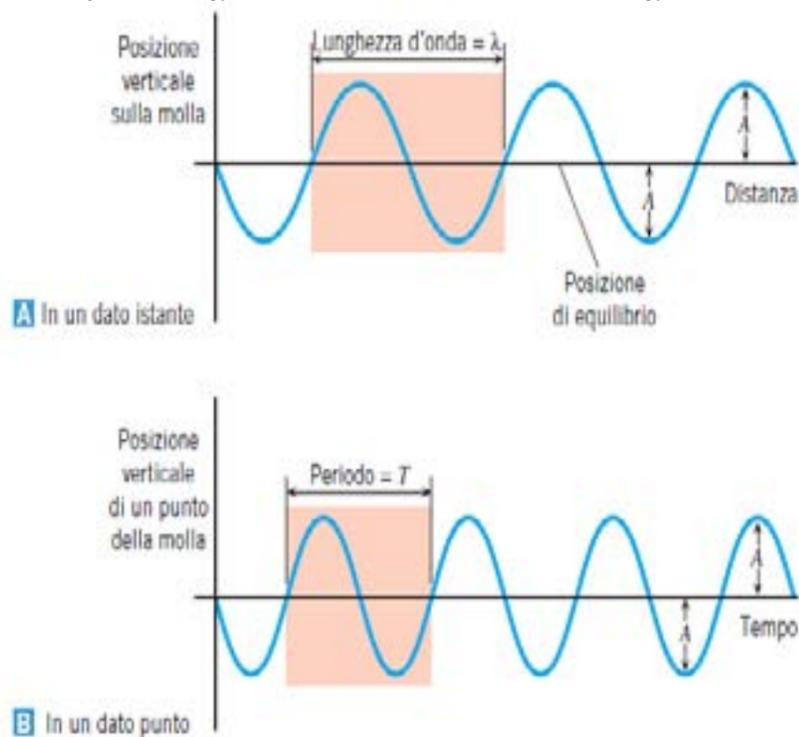


**ONDA LONGITUDINALE**

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

## 2. Onde periodiche

Le onde periodiche sono costituite da cicli, cioè da fenomeni che si ripetono uguali a se stessi con un ritmo regolare.



La figura A 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 ( $\lambda$ ) è la lunghezza di un ciclo ed è uguale alla distanza tra due creste successive, o tra due ventri successivi.

La figura B 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:

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

Il periodo si misura in s e la frequenza in s<sup>-1</sup>, 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:

$$f = 10 \text{ Hz}$$

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. 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  $\lambda$  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  $\lambda$  e periodo T è:

$$v = f \lambda$$

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.

**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  $v = f \lambda$ :

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

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

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 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:

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}}$$

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.

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:

$$f = 1/T$$

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:

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

Il periodo, la lunghezza d'onda e la velocità di propagazione dell'onda sono legati da una relazione molto semplice. 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  $\lambda$  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  $\lambda$  e periodo  $T$  è:

$$v = f\lambda$$

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.



**Figura 5 - Somma di più vettori**

Il vettore somma  $D = A + B + C$  ottenuto con il metodo punta-coda (a) e con la regola del parallelogramma (b).

**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:

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

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

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

**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..

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  $\lambda$  è

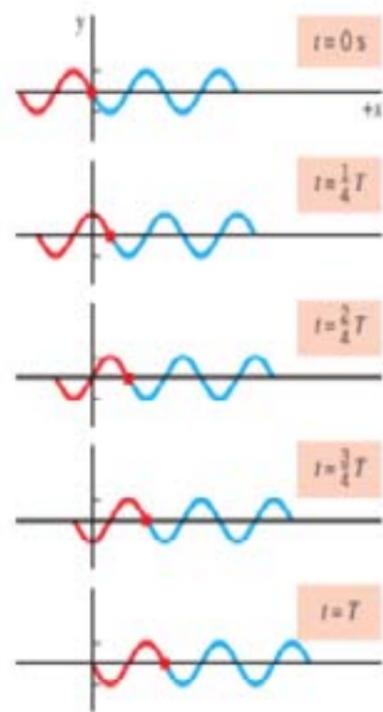
$$\text{Onda che si propaga verso } x \quad y = A \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

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

Le equazioni precedenti si applicano a onde trasversali o longitudinali tali che  $y = 0 \text{ m}$  quando  $x = 0 \text{ m}$  e  $t = 0 \text{ s}$ . 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 dell'onda, consi-



deriamo 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:

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

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 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.

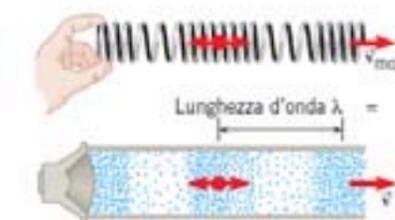
In modo analogo, si può verificare che l'equazione rappresenta un'onda che si propaga verso sinistra, cioè nella direzione negativa delle x.

## 2. 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, quando la membrana si muove verso l'esterno, comprime lo strato d'aria davanti a essa, 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 B, 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.

Continuando a vibrare, la membrana genera una successione di zone in cui l'aria è alternativamente compressa e rarefatta: è questa l'onda sonora. 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  $\lambda$  è uguale alla distanza tra i centri di due compressioni successive o di due rarefazioni successive.

La figura 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.

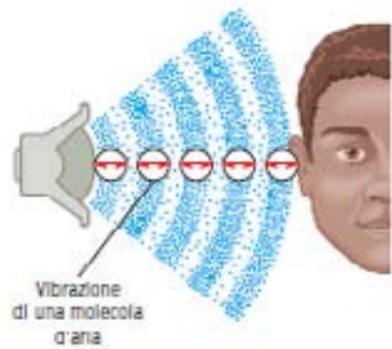
### Frequenza di un'onda sonora

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 avan-

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.

**Figura 8 - Componenti cartesiani di un vettore**  
Scomposizione del vettore A nei due vettori perpendicolari  $A_x$  e  $A_y$  diretti lungo gli assi di un sistema di coordinate cartesiane.

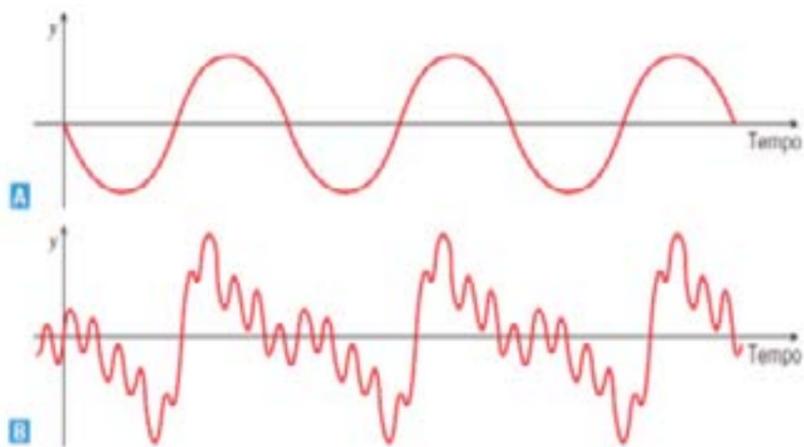


Le regioni di compressione e di rarefazione si propagano nell'aria dall'altoparlante verso l'orecchio dell'ascoltatore, ma le molecole dell'aria non sono trasportate dall'onda. Ogni molecola vibra avanti e indietro intorno alla sua posizione di equilibrio.

ti 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.

Un suono si dice puro quando le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico (figura A): la frequenza di oscillazione delle particelle è la frequenza del suono puro. Quando le particelle oscillano di moto periodico ma non armonico (figura B), 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.



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.

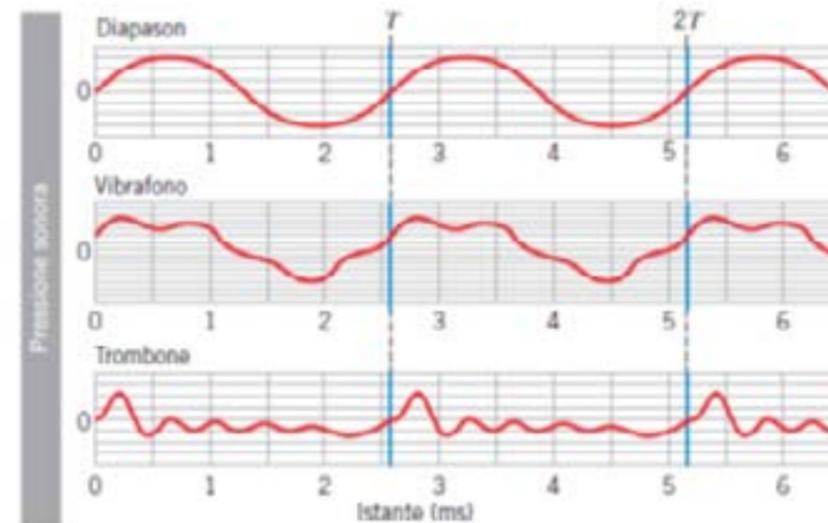
I suoni con frequenza minore di 20 Hz sono chiamati infrasuoni, mentre quelli con frequenza maggiore di 20 kHz sono chiamati ultrasuoni. I rinoceronti si chiamano tra loro emettendo infrasuoni con frequenza di circa 5 Hz, mentre i pipistrelli usano ultrasuoni con frequenze fino a 100 kHz per individuare la posizione degli oggetti e per orientarsi nel volo.

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

### Altezza e timbro

La frequenza è una caratteristica oggettiva del suono perché

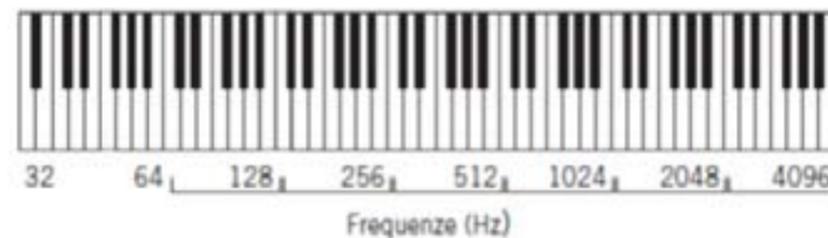
può essere misurata con un apposito strumento. Invece il modo in cui la frequenza viene percepita cambia da un ascoltatore all'altro. Il nostro cervello, infatti, interpreta le frequenze rilevate dall'orecchio in termini di una qualità soggettiva detta altezza: un suono con una frequenza fondamentale 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.



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 le frequenze dei diversi do nella tastiera di un pianoforte.

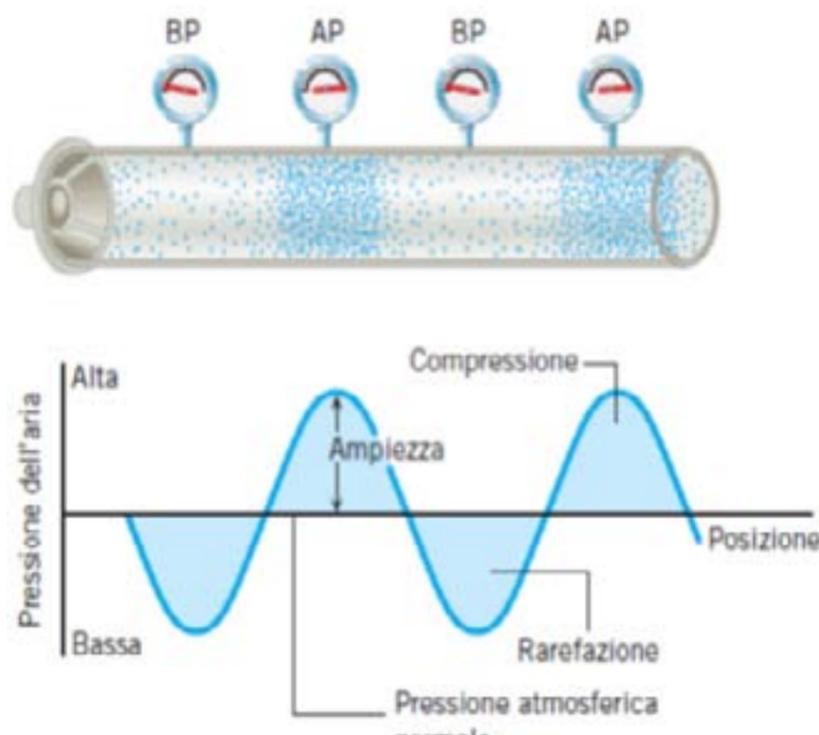
Nel complesso, il nostro udito è uno strumento assai raffinato. Infatti, quando ascoltiamo una stessa nota musicale suonata da strumenti diversi, siamo in grado di distinguerli anche se gli strumenti stanno emettendo suoni con la stessa frequenza fondamentale. Questa diversa percezione è legata a una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



## L'ampiezza di un'onda sonora

La figura 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 sinusoidale. 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.

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).



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  $3 \times 10^2$  Pa, ben minore della pressione atmosferica normale che è pari a  $1,013 \times 10^5$  Pa. La caratteristica del suono che dipende dall'ampiezza della pressione è la sua intensità: tanto maggiore è l'ampiezza della

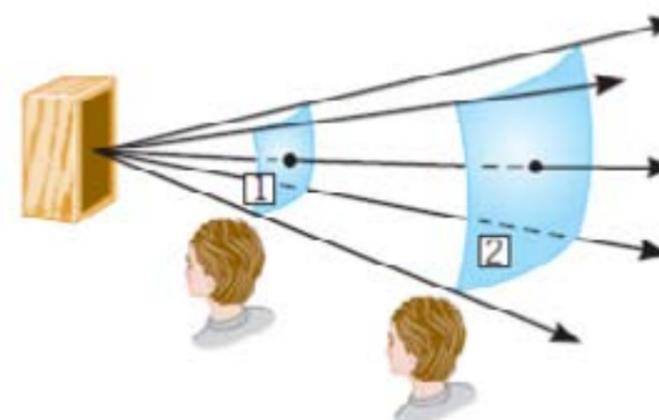
pressione, tanto più forte è il suono. L'intensità di un suono è una caratteristica sia oggettiva sia soggettiva. Infatti l'ampiezza della pressione può essere misurata con opportuni strumenti, ma uno stesso suono può essere percepito come più forte o più debole da persone diverse a seconda della sensibilità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

## La velocità del suono

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.

## 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). Quando si allontana dalla sorgente che l'ha emessa, come l'altoparlante della figura, 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.



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.

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

$$I = P/A$$

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  $12 \cdot 10^{-5} W$  che attraversa perpendicolarmente le superfici indicate con 1 e 2, di area rispettivamente  $A_1 = 4,0 m^2$  e  $A_2 = 12 m^2$ .

► 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):

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

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

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 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:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

**Onda sferica uniforme**

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:  $(1/2)^2 = 1/4$ .

- 



- ponendo che il suono generato dallo scoppio si propaghi 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  $r_2 = 640 m$  dalla sorgente, la sua intensità è  $I_2 = 0,10 W/m^2$ . Qual è l'intensità del suono che arriva all'osservatore 1 che si trova a una distanza  $r_1 = 160 m$  dalla sorgente?
- 
- 

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.

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

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

Di conseguenza:

$$I_1 = 16 \cdot I_2 = 16 \cdot (0,10 W/m^2) = 1,6 W/m^2$$

- L'intensità minima  $I_0$  di un suono puro con una frequenza di 1000 Hz che può essere percepita da un orecchio umano è  $I_0 = 1 \times 10^{-12} W/m^2$ . 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 suo-

no 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, così definito

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

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

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

	Intensità sonora $I$ ( $\text{W/m}^2$ )	Livello di intensità sonora $\beta$ (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

### 3. 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. Supponiamo che, oltre al camion, anche l'aria sia ferma rispetto alla Terra.



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.

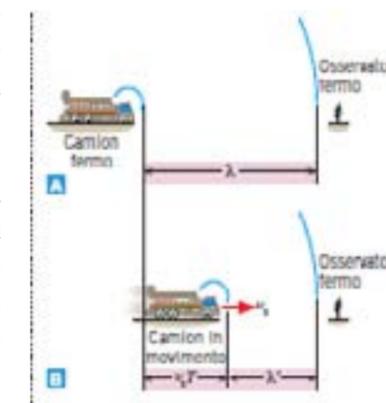
Quando il camion comincia a muoversi, la situazione cambia nel modo rappresentato nella parte B della figura. Le compressioni davanti al camion risultano ora più vicine tra loro e ciò provoca una diminuzione della lunghezza d'onda. Questo «addensamento» è dovuto al fatto che, prima di emettere un'altra 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 A 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 A, la distanza tra queste due compressioni è la lunghezza 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  $t = T$ .

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 B. Di conseguenza, la distanza fra due compressioni successive

A. Quando il camion è fermo, la distanza tra due regioni di compressione successive è uguale alla lunghezza d'onda  $\lambda$  del suono emesso dalla sirena.

B. Quando il camion si muove con velocità  $v_s$ , la lunghezza d'onda  $\lambda'$  del suono davanti al camion è minore di quella del suono emesso dalla sirena.



non è più uguale alla lunghezza d'onda del suono emesso dalla sorgente ferma, ma è  $\lambda'$  (minore di)  $\lambda$  è dato da:

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

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

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

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  $\lambda$  e di  $T$  nell'equazione precedente e risolvendo l'equazione rispetto a  $f_r$ , si ottiene:

$$f_r = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}} \quad \text{Sorgente in moto verso un osservatore fermo}$$

Poiché il termine  $1 - v_s/v$  che compare al denominatore della frazione nell'equazione 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  $\lambda'$  è maggiore di  $\lambda$  e il suo valore è dato da:

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

Possiamo trovare il valore  $f_r$  della frequenza percepita dal ricevitore in questo caso:

$$f_r = f_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}} \quad \text{Sorgente che si allontana da un osservatore fermo}$$

Poiché il termine  $1 + v_s/v$  che compare al denominatore della frazione nell'equazione 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**

**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**

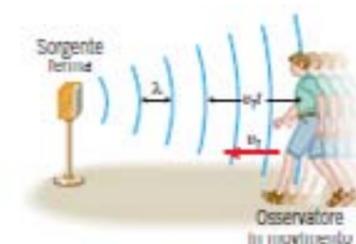
La figura 12.24 mostra come si verifica l'effetto Doppler quando la sorgente sonora è ferma e il ricevitore è in movimento, sempre nell'ipotesi che anche l'aria sia ferma.

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  $\lambda$  tra due regioni di compressione successive. Il numero di regioni di compressione in più che incontra in un secondo è perciò  $v_r / \lambda$ . 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 ha

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



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.

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:

$$f_r = f_s \left( 1 - \frac{v_r}{v} \right)$$

Osservatore che si allontana da una sorgente ferma

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  $\lambda$  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  $\lambda$  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.

### 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:

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

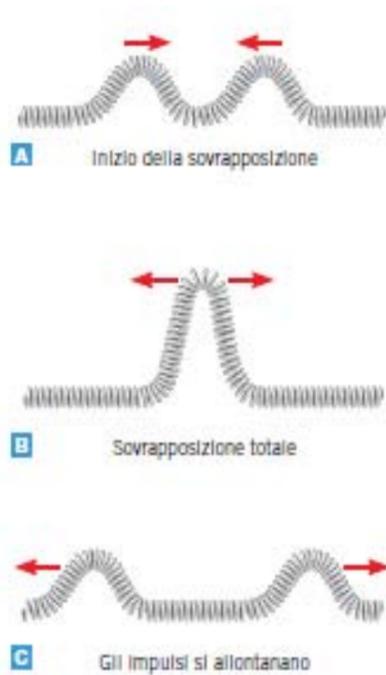
Osservatore e sorgente in moto relativo

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.

### 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 25 e 26, che mostrano due impulsi trasversali di ampiezza uguale che



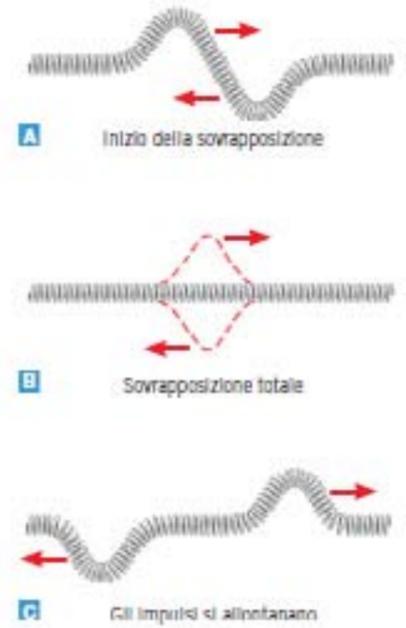
viaggiano uno verso l'altro su una molla.

Nella figura 25 entrambi gli impulsi sono perturbazioni costituite da spostamenti verso l'alto delle spire della molla, mentre nella figura 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

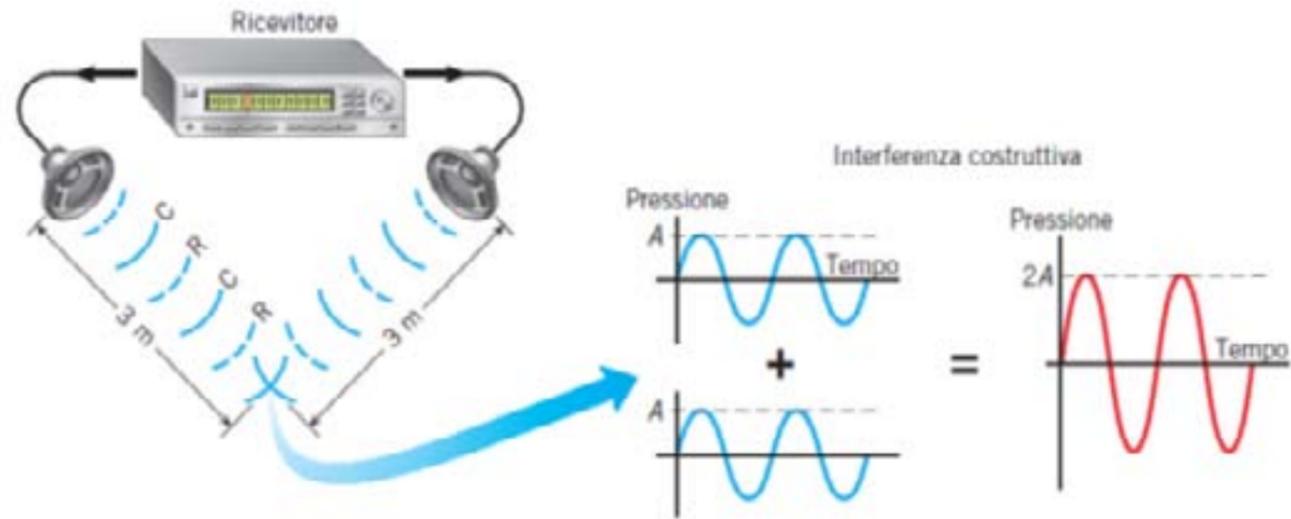
Quando due o più onde sono presenti contemporaneamente in uno stesso punto, la perturbazione in quel punto è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde.



## Interferenza e diffrazione di onde sonore

### Interferenza

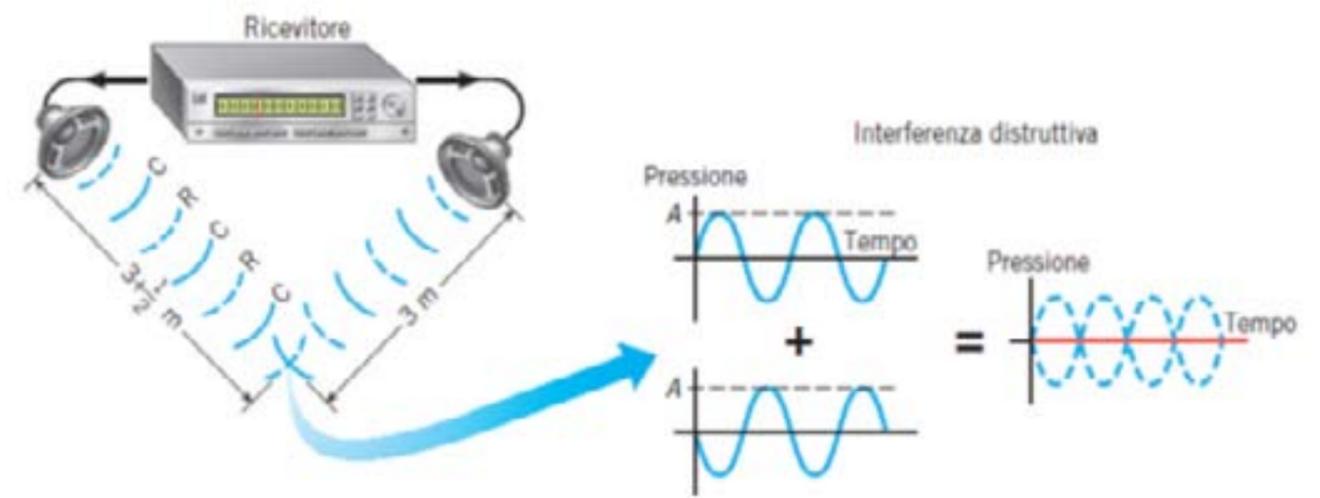
Supponiamo che due onde sonore provenienti da due altoparlanti si sovrappongano in un punto al centro della zona di ascolto, come in figura, e che esse abbiano la stessa ampiezza e la stessa frequenza. Per semplicità supponiamo inoltre che la loro lunghezza d'onda sia  $\lambda = 1$  m e che le membrane 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.



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  $2A$ ).

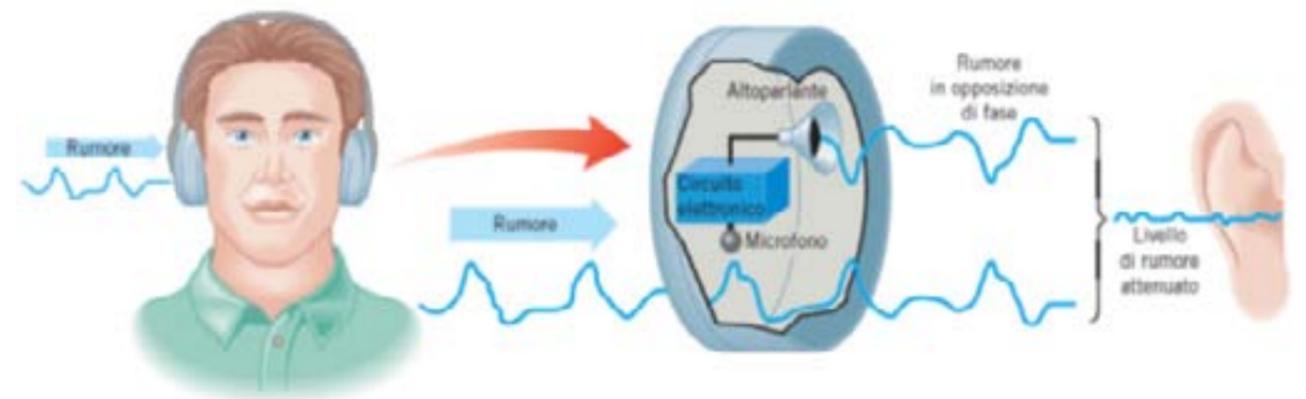
Se i due altoparlanti sono alla stessa distanza dal punto in cui le onde si sovrappongono, si ha sempre la sovrapposizione delle compressioni (C) di un'onda con le compressioni dell'altra e la sovrapposizione delle rarefazioni (R) di un'onda con le rarefazioni dell'altra. Per il principio di sovrapposizione 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. 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 (\*) 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. 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.

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



### 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. 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.

**CONDIZIONI DI INTERFERENZA DISTRUTTIVA**

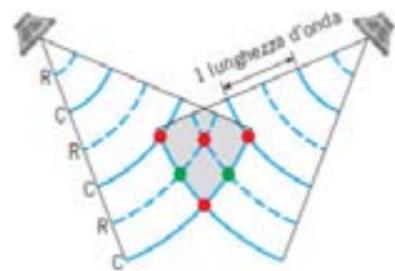
Quando due sorgenti sonore sono in fase, una differenza di cammino rispetto al punto di sovrapposizione pari a mezza lunghezza d'onda o a un numero intero di lunghezze d'onda più mezza lunghezza d'onda

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

produce un fenomeno di interferenza distruttiva.

**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.



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

**Diffrazione**

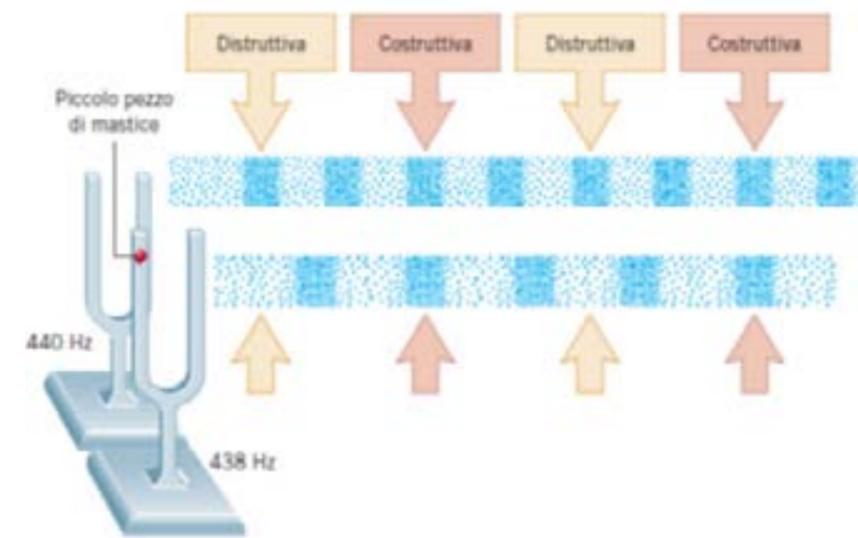
Quando incontra un ostacolo oppure i bordi di una fenditura, un'onda devia dalla sua direzione di propagazione e prosegue al di là dell'ostacolo o della fenditura. Per esempio, nel superare una porta aperta un'onda sonora si incurva nel modo rappresentato in figura 32A. Se ciò non avvenisse, fuori dalla 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). 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. 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.

**Battimenti**

Il diapason è uno strumento costituito da una forcilla d'acciaio che emette un suono puro, con una frequenza di 440 Hz, quando viene percosso con un colpo secco. La figura 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 mastiche: 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.



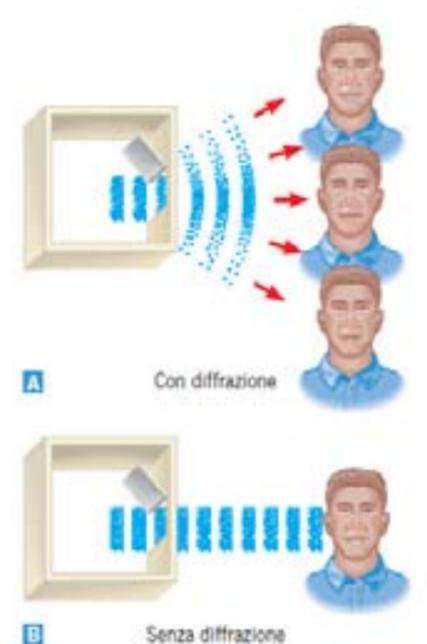
Per ragioni di chiarezza nella figura 33 le regioni di compressione e di rarefazione delle due onde sonore sono rappresentate separatamente, ma in realtà esse si diffondono nello spazio e si sovrappongono e, come previsto dal principio di sovrapposizione, il suono percepito da un osservatore è la somma 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 (3), dove lo spostamento è espresso mediante la funzione coseno:

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

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



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.

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t) = A [\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)]$$

La relazione è uguale alla seguente

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

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:

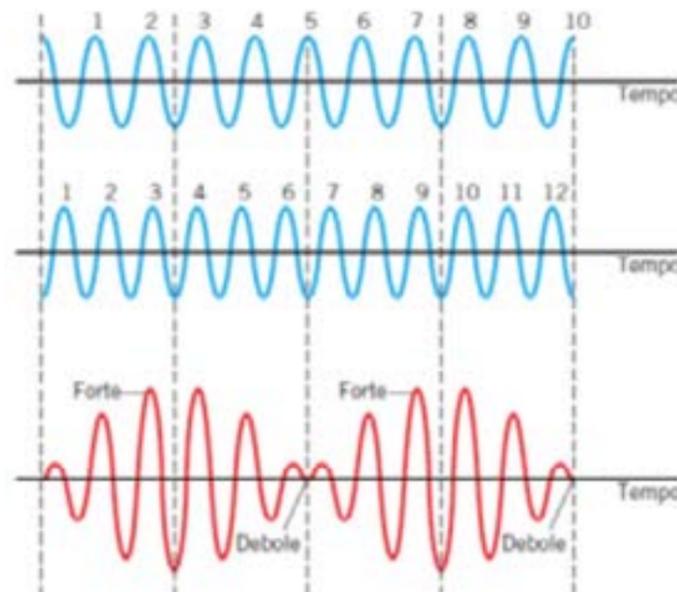
$$2A \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right)$$

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 33 la frequenza dei battimenti è 2 Hz, (cioè 440 Hz - 438 Hz), quindi un osservatore sente due battimenti al secondo. La figura 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.



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 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 Hz - 10 Hz = 2 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.

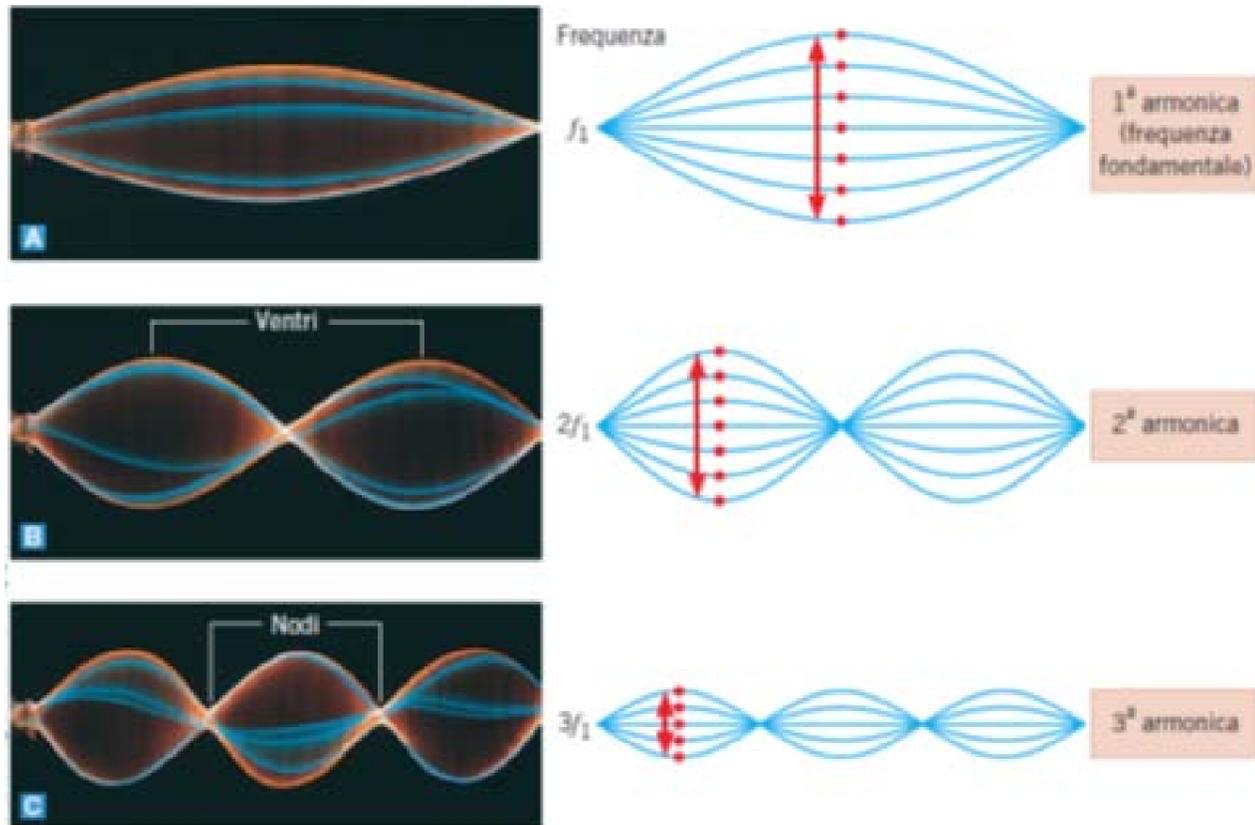
## Onde stazionarie

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 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.

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.



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 ( $2f_1$ ,  $3f_1$ ,  $4f_1$ , ...) 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 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. 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 dell'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:  $f_1 = v/2L$

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.



**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:

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

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

**APPROFONDIMENTI****L'eco e il riverbero**

In fisica e in acustica l'eco è un fenomeno prodotto dalla riflessione di onde sonore contro un ostacolo che vengono a loro volta nuovamente "percepiti" dall'emettitore più o meno immutate e con un certo ritardo rispetto al suono diretto. Tale ritardo non dev'essere inferiore ad 1/10 di secondo. Al di sotto di tale valore non si può più parlare di eco ma di riverbero. Un tipico esempio di riverbero è quello prodotto in una stanza dalla riflessione di onde sonore sulle pareti perimetrali.

Si parla propriamente di eco quando le singole riflessioni dell'onda sonora sono percepite distintamente dall'ascoltatore. In termini più generali, l'eco può essere definita come un'onda che viene riflessa da una discontinuità nel mezzo di propagazione, e che ritorna con una intensità e ritardo sufficiente per essere percepita.

Può essere "utile" (come nei sonar) o "indesiderata" (come nei sistemi telefonici) L'intensità viene generalmente misurata in decibel (dB).

Propagazione del suono - eco e risonanza

La condizione fondamentale affinché il suono si propaghi è la presenza di un mezzo di propagazione che può essere gassoso, liquido o solido. Maggiore è la densità del mezzo di propagazione e maggiore sarà la velocità del suono: nell'aria a 20°C, il suono si propaga ad una velocità di circa 340 metri al secondo, nell'acqua e attraverso un mezzo solido ancora più velocemente.

Questa è la ragione per la quale i nativi americani, per verificare se arrivavano i cavalli dei nemici, mettevano l'orecchio sul terreno, dato che il suono arrivava prima attraverso il terreno che non attraverso l'aria.

Come conseguenza si ha che nel vuoto non c'è propagazione di suono, ma silenzio assoluto. Per capire come si propaga il suono, si può gettare un sasso nell'acqua e si noterà che il "disturbo" si propaga per linee concentriche. In realtà, non è l'acqua che si sposta, ma l'impulso di propagazione perché l'acqua si limita a fare dei movimenti che vanno verso l'alto e verso il basso.

Un fenomeno fondamentale della propagazione del suono è la riflessione che si determina quando l'onda sonora incontra un ostacolo e torna indietro. Si individuano, così, due onde: l'onda incidente e l'onda riflessa. La riflessione può darsi in due modi: come riverbero e come eco.

Si ha riverbero quando l'onda incidente si confonde nell'orecchio dell'ascoltatore con l'onda riflessa, mentre si ha eco quando le due onde risultano distinte. Perché si formi l'eco è necessario che la distanza tra la sorgente sonora e l'ostacolo sia di almeno 17 metri. Come arriviamo a questo calcolo? Il suono si propaga nell'aria a 20°C a circa 340 m/s. Per distinguere con chiarezza due suoni è necessario che essi distino tra loro almeno 1/10 di secondo. Tale intervallo di propagazione in aria corrisponde alla distanza di 34 metri, cioè 17 metri dalla fonte sonora all'ostacolo e 17 per il percorso inverso. Se la distanza è inferiore a 17 metri si ha il riverbero.

**Riverberi artificiali**

Il riverbero viene ricreato artificialmente per essere applicato durante spettacoli musicali o in studio di registrazione alla voce ed agli strumenti

musicali per simulare esecuzioni musicali in spazi ampi o per conferire maggiore profondità ad un suono. Per simulare l'effetto del riverbero sono state implementate soluzioni diverse nel tempo, beneficiando del progresso tecnologico.

**Riverbero a nastro**

Si utilizza un particolare registratore/riproduttore a nastro magnetico che fa scorrere a velocità costante un anello di nastro dentro una meccanica dotata di una testina di registrazione fissa e di una di riproduzione mobile. La testina di riproduzione è infatti montata su un meccanismo a vite che permette di variarne la distanza da quella di registrazione. Il segnale registrato dalla prima testina viene letto dalla seconda e miscelato all'originale generando l'effetto. Il tempo di ritardo dipende dalla distanza tra le due testine e permette di generare sia l'effetto riverbero che l'eco. Questi apparecchi sono ingombranti e pesanti. Come in ogni registrazione a nastro, lo scorrimento dello stesso genera un fruscio che peggiora notevolmente la qualità del suono.

**Riverbero a tromba**

Sull'albero di un motore elettrico a velocità variabile vengono montati, sfasati tra loro di 180°, due microfoni inseriti in contenitori conici (le "trombe", appunto) che ne aumentano la direzionalità schermandoli parzialmente dai rumori esterni. Il tutto è inserito in una cassa acustica nella quale un altoparlante, montato all'altezza dei microfoni rotanti, trasmette il suono che si vuole ritardare. Ruotando, i microfoni passano davanti all'altoparlante captando il suono e trasmettendolo al circuito di amplificazione. Il ritardo ottenuto è inversamente proporzionale alla velocità di rotazione del motore (regolabile dall'utilizzatore) e permette di ottenere riverbero, eco e Leslie (particolare effetto ottenuto dalla combinazione di ritardo e sfasamento delle frequenze dovuto all'effetto Doppler). I riverberi a tromba sono ingombranti e pesanti. La qualità del suono dipende dalla bontà della componentistica (microfoni e altoparlanti) ma è comunque influenzata negativamente dal rumore generato per attriti meccanici dal motore e dal rumore esterno captato dai microfoni. L'effetto Leslie si può oggi ottenere più agevolmente con un circuito di sfasamento "a pettine" creato con amplificatori operazionali, meglio conosciuto con il nome commerciale di Phaser.

**Riverbero a molla**

Il segnale viene fatto passare, tramite un apposito trasduttore attraverso una spirale metallica (appunto, una molla). All'altro capo della molla un trasduttore equivalente al primo reimmette il segnale nel circuito di amplificazione miscelandolo a quello originale. Il segnale prelevato dal secondo trasduttore risulterà leggermente ritardato rispetto a quello applicato al primo originando nell'orecchio dell'ascoltatore l'effetto del riverbero. Per ragioni di semplicità costruttiva ed esiguità di costi i moderni amplificatori per chitarra di piccole dimensioni sono spesso dotati di riverbero a molla, che viene alloggiato all'interno della cassa di risonanza. A differenza di altri strumenti, il suono della chitarra elettrica non risente particolarmente delle sfumature timbriche che questo tipo di effetto aggiunge al segnale originale.

Il funzionamento del riverbero a molla è basato sulla trasmissione del movimento applicato ad un capo della molla tramite l'apposito trasdut-

tore che converte il segnale elettrico in un segnale meccanico. La molla vibrerà trasmettendo il segnale meccanico attraverso le spire impiegando un certo tempo. All'altro capo della molla il segnale giungerà quindi in leggero ritardo rispetto al capo di ingresso della molla stessa e verrà riconvertito in segnale elettrico con un apposito trasduttore, solitamente realizzato tramite un nucleo ferromagnetico intimamente fissato al capo finale della molla ed immerso in un solenoide. Grazie alla legge di Faraday il movimento del nucleo magnetico posto all'interno del conduttore diverrà un segnale elettrico.

Il tempo di ritardo del sistema è stabilito a priori dalla lunghezza della molla e dunque non è modificabile dall'utilizzatore. Anche adottando molle di grande lunghezza, il massimo ritardo ottenibile è nell'ordine dei millisecondi, quindi non è possibile generare l'effetto eco ma solo un riverbero accettabile. Se accidentalmente la scatola a molle viene scossa, i trasduttori captano il rumore delle molle che sbattono tra loro e contro le pareti della scatola stessa inviandolo al circuito di amplificazione.

#### Riverbero a camera

Sulla falsariga del riverbero a molla, in una scatola isolata acusticamente dall'esterno viene inserito un tubo curvato in maniera da creare il percorso più lungo possibile. Ad un'estremità del tubo viene posto un piccolo altoparlante mentre all'altra estremità c'è un microfono. Il suono emesso dall'altoparlante impiegherà un certo tempo per percorrere tutto il tubo ed arrivare al microfono generando così il ritardo necessario. Come per il riverbero a molle, il tempo di ritardo non è modificabile dall'utilizzatore ed è comunque piuttosto breve. Il suono ottenuto da questa implementazione di riverbero è di pessima qualità.

#### Riverbero digitale

Il segnale analogico viene digitalizzato ed immagazzinato in banchi di memoria RAM che viene utilizzata come la spirale metallica del riverbero a molla. Infatti i bytes vengono fatti "scorrere" da un banco al successivo fino al raggiungimento dell'ultimo. Il segnale digitale prelevato dall'ultima memoria viene poi riconvertito in analogico e miscelato al segnale originale ottenendo l'effetto riverbero. Il tempo di ritardo ottenibile varia agendo sia sul numero di memorie coinvolte nel processo, sia sulla temporizzazione del trasferimento dei dati da un banco all'altro. La grande capacità delle memorie RAM permette di raggiungere anche ritardi di parecchi secondi e quindi passare agevolmente da riverbero a eco. Esistono sul mercato circuiti integrati che comprendono i convertitori A/D e D/A, le memorie ed i circuiti di temporizzazione. Con un solo chip è così possibile realizzare un eco digitale in uno spazio ridottissimo e con pochissima componentistica esterna. La digitalizzazione del segnale e la sua successiva riconversione in forma analogica causano tuttavia una certa perdita di qualità del suono che dipende dalla bontà del campionamento, ma che non è completamente eliminabile. Molto diffusi anche i circuiti integrati detti 'bucket brigade' (catena di secchi) che non operano al loro interno una conversione da analogico a digitale e viceversa, ma sono formati da tantissime celle a condensatore che si caricano in sequenza con il valore di tensione campionato ad istanti regolari, analogicamente. Il valore della carica viene passato da un condensatore all'altro (da qui il nome di catena di secchi) fino a raggiungere l'uscita, impiegando un determinato tempo che sarà il ritardo desiderato

## Sonar

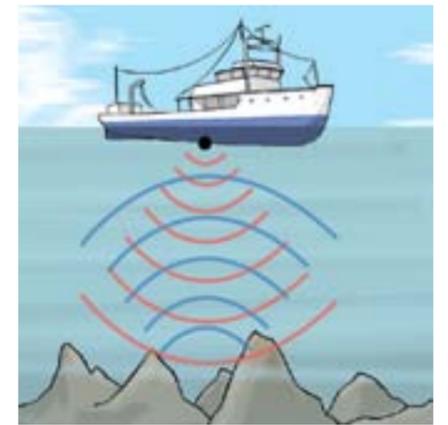
Il Sonar, termine che nasce come acronimo dell'espressione inglese sound navigation and ranging, è una tecnica che impiega la propagazione del suono (generalmente sottacqua) per navigare, comunicare o rilevare la presenza e la posizione di imbarcazioni. Si distinguono "sonar attivi" e "sonar passivi". Il sonar può essere usato come mezzo di localizzazione acustica. Quest'ultima è stata impiegata anche in aria in passato, prima dell'introduzione del radar e viene tuttora utilizzata per la navigazione dei robot mentre il SODAR (un sonar aereo rivolto dal basso verso l'alto) trova applicazione nelle indagini atmosferiche. Il termine sonar indica anche lo strumento usato per generare e ricevere i segnali acustici. La banda delle frequenze usate dai sistemi sonar va dagli infrasuoni agli ultrasuoni. Lo studio della propagazione del suono sottacqua è noto come acustica subacquea o idroacustica.

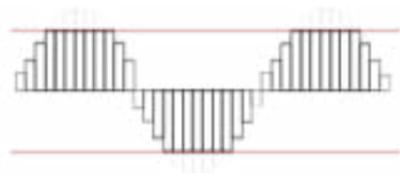
Il Sonar (SOund Navigation And Ranging) E' l'unico apparato utilizzabile da un sottomarino, quando e' immerso oltre la quota periscopio, per scoprire gli ostacoli che lo circondano, in altre parole per individuare navi di superficie, sottomarini o animali marini. Su un sommergibile troviamo due tipi di sonar, quello passivo e quello attivo appunto. Quello passivo e' costituito da un sensore che capta i suoni trasmessi dagli oggetti sommersi e permette di localizzarne la direzione di provenienza e individuare la fonte in base alle caratteristiche del suono captato. E' composto da una serie di sensori e puo' essere utilizzato solamente per "ascoltare". In condizioni ottimali, un sonar passivo moderno puo' "sentire" navi da molte miglia nautiche di distanza, permettendo così al sottomarino di scoprire potenziali minacce prima di entrare nella portata dei loro sensori.

Il migliore vantaggio di questa soluzione e' la silenziosita', unita alla possibilita' di scoprire le caratteristiche della fonte di emissione del rumore. E' inoltre possibile, grazie alla trigonometria e avendo almeno tre sensori disposti sulla lunghezza del battello (o effettuando opportune manovre), ottenere con sufficiente approssimazione la distanza della fonte.

Il sonar attivo invece opera secondo il principio del radar e permette la localizzazione dei corpi sommersi tramite la rivelazione degli echi relativi a impulsi sonori o ultrasuoni emessi per mezzo di un trasduttore piezoelettrico o magnetostriativo. Il trasduttore emette un segnale ad alta energia acustica, o "ping" (fino a 200 dB); gli oggetti presenti nell'area riflettono il suono e l'onda riflessa (eco) viene raccolta dai sensori del sottomarino. Il tempo trascorso prima che l'onda riflessa raggiunga l'emettitore fornisce la distanza dell'obiettivo con estrema precisione.

L'ovvio vantaggio del sonar attivo e' che fornisce informazioni immediate sulla portata. Lo svantaggio e' che la trasmissione attiva puo' essere ricevuta da sottomarini e/o navi nemiche e usata per localizzare il sottomarino che trasmette. A causa di questo rischio, viene utilizzato solamente come ultima risorsa per determinare distanza e posizione esatta di un obiettivo. Si tratta di apparecchiature attualmente insostituibili per qualsiasi marina militare. Il loro spegnimento provocherebbe la fine del monitoraggio di qualsiasi attività sottomarina, consentirebbe a chiunque di entrare/uscire dalle acque territoriali dei singoli paesi e esporrebbe ogni unità navale al sabotaggio ad opera di sommozzatori (come ai tem-





pi della seconda guerra mondiale).

## Il Distorsore

Durante la distorsione l'onda subisce una "tosatura" (clipping).

Il distorsore è un dispositivo elettronico per strumenti musicali elettrificati, solitamente usato con la chitarra elettrica.

È il diretto discendente dell'overdrive con il quale condivide un funzionamento di base piuttosto simile: simula il naturale effetto di saturazione di un cono in cui viene immesso un segnale a volume troppo alto, ma a differenza del suo "prototipo", esaspera questo effetto, creando il classico sound metal e rock dagli anni 80 in poi. La distorsione ha varie intensità anche se essendo un ingigantimento dell'overdrive il regolatore è spesso puntato al massimo.

Alcuni amplificatori includono la distorsione nella serie di effetti forniti.



## Il Delay

Il delay, echo/delay o delay/echo (dall'inglese per "ritardo" e "eco") è un effetto usato per modificare il suono di strumenti musicali elettrici o amplificati. Viene anche talvolta chiamato, più impropriamente, eco.

La funzione generale del delay consiste nel registrare il suono in ingresso e riprodurlo con un determinato ritardo temporale. Solitamente il suono ritardato viene aggiunto al segnale originale, anziché sostituirlo; in tal caso l'effetto complessivo è simile a quello dell'eco. Il concetto è anche analogo a quello del riverbero: la differenza principale fra questi due tipi di effetti sonori riguarda la scala dei tempi resi disponibili al musicista. Il riverbero, infatti, riproduce il suono originale con un ritardo minimo, sicuramente inferiore al secondo, mentre un delay può produrre il suono ritardato anche a distanza di decine di secondi.

Il suono ritardato può a sua volta essere reintrodotta nel sistema di delay, producendo una sequenza di echi. In genere, il suono ritardato è riprodotto a un volume inferiore all'originale, cosicché la sequenza di echi sfuma nel tempo, come un'eco fisica in determinate condizioni di acustica.



## La voce umana

Il re degli strumenti musicali è naturalmente la voce umana. Essa è lo strumento più complesso e suggestivo a disposizione dell'uomo: veicolo di informazione, elemento utile al riconoscimento, fonte di espressione artistica, è una delle chiavi della nostra esistenza. La voce costituisce una perfetta sintesi di strumento a corda e di strumento a fiato. La sorgente di vibrazione sono le corde vocali (meglio sarebbe chiamarle "pliche" o "pieghe" vocali perchè si tratta di lembi muscolari). Per effetto della spinta di Bernoulli esse sono poste in oscillazione dal flusso gassoso che i polmoni inviano attraverso la glottide ed emettono, come le corde, una serie molto ricca di armoniche. Se non disponessimo di una cassa di risonanza (in questo caso la cavità orale e in misura minore quella nasale) la nostra voce sarebbe flebile quasi inudibile. E' per questo che ogni voce ha il suo timbro caratteristico, tanto che è assai difficile imbattersi in due voci identiche. Le risonanze tipiche di una voce sono dette frequenze formanti. Se il tratto vocale è breve, come nei fanciulli, il timbro vocale è acuto come negli strumenti a fiato di piccole dimensioni (l'ottavino o l'ocarina). Più la cavità è grande, più il tono della voce si abbassa attraverso tutta la gamma da soprano a basso profondo. Naturalmente anche la frequenza fondamentale delle corde vocali, dipendendo dalla loro lunghezza e dalla loro grossezza, varia molto in relazione all'età, al sesso e alla statura dell'oggetto. Il normale parlato maschile copre la gamma tra 120 e 180Hz, quello femminile tra 200 e 300Hz. Quindi in un bambino, non solo il timbro è più sottile e acuto ma anche le note che emette sono alquanto elevate.

Nell'emettere la voce siamo in grado di controllare due parametri fondamentali: l'altezza della nota e questo dipende da quanta tensione muscolare applichiamo alle corde vocali e le frequenze formanti, che possono essere variate sagomando in modo voluto la nostra cavità orale per esempio aprendo di più la bocca o abbassando il palato. Il risultato è che, pur conservando lo stesso timbro di voce, possiamo emettere l'una o l'altra delle vocali.

L'altezza e il timbro dei suoni che noi emettiamo dipendono dalla velocità del suono nel nostro tratto vocale. Supponiamo che un soprano voglia emettere un la fondamentale a 440Hz. Se i suoi polmoni e la sua bocca sono pieni d'aria, sa bene come farlo. Ma se alla cantante facciamo respirare un gas diverso dall'aria, per esempio elio misto a ossigeno, la minore densità e viscosità del gas fa sì che la velocità del suono aumenti di circa tre volte. Allora se la geometria del suo apparato fonatorio non è cambiata, le frequenze delle formanti della voce salgono in quanto sono proporzionali alla velocità del suono. Risultato: il suono assume un timbro più acuto e stridulo alla paperina, le vocali sono poco riconoscibili e anche la nota emessa potrebbe divenire più acuta. Sul versante opposto, l'ispirazione di aria carica di pesanti composti carboniosi come il fumo della sigaretta o della pipa, produce un effetto di abbassamento del tono vocale.



## Gli ultrasuoni

Gli ultrasuoni sono delle onde meccaniche sonore. A differenza dei fenomeni acustici propriamente detti le frequenze che caratterizzano gli ultrasuoni sono superiori a quelle mediamente udibili da un orecchio umano. La frequenza convenzionalmente utilizzata per discriminare onde sonore da onde ultrasoniche è fissata in 20 kHz. Lo stesso termine ultrasuono chiaramente indica ciò che è al di là (ultra) del suono, identificando con suono solo il fenomeno fisico udibile.

Come ogni altro tipo di fenomeno ondulatorio gli ultrasuoni sono soggetti a fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione e possono essere definiti mediante parametri quali la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'intensità (misurata in decibel), l'attenuazione (dovuta all'impedenza acustica del mezzo attraversato).

Nonostante, come detto, l'essere umano, non sia in grado di udire gli ultrasuoni, altri animali hanno tale capacità. Ad esempio i cani (per i quali sono in commercio appositi fischietti di richiamo agli ultrasuoni), i delfini e le balene che li usano per comunicare tra loro e i pipistrelli che li usano per vedere gli ostacoli mentre volano di notte.

Gli ultrasuoni trovano utilizzo per lo più in campo medico ed industriale essendo ampiamente utilizzati nelle ecografie, nei controlli non distruttivi e in molti apparecchi utilizzati per la pulizia superficiale di oggetti di piccole dimensioni.

Anche il sonar impiega intervalli di frequenze che non di rado sconfinano nella gamma degli ultrasuoni.

Gli ultrasuoni vengono generati per mezzo di materiali con particolari caratteristiche meccanico-elettriche, i materiali piezoelettrici. Questi particolari materiali come ad esempio il quarzo o titanato di bario hanno la caratteristica di generare una differenza di potenziale se compressi o stirati in senso trasversale, viceversa se applicata una differenza di potenziale ai loro estremi questi si comprimono o dilatano in senso trasversale. Proprio quest'ultima caratteristica viene sfruttata per generare queste onde meccaniche sopra il campo dell'udibilità (ultrasuoni). In base al materiale scelto avremo quindi diverse frequenze di ultrasuoni, diverse propagazioni nei materiali e quindi diverse caratteristiche di potenza della macchina generatrice. Le principali applicazioni oltre quelle sopra indicate riguardano anche il campo meccanico, soprattutto la saldatura di materiali plastici e il controllo non distruttivo di cordoni di saldatura. La saldatura di materiali plastici per mezzo di ultrasuoni viene sovente utilizzata quando è richiesta una certa qualità estetica ma soprattutto velocità di esecuzione; due oggetti plastici (preferibilmente dello stesso materiale in modo che l'attrito molecolare risulti alto) vengono messi a contatto fra loro e un parallelepipedo metallico (sonotrodo) di appoggia ad uno di essi scaricando ultrasuoni e quindi mettendolo in vibrazione. L'attrito generato fonderà le parti plastiche a contatto unendole. La forma e la frequenza alla quale vibrerà il sonotrodo dipendono dalla geometria dell'oggetto che si andrà a saldare.

La qualità estetica è eccellente anche se non viene assicurata la tenuta stagna quindi, nel caso sia essa un requisito fondamentale, è preferibile prendere in esame un altro tipo di saldatura (es. saldatura a lama calda). Gli ultrasuoni sono anche uno dei controlli non distruttivi che si possono eseguire sui cordoni di saldatura fra metalli. L'attrezzatura necessaria è composta da uno schermo che visualizza in un grafico (molto

simile ad un oscilloscopio) il ritorno (eco) delle onde di ultrasuoni che si propagano nel metallo e da una sonda dove è contenuto il materiale piezoelettrico che genera gli ultrasuoni. La sonda viene messa a contatto col cordone di saldatura da controllare, gli ultrasuoni si propagano nel metallo e ogni volta che nel cordone in questione è presente un'imperfezione (bolla d'aria, accumulo di impurezze o una cricca) la massa volumica (densità) cambierà rispetto al resto del cordone di saldatura e parte degli ultrasuoni verranno riflessi. Noi vediamo questa onda di riflesso (eco) nello schermo e in base alla scala dello schermo riusciamo anche ad individuare la posizione approssimativa del difetto. Questo tipo di controllo è molto diffuso dato che risulta non distruttivo e permette di controllare cordoni di saldatura molto lunghi in brevissimo tempo individuando anche la posizione del difetto.

## L'ecografia

L'ecografia o ecotomografia è un sistema di indagine diagnostica medica che non utilizza radiazioni ionizzanti, ma ultrasuoni e si basa sul principio dell'emissione di eco e della trasmissione delle onde ultrasonore. Questa tecnica è utilizzata routinariamente in ambito internistico, chirurgico e radiologico. Oggi infatti tale metodica viene considerata come esame di base o di filtro rispetto a tecniche di Imaging più complesse come TAC, imaging a risonanza magnetica, angiografia. L'ecografia è, in ogni caso, operatore-dipendente, poiché vengono richieste particolari doti di manualità e spirito di osservazione, oltre a cultura dell'immagine ed esperienza clinica.

Gli ultrasuoni utilizzati sono compresi tra 2 e 20 MHz. La frequenza è scelta tenendo in considerazione che frequenze maggiori hanno maggiore potere risolutivo dell'immagine, ma penetrano meno in profondità nel soggetto. Queste onde sono generate da un cristallo piezoceramico inserito in una sonda mantenuta a diretto contatto con la pelle del paziente con l'interposizione di un apposito gel (che elimina l'aria interposta tra sonda e cute del paziente, permettendo agli ultrasuoni di penetrare nel segmento anatomico esaminato); la stessa sonda è in grado di raccogliere il segnale di ritorno, che viene opportunamente elaborato da un computer e presentato su un monitor.

Variando l'apertura emittente della sonda, è possibile cambiare il cono di apertura degli ultrasuoni e quindi la profondità fino alla quale il fascio può considerarsi parallelo.

Stanno diventando normali le cosiddette sonde real-time, in cui gli ultrasuoni sono prodotti e raccolti in sequenza in direzioni diverse, tramite modulazioni meccaniche o elettroniche della sonda.

Quando l'onda raggiunge un punto di variazione dell'impedenza acustica, può essere riflessa, rifratta, diffusa, attenuata. La percentuale riflessa porta informazioni sulla differenza di impedenza tra i due tessuti ed è pari a:

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$



Vista la grande differenza di impedenza tra un osso ed un tessuto, con l'ecografia non è possibile vedere dietro di esso. Zone di aria o gas ( $Z$  piccolo) fanno invece "ombra", per via di una riflessione totale.

Il tempo impiegato dall'onda per percorrere il percorso di andata, riflessione e ritorno viene fornito al computer, che calcola la profondità da cui è giunta l'eco; questo punto si riferisce ad una superficie di suddivisione tra tessuti.

Sostanzialmente un ecografo è costituito da tre parti:

- una sonda che trasmette e riceve il segnale
- un sistema elettronico che:
  - o pilota il trasduttore
  - o genera l'impulso di trasmissione
  - o riceve l'eco di ritorno alla sonda
  - o tratta il segnale ricevuto
- un sistema di visualizzazione

ESERCIZI SVOLTI

**1. Il suono si propaga nell'aria (a 20°C) alla velocità di 343m/s. La lunghezza d'onda di un suono è 1,5m. Qual è il periodo? Qual è la frequenza?**

La velocità di un'onda è espressa da:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

da cui si ricava il periodo

$$T = \frac{\lambda}{v}$$

Introducendo i dati si trova

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{1,5m}{343m/s} = 0,0044s = 4,4 \cdot 10^{-3}s$$

La frequenza è l'inverso del periodo, quindi si ha:

$$f = \frac{1}{4,4 \cdot 10^{-3}} = 227,3Hz$$

**2. Un diapason vibra con la frequenza di 700Hz. Qual è la lunghezza d'onda corrispondente nell'aria e nell'acqua (a 20°C)?**

La formula che collega la lunghezza d'onda richiesta con la frequenza data e con la velocità è:

$$v = \lambda \cdot f$$

da cui si ricava

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Introducendo i dati per l'aria si trova:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343m/s}{700s^{-1}} = 0,49m$$

Introducendo i dati per l'acqua si trova:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1470m/s}{700s^{-1}} = 2,1m$$

**3. Il suono ha l'intensità  $2 \cdot 10^{-4} W / m^2$  per Carlo che si trova a 5m di distanza dalla sorgente. Carlo si allontana fino a 15m di distanza. Qual è l'intensità del suono nella nuova posizione?**

L'intensità sonora è data dalla relazione

$$I = \frac{Potenza}{4\pi r^2}$$

Applicando la relazione per due distanze diverse si ha:

$$I_1 = \frac{Potenza}{4\pi r_1^2} \quad I_2 = \frac{Potenza}{4\pi r_2^2}$$

Introducendo i dati si trova:

$$I_2 = 2 \cdot 10^{-4} \frac{W}{m^2} \cdot \frac{25m^2}{225m^2} = 2,2 \cdot 10^{-5} W / m^2$$

4. In una discoteca, l'intensità energetica del suono, in un punto della pista da ballo è  $1,1 W/m^2$ . Qual è il livello sonoro corrispondente?

Il livello sonoro è legato all'intensità energetica del suono dalla relazione:

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

In cui  $I_0 = 10^{-12} W/m^2$

Introducendo l'intensità sonora si ha:

$$L = \log_{10} \frac{I}{I_0} = \log_{10} \frac{1,1 W / m^2}{10^{-12} W / m^2} = \log_{10} 1,1 \cdot 10^{12}$$

da cui si ricava

$$L = \log_{10} 1,1 + \log_{10} 10^{12} = 120,4 dB$$

5. Un altoparlante diffonde il suono in una sala affollata. In un punto della sala le onde sonore emesse dall'altoparlante producono un livello sonoro di 77dB

Sapendo che

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

si può scrivere:

$$77dB = 10 \log_{10} \frac{I_{alt}}{I_0}$$

ovvero

$$7,7B = \log_{10} \frac{I_{alt}}{10^{-12} W / m^2}$$

Perciò

$$7,7 = \log_{10} I_{alt} - \log_{10} 10^{-12}$$

e cioè

$$7,7 = \log_{10} I_{alt} + 12$$

Quindi

$$I_{alt} = 5,012 \cdot 10^{-5} W / m^2$$

Per il suono riflesso dalle pareti, si ha:

$$7,3bell = \log_{10} I_{ripl} + 12$$

Cioè

$$I_{ripl} = 1,995 \cdot 10^{-5} W / m^2$$

$$I_{tot} = 7,007 \cdot 10^{-5} W / m^2$$

Il livello sonoro corrispondente a questa intensità è:

$$L_{tot} = 7,85bell = 78,5dB$$

6. Un battello si sta avvicinando alla riva del mare a 8m/s, mentre la sua sirena fischia emettendo una frequenza di 300Hz. Qual è la frequenza percepita da una ragazza ferma sulla riva? Il battello giunge a riva, scarica la merce, riparte e si allontana alla stessa velocità, mentre la sirena fischia con la stessa frequenza. Qual è ora la frequenza percepita dalla ragazza?

Mentre il battello si avvicina, la ragazza sente un fischio a frequenza superiore a quella emessa. Si usa la seguente relazione:

$$f_R = f \cdot \frac{v}{v - v_B}$$

Introducendo i dati, si ottiene:

$$f_R = f \cdot \frac{v}{v - v_B} = 300Hz \cdot \frac{343m/s}{343m/s - 8m/s} = 307,16Hz$$

Quando il battello riparte e si allontana, la ragazza ode un fischio a frequenza inferiore a quella emessa:

$$f_R = f \cdot \frac{v}{v + v_B} = 300Hz \cdot \frac{343m/s}{343m/s + 8m/s} = 293,16Hz$$

## ESERCIZI PROPOSTI

1. Su una corda tesa lunga 15 m le onde si propagano a 75 m/s. Calcola la frequenza del modo normale numero 3
2. Su una corda tesa lunga 15 m le onde si propagano a 140 m/s. Calcola la frequenza del modo normale numero 5.
3. Nei concerti all'aperto sono utilizzati grandi diffusori acustici, detti comunemente casse, che assicurano grandi livelli di intensità sonora. A 1 m da un diffusore, l'intensità sonora può raggiungere  $1 \text{ W/m}^2$ . Calcola il livello di intensità sonora. A 10 m, l'intensità sonora si riduce di un fattore 100. Calcola il livello di intensità sonora.
4. Nei concerti all'aperto sono utilizzati grandi diffusori acustici, detti comunemente casse, che assicurano grandi livelli di intensità sonora. A 10 m da un diffusore, l'intensità sonora può raggiungere  $10^{-2} \text{ W/m}^2$ . Calcola il livello di intensità sonora. A 100 m, l'intensità sonora si riduce di un fattore 100. Calcola il livello di intensità sonora.
5. Pizzicando la corda di una chitarra lunga 60,0 cm si produce un'onda stazionaria con 8 nodi (estremi inclusi), formata da due onde che si propagano nelle due direzioni alla velocità di 120 m/s. Calcola la frequenza dell'onda stazionaria.
6. Pizzicando la corda di una chitarra lunga 60,0 cm si produce un'onda stazionaria con 10 nodi (estremi inclusi), formata da due onde che si propagano nelle due direzioni alla velocità di 120 m/s. Calcola la frequenza dell'onda stazionaria.
7. Un osservatore fermo misura la frequenza della sirena di un'auto della polizia che si avvicina e della stessa auto quando si allontana: trova una variazione dell'11%. Calcola la velocità dell'auto, che rimane costante durante la rilevazione (velocità del suono = 343 m/s).
8. Un osservatore fermo misura la frequenza della sirena di un'auto della polizia che si avvicina e della stessa auto quando si allontana: trova una variazione del 9,0%. Calcola la velocità dell'auto, che rimane costante durante la rilevazione (velocità del suono = 343 m/s).
9. La luce è un'onda elettromagnetica che viaggia a una velocità di  $3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ . La frequenza luminosa a cui l'occhio umano è più sensibile è quella della luce gialloverde, che ha una lunghezza d'onda di  $5,45 \times 10^{-7} \text{ m}$ . Qual è la frequenza di questa onda luminosa?
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. Una corda ha una massa di  $5,0 \times 10^{-3} \text{ kg}$  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?
14. 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.
15. 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?
16. 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  $6,00 \times 10^2 \text{ N}$ , mentre quella nel filo B è pari a  $3,00 \times 10^2 \text{ N}$ . 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?
17. 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  $1,2 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$ . 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?
18. 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.
19. 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  $\omega$  (in rad/s) del disco rotante?



20. 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?

21. La superficie media dell'orecchio di un adulto è di  $2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . L'intensità del suono che giunge all'orecchio durante una conversazione normale è di circa  $3,2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ . Calcola la potenza sonora che giunge sull'orecchio quando il suono arriva in direzione perpendicolare a esso.

22. Alla distanza di 3,8 m, l'intensità del suono emesso da una sirena è  $3,6 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ . Il suono si propaga uniformemente in tutte le direzioni. Calcola la potenza sonora totale emessa dalla sirena.

23. 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  $3,0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ . Qual è l'intensità del suono in un punto a una distanza di 78 m dall'altoparlante?

24. 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  $5,9 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ . Quanto tempo impiega il generatore per emettere 4800 J di energia sonora?

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

26. Un apparecchio acustico aumenta l'intensità sonora di 30 dB. Calcola di quale fattore aumenta l'intensità sonora.

27. 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  $9,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ . Calcola quanta energia sonora incide sul timpano durante quell'intervallo di tempo.

28. 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?

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

za del suono emesso dalla sorgente. A quale velocità stai viaggiando?

30. 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?

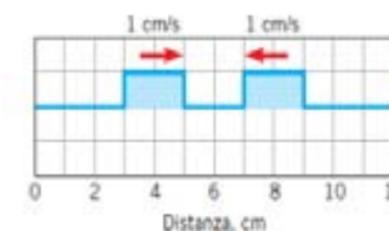
31. Il pilota di un aereo ultraleggero sta volando a 39 m/s. Un'aquila vola verso l'aereo a 18 m/s. Le velocità sono riferite al terreno. L'aquila emette un fischio a 340 Hz. Calcola la frequenza rilevata dal pilota.

32. 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?

33. 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?

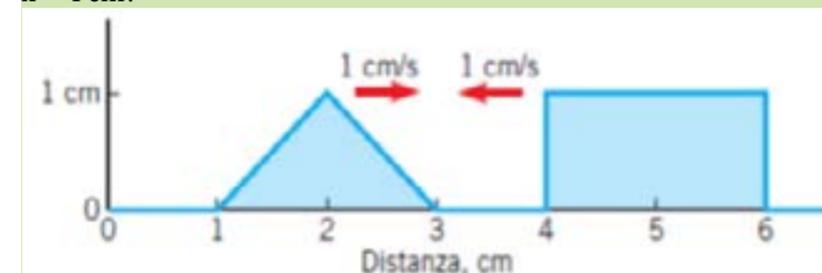
34. Una parte dell'onda emessa dal sottomarino A viene riflessa dal sottomarino B e ritorna al sottomarino A. Qual è la frequenza dell'onda riflessa rilevata dal sottomarino A?

35. 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  $t = 4 \text{ s}$

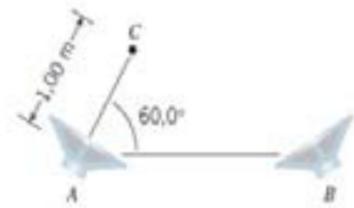


36. Due altoparlanti posti uno dietro l'altro emettono due onde sonore identiche con frequenza 245 Hz. Qual è la distanza minima a cui devono trovarsi i due altoparlanti perché un ascoltatore posto davanti a essi percepisca un'interferenza distruttiva? La velocità del suono è 343 m/s.

37. 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:  
 $x = 3 \text{ cm}$   
 $x = 4 \text{ cm}$ ?



38. 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.

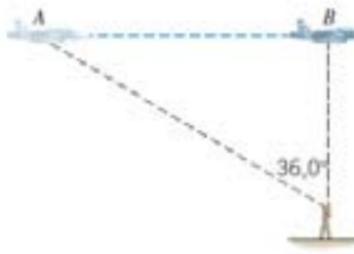


Calcola la minima distanza da A alla quale deve essere posto B perché l'ascoltatore non oda alcun suono.

39. 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.

40. La densità lineare della corda del la di un violino è  $7,8 \times 10^{-4}$  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.

41. 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?



42. 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?

43. 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)

44. 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)

45. 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  $3 \times 10^8$  m/s.
- E. in un mezzo elastico con velocità uguale a  $3 \times 10^8$  m/s.

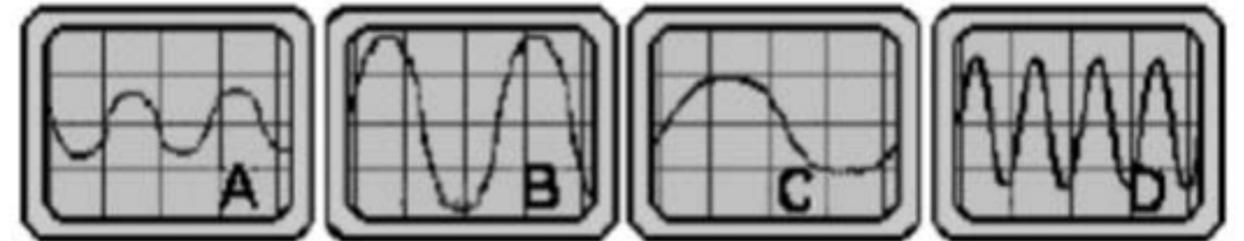
(Prova di ammissione al corso di laurea in Architettura e Ingegneria Edile, 2000-

2001)

46. Se un diapason vibra a 336 Hz qual è, approssimativamente, la lunghezza d'onda del suono prodotto? Si consideri l'aria in condizioni standard di temperatura e pressione.

- A. 0.1 m
- B. 1 m
- C. 4 m
- D. 10 m

47. Diversi suoni sono stati registrati con un microfono collegato ad un oscilloscopio. Quattro immagini dei segnali, ottenute senza modificare l'assetto dello strumento, sono riportate nella figura seguente: quale di esse corrisponde al suono col volume minore?



48. Un'onda si propaga lungo una lunga corda. Se la corda è costituita da due tratti, uno sottile e l'altro più grosso, nel punto di unione dei due l'onda cambierà

- I La sua frequenza
- II La sua velocità di propagazione.
- III La sua lunghezza d'onda.

Delle precedenti affermazioni sono corrette

- D. Solamente la II e la III .
- C. Solamente la I e la II .
- B. Solamente la II .
- A. Solamente la I .

49. Un treno viaggia alla velocità di 90Km/h quando emette un segnale acustico avente una frequenza  $f=500$ Hz. Si determini la frequenza percepita da un passeggero posto su un'auto che percorre una strada parallela alla rotaie alla velocità di 72Km/h nel verso opposto al treno

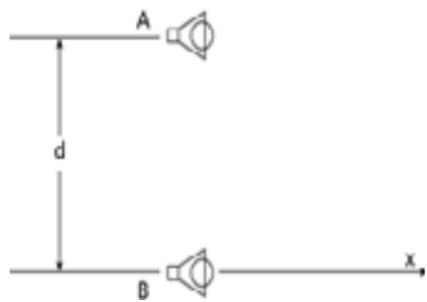
- a) Nella fase di avvicinamento
- b) Nella fase di allontanamento

[a)571Hz; b)438Hz]

50. Un vigile ode il clacson di un'auto in avvicinamento che emette un suono con frequenza  $f_1=1250$ Hz. Lo stesso suono viene percepito in allontanamento con frequenza  $f_2=1150$ Hz. Con semplici calcoli l'abile vigile verifica che l'auto superava il limite di 50Km/h. A che velocità viaggiava lo sventurato autista?

51. L'orecchio umano riesce a distinguere due suoni solo se giungono separati di almeno 1/10sec. Si determini la distanza minima alla quale deve trovarsi un ostacolo affinché Francesco possa percepire l'eco della propria voce.

52. Due altoparlanti A e B sono disposti, come in figura, a distanza  $d = 4$



m fra loro ed emettono, in fase, onde sonore con lunghezza d'onda di 1 m. Spostandosi lungo la semiretta x si noteranno alcuni minimi. Determinare quanti sono e in quali posizioni si notano i minimi. (Tratto dalle Olimpiadi italiane della Fisica, selezione regionale, 1992)

53. Una sorgente è ferma in un punto ed emette un'onda sonora di frequenza  $f_s$ . L'onda viene riflessa da un corpo che si sposta con velocità v verso la sorgente.

Dimostra che l'osservatore percepisce battimenti con una frequenza

$$f_o - f_s = \frac{2 v f_s}{v_a - v}$$

dove  $f_o$  è la frequenza del suono riflesso e  $v_a$  la velocità del suono nell'aria. Se la sorgente è uno strumento che emette un La a 440 Hz, calcola la nota che l'osservatore percepisce come proveniente dalla sorgente riflettente quando  $v = 10$  m/s.

54. Tre diverse onde sonore hanno frequenza n rispettivamente 10 Hz, 1000 Hz e 50 Mhz. Determinare le lunghezze d'onda corrispondenti ed i periodi di oscillazione, sapendo che la velocità del suono nell'aria è  $v=330$  m/s.

55. Quando un cane abbaia, sviluppa una potenza di circa 1 mW. 1) Qual è l'intensità sonora a una distanza di 5 m supponendo che tale potenza sia distribuita uniformemente in tutte le direzioni? 2) Qual è il livello d'intensità sonora a tale distanza? 3) Di quanto aumenterebbe tale livello se due cani abbaiaessero contemporaneamente, ciascuno con una potenza di 1 mW? ( $3,2 \times 10^{-6}$  W/m<sup>2</sup>, 65 dB, 3 dB)

56. Se il livello sonoro nell'aula risulta essere pari a 70 dB, qual è l'intensità del suono nell'aula? ( $1 \times 10^{-5}$  W/m<sup>2</sup>)

57. Se l'intensità di due onde sonore è rispettivamente  $I_A=0,1$  W/m<sup>2</sup> e  $I_B= 5$  W/m<sup>2</sup>, qual è la differenza tra i loro livelli di intensità sonora? (17 dB)

58. La frequenza del suono emesso dal motore di un'autovettura è circa uguale alla frequenza con cui gira il suo motore, visualizzata dal contagiri sul cruscotto. Se il motore della nuova Ferrari F60, mentre transita a 280 Km/h sul rettilineo davanti alle tribune centrali della pista di Monza, gira con una frequenza di 16 000 giri/minuto, determina quali frequenze sonore percepirà uno spettatore quando l'auto inizia a percorrere il rettilineo e quando lo termina. La velocità del suono nell'aria è di 1235 km/h. (347 Hz, 217 Hz)

59. Stando in piedi presso un incrocio, ascoltate una frequenza di 560 Hz proveniente dalla sirena di una autoambulanza che sta avvicinandosi. Dopo che è passata, la frequenza della sirena udita è 480 Hz. Determinare la velocità dell'autoambulanza in base a queste osservazioni. (26.4 m/s).

60. La sirena dell'antifurto di una casa ferma emette un suono di frequenza 5 kHz. Un motociclista prima si avvicina e poi si allontana dalla sirena alla velocità di 108 km/h. Calcolare le due frequenze del suono percepite dal motociclista e la loro variazione percentuale, sia in fase di avvicina-

mento che in fase di allontanamento. Si assuma come velocità del suono rispetto all'aria 340 m/s. (5441

Hz, 4560 Hz, 8,8%, 8,8 %)

61. Una moto che viaggia a 80 km/h suona il clacson, che emette un suono di frequenza 650 Hz. Un ciclista si avvicina a una velocità di 30 km/h. Qual è la frequenza udita dal ciclista? (708 Hz)

62. Un marinaio tiene un cavo teso lungo 180 cm con una tensione di 75 N. Esercita un impulso a un estremo del cavo il quale impiega un tempo di 0,6 secondi a raggiungere l'altro estremo. Determina la densità lineare del cavo e la sua massa. (8,3 kg/m; 15,3 kg)

63. Un meteorite esplose in volo prima di toccare il suolo. Supponi che il suono generato dallo scoppio arrivi a due osservatori. Il secondo osservatore che si trova a una distanza di 640 m dalla sorgente percepisce un'intensità sonora di 0,1 W/m<sup>2</sup>. Determina l'intensità del suono che arriva al primo osservatore che si trova ad una distanza di 160 metri dalla sorgente. (1,6 W/m<sup>2</sup>)

64. Ciascun altoparlante appoggiato alla parete di un impianto stereo di una discoteca all'aperto emette energia sonora con una potenza di 15 W. Se l'irradiazione avviene per onde emisferiche e si considera l'aria come mezzo non assorbente, qual è l'intensità che ciascuna sorgente sonora determina alla distanza di 10m e di 1.5 m? Qual è il corrispondente livello di intensità in decibel a tali distanze? ( $2,4 \times 10^{-2}$  W/m<sup>2</sup>, 1 W/m<sup>2</sup>, 104 dB, 120 dB)

65. Un pipistrello emette stridii di 52 kHz. Se esso vola verso una civetta ferma alla velocità di 10 m/s, qual è la frequenza del suono percepito dalla civetta? Se la civetta riflette il suono del pipistrello qual è la frequenza di tale suono riflesso percepito dal pipistrello? Assumere la velocità del suono rispetto all'aria pari a 330 m/s. (53608 Hz, 55216 Hz)

66. Un paracadutista mentre sta atterrando trasmette con un generatore audio un'onda sonora con una frequenza di 1800 Hz. Un suo amico al suolo al di sotto del paracadutista registra onde della frequenza di 2150 Hz. Determina:

- a) La velocità di discesa del paracadutista in km/h
- b) Con che frequenza riceverebbe il paracadutista le onde riflesse dal suolo? (201 km/h, 2500 Hz)

67. Un treno locale emette un fischio di frequenza 500 Hz mentre sta viaggiando con velocità di 180 km/h. Quali sono le frequenze percepite da un ascoltatore fermo A che vede avvicinarsi il treno e da un ascoltatore B, anch'esso fermo, che lo vede allontanarsi.

Un secondo treno Eurostar si avvicina sull'altro binario al treno locale con velocità di 360 km/h. Quali sono le frequenze del fischio del treno locale percepite da un osservatore C posto sull'Eurostar prima e dopo aver incrociato il primo treno? (585 Hz, 436 Hz, 759 Hz, 309 Hz)

68. Il tuo impianto Hi-Fi quando funziona una sola cassa acustica, fornisce un livello di 90 dB a 2 metri dalla cassa acustica.

- a) Qual è l'intensità del suono nella stanza?

- b) Qual è la potenza della cassa acustica?
- c) Se attivi anche la seconda cassa, qual è il livello di intensità sonora?
- d) Sapendo che la soglia del dolore è di 120 dB se invece di 2 casse ce ne fossero 20 avvertiremmo dolore? ( $10^{-3} \text{ W/m}^2$ ,  $5 \times 10^{-2} \text{ W}$ , 93 dB, 103 dB)

69. Un cavo lungo 360 cm è fissato ad una parete ad un'estremità. L'altra estremità è tenuta tesa da un oggetto di massa 10 kg. Eserciti una serie di impulsi a un estremo del cavo i quali impiegano un tempo di 80 centesimi di secondi a raggiungere l'altro estremo. Determina:

- a) La densità lineare del cavo e la sua massa.
- b) Di quale fattore aumenta la velocità delle onde se la massa dell'oggetto che tende il filo raddoppia?
- c) La lunghezza d'onda di questi impulsi se la loro frequenza è di 0,5 Hz ( $4,8 \text{ kg/m}$ ; 17,3 kg;  $\sqrt{2} \text{ v}$ ; 9m)

1 Il suono è:

- A un'onda longitudinale, generata da successive compressioni e rarefazioni del mezzo in cui il suono si propaga.  
 B un'onda trasversale, generata da successive compressioni e rarefazioni del mezzo in cui il suono si propaga.  
 C un'onda longitudinale, generata da successive zone di rumore e zone di silenzio del mezzo in cui si propaga.  
 D un'onda trasversale, generata da successive zone di rumore e zone di silenzio del mezzo in cui si propaga.

2. Stabilisci quale delle seguenti associazioni fra caratteristica del suono e grandezza fisica corrispondente è corretta:

- A altezza  frequenza, intensità  ampiezza  
 B altezza  intensità, frequenza  ampiezza  
 C altezza  ampiezza, intensità  frequenza  
 D altezza  timbro, intensità  ampiezza

3. Indicata con A la minima intensità sonora percepibile, l'intensità di livello sonoro B di un suono:

- A si misura in decibel e si calcola con la formula  $10 \log_{10} \frac{B}{A}$ .  
 B si misura in decibel e si calcola con la formula  $10 \log_{10} B$ .  
 C si misura in decibel e si calcola con la formula  $10 \log_{10} AB$ .  
 D si misura in watt e si calcola con la formula  $A \log_{10} B$ .

4. In un amplificatore è scritto "il rapporto segnale-rumore è 80 dB". Ciò significa che:

- A il segnale è 80 volte più intenso del rumore.  
 B il segnale è 80 volte meno intenso del rumore.  
 C il segnale è 1080 volte più intenso del rumore.  
 D il segnale è 108 volte più intenso del rumore.

5. Nella scala temperata:

- A il prodotto tra la frequenza di un semitono e quella del semitono precedente è  $\sqrt[12]{2}$ .  
 B il rapporto tra la frequenza di un semitono e quella del semitono precedente è  $\sqrt[12]{2}$ .  
 C il rapporto tra la frequenza di un semitono e quella del semitono seguente è  $\sqrt[12]{2}$ .  
 D la differenza tra la frequenza di un semitono e quella del semitono precedente è  $\sqrt[12]{2}$ .

6. La tastiera di un pianoforte è composta da tasti che corrispondono a semitoni. Se si suona il primo e il tredicesimo tasto a partire da destra si ottengono due suoni tali che il più acuto:

- A ha frequenza metà di quello più grave.  
 B ha frequenza 12 volte inferiore di quello più acuto.  
 C ha frequenza doppia di quello più grave.  
 D ha frequenza 7 volte superiore di quello più grave.

7. Un'onda stazionaria si propaga su una corda di lunghezza H. La lunghezza d'onda L del nodo normale numero k è:

- A  $L = 2 H/k$   
 B  $L = 2 k/H$   
 C  $L = H/(2k)$   
 D  $L = k/(2H)$

8. La corda di una chitarra viene pizzicata in modo da oscillare con la prima armonica. Se la corda viene tenuta ferma al centro, come cambia la frequenza della prima armonica?

- A Rimane invariata.  
 B Raddoppia.  
 C Si dimezza.  
 D Dipende dalla corda.

9. Due diapason vibrano alle frequenze rispettivamente di 440 Hz e 438 Hz. La frequenza dei battimenti percepiti è:

- A 878 Hz  
 B 439 Hz  
 C 2 Hz  
 D 1 Hz

10. Due onde sonore, aventi la stessa ampiezza, ma frequenza rispettivamente  $f_1$  e  $f_2$ , raggiungono un punto P dello spazio. In P si sente un suono che:

- A ha frequenza uguale alla media di  $f_1$  e  $f_2$  e intensità variabile nel tempo.  
 B ha frequenza uguale alla somma di  $f_1$  e  $f_2$  e intensità costante nel tempo.  
 C ha frequenza uguale alla differenza di  $f_1$  e  $f_2$  e intensità variabile nel tempo.  
 D ha frequenza uguale alla differenza di  $f_1$  e  $f_2$  e intensità costante nel tempo.

11. Una sorgente emette un suono di periodo T e si muove con velocità v verso un ricevitore fermo. Il ricevitore rileva i massimi dell'onda separati da un tempo  $T'$  tale che ( $v_s$  = velocità del suono):

- A  $T' = T v_s / (v_s - v)$   
 B  $T' = T v_s / (v_s + v)$   
 C  $T' = T (v_s - v) / v_s$   
 D  $T' = T (v_s + v) / v_s$

12. Un osservatore che si allontana a 20,0 m/s da una sorgente sonora ferma che emette un sibilo con frequenza 1200 Hz percepisce un suono di frequenza:

- A 1130 Hz  
 B 1180 Hz  
 C 1220 Hz  
 D 1242 Hz

13. Un pipistrello emette un breve suono acuto mentre vola vicino ad una casa. Dopo 0,5 s, ripassando per lo stesso punto, sente l'eco. Se la velocità del suono nell'aria è di 300 m/s quanto dista la casa dal pipistrello?

- A. 600      B. 300      C. 150      D. 75