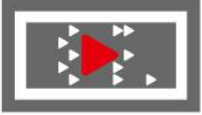


GUARDA!



-  **Animazione interattiva**
Onde longitudinali e trasversali
-  **Video In laboratorio**
Oscilloscopio e onde sonore
-  **Formule in 3 minuti**
-  **Risposte ai Fermati a pensare**

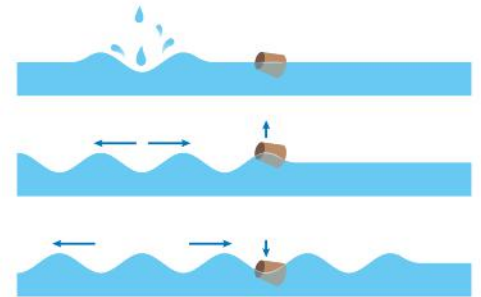
1 I moti ondulatori

Una goccia di pioggia che cade in una pozzanghera genera un'onda, fatta di increspature circolari che si allargano. In questo fenomeno si notano due moti distinti.

- La perturbazione si muove verso l'esterno in orizzontale.



- Un tappo che galleggia sull'acqua si sposta su e giù in verticale.



Come il tappo, anche la superficie dell'acqua oscilla su e giù, ma non si sposta verso l'esterno.

Il fatto che ogni parte della superficie attraversata dall'onda mantenga la propria posizione orizzontale indica che *l'onda non trasporta materia*. Invece *l'onda trasporta energia e quantità di moto*, perché mette in movimento, in verticale, zone della superficie dell'acqua via via più lontane.

Un'onda è una perturbazione che si propaga trasportando energia e quantità di moto, ma non materia.


Nel nostro esempio la superficie dell'acqua è il *mezzo materiale* in cui si propaga l'onda, mentre la goccia che cade è la sorgente dell'onda.

... Onde trasversali e longitudinali

Un'onda può prodursi anche lungo una corda tesa, se, per esempio, la corda viene scossa a un'estremità con una mano. In questo caso, la sorgente dell'onda è il movimento della mano e il mezzo materiale che sostiene la propagazione dell'onda è la corda.

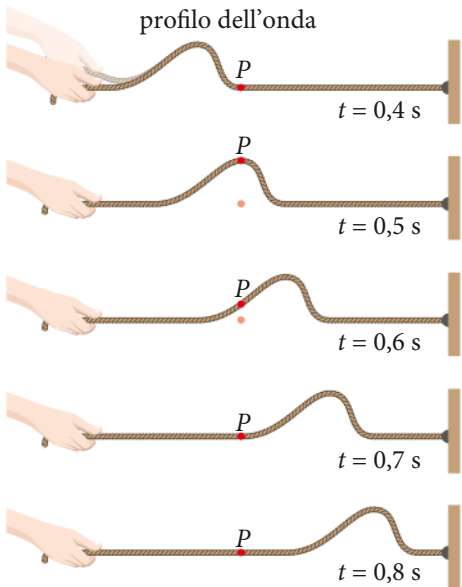


Marilyn F. Chilmad/SPL

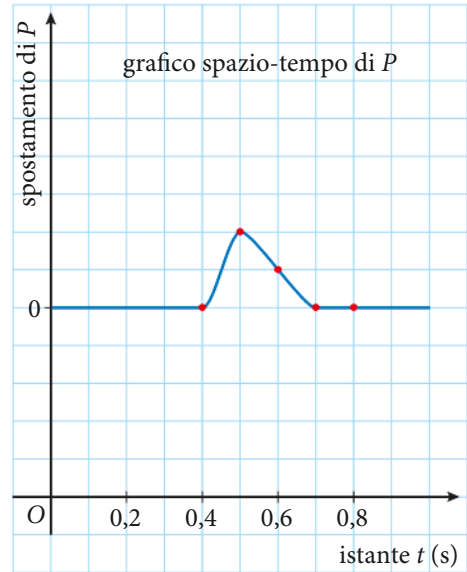
-  **Simulazione PhET (nell'eBook)**
Onde: introduzione

-  **Animazione interattiva**
Onde longitudinali e trasversali
-  **Simulazione PhET (nell'eBook)**
Onde sulle corda

■ Se la corda è orizzontale e la mano si muove su e giù, la deformazione che si crea nella corda giace sul piano verticale, ma si sposta in orizzontale.



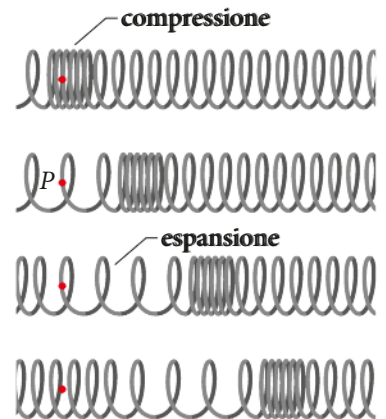
■ Mentre l'onda si propaga, ciascun punto della corda va su e giù, cioè ripete il moto che la mano ha impresso al punto estremo.



Poiché il moto dei punti della corda è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda (e di trasporto dell'energia e della quantità di moto), l'onda è detta *trasversale*.

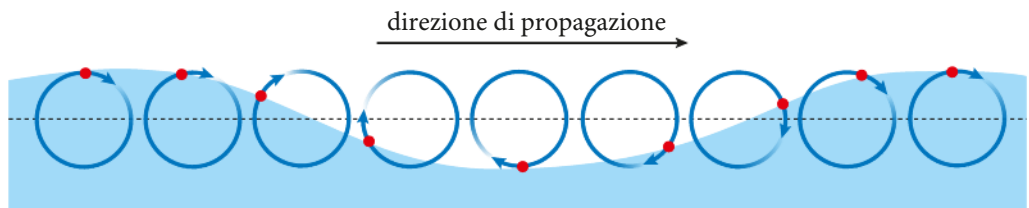
Lungo una molla può propagarsi un'onda con proprietà diverse. Se un'estremità della molla è spostata rapidamente avanti e indietro, le spire prima si avvicinano, poi si allontanano e infine tornano nella configurazione iniziale. L'onda che percorre la molla consiste nella compressione e nella successiva espansione delle spire.

Notiamo che le spire della molla si spostano in avanti lungo la direzione di propagazione dell'onda, ma tornano sempre indietro. Neanche in questo caso, quindi, l'onda trasporta materia. Poiché ogni punto della molla oscilla nella stessa direzione in cui avanzano l'energia e la quantità di moto, l'onda è definita *longitudinale*.



In un'onda **trasversale** gli elementi del mezzo materiale si spostano in una direzione perpendicolare a quella lungo cui si propaga l'onda; in un'onda **longitudinale** si spostano nella stessa direzione dell'onda.

Le onde del mare sono generate dai venti che sfiorano la superficie dell'acqua e sono allo stesso tempo trasversali e longitudinali. In queste onde ogni volumetto d'acqua descrive una traiettoria circolare: mentre si alza e si abbassa, si sposta anche avanti e indietro.

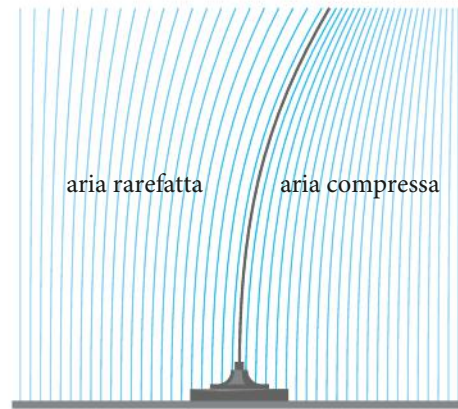


Il movimento circolare avviene dove l'acqua è profonda. In prossimità della riva le onde si infrangono perché il fondo è vicino.

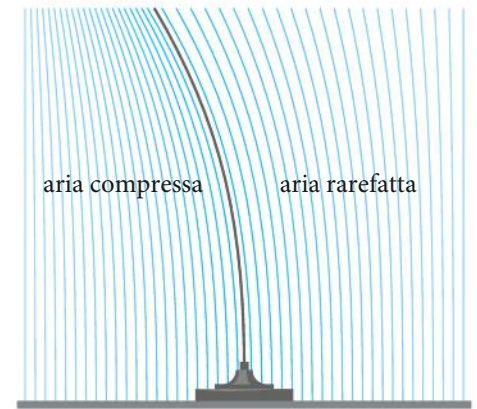
Il suono e altri tipi di onde

Una lamina che vibra perturba l'aria circostante e produce un suono.

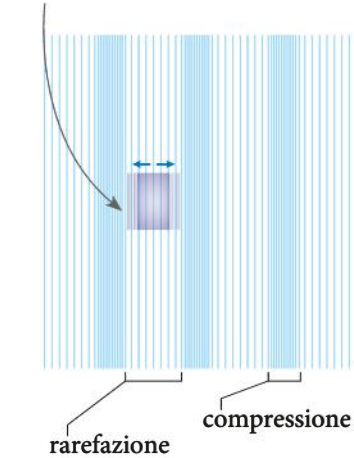
■ Quando la lamina si sposta verso destra, l'aria si comprime a destra e si rarefa a sinistra.



■ Quando, viceversa, la lamina si sposta verso sinistra, l'aria si comprime a sinistra e si rarefa a destra.



oscillazione del singolo
volumetto d'aria



La vibrazione della lamina produce zone di *compressione* e zone di *rarefazione* che si trasmettono a strati d'aria via via più lontani. Ogni volumetto d'aria investito dall'onda oscilla avanti e indietro lungo la direzione di propagazione. Quindi:

il **suono** è un'onda longitudinale, fatta dall'alternarsi di compressioni e rarefazioni del mezzo in cui si propaga.

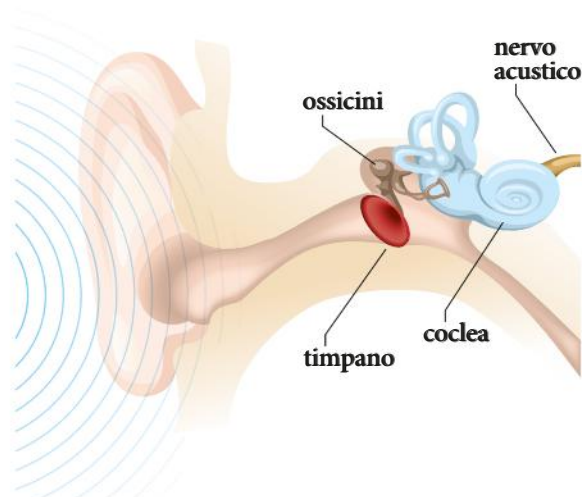
Ogni onda sonora ha come sorgente un corpo che vibra: il suono di una **batteria** è prodotto dalle vibrazioni dei piatti e delle membrane dei tamburi e la voce è prodotta dalle vibrazioni delle *corde vocali*.

Quando poi giunge all'orecchio, l'onda sonora mette in vibrazione il timpano e innescia il processo uditivo. Il timpano è una membrana che trasmette le sue vibrazioni agli ossicini dell'orecchio e poi al liquido contenuto nella coclea. Questi movimenti fanno partire il segnale che il nervo acustico conduce al cervello.

Anche in un microfono il suono fa vibrare una membrana, il cui movimento è convertito in un segnale elettrico.



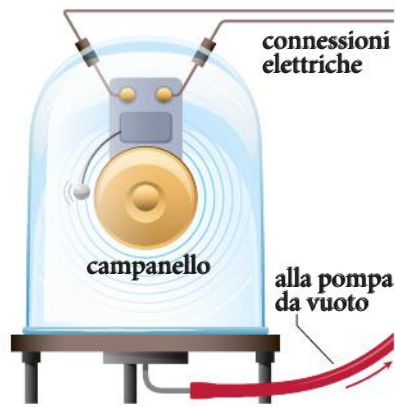
Master1305/Shutterstock



Oltre che nell'aria, le onde sonore possono viaggiare nell'acqua, attraverso il terreno e gli altri mezzi solidi, ma non si propagano nel vuoto.

Se poniamo un campanello elettrico sotto una campana di vetro collegata a una pompa da vuoto, possiamo verificare che il suono del campanello si affievolisce fino ad annullarsi, a mano a mano che viene estratta l'aria.

L'impossibilità di attraversare il vuoto indica che le onde sonore sono *onde meccaniche*. Sono onde meccaniche anche quelle sismiche, che viaggiano attraverso le rocce e il terreno durante un terremoto, e quelle del mare.



Un'onda meccanica è un'onda che ha bisogno di un mezzo materiale (solido, liquido o aeriforme) per propagarsi.

Un altro esempio di onda è la luce, che però non è un'onda meccanica perché può propagarsi nel vuoto, per esempio nello spazio privo di materia tra il Sole e la Terra.

La luce è un'onda elettromagnetica, come lo sono le *onde radio*, le *microonde*, le *radiazioni infrarosse* e *ultraviolette*, i *raggi X*: in questo tipo di onde, le grandezze fisiche che variano nello spazio e nel tempo e che trasmettono energia sono il campo elettrico e il campo magnetico.

Fronti d'onda e raggi

Se facciamo scoppiare un petardo, l'onda sonora prodotta si propaga in tutte le direzioni, facendo variare la pressione e la densità dell'aria da un istante all'altro e da un punto all'altro. Tutti i punti che si trovano a una stessa distanza dallo scoppio sono investiti dall'onda nello stesso istante e formano un *fronte d'onda*.

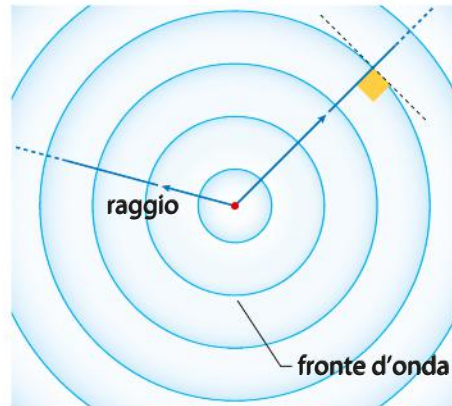
Un **fronte d'onda** è un insieme di punti in cui le grandezze che variano al passaggio dell'onda hanno lo stesso valore in ogni istante.

L'onda sonora del petardo è un'onda sferica, perché i suoi fronti d'onda hanno la forma di sfere concentriche. Tuttavia, come mostra la figura seguente, a grande distanza dal punto di origine ogni piccola porzione di un fronte d'onda coincide quasi con una superficie piana. Quindi, molto lontano dalla sorgente, un'onda sferica può essere localmente descritta come un'onda piana, con fronti d'onda piani e paralleli.

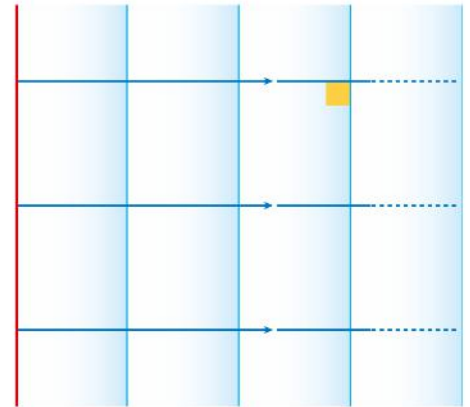


Le rette perpendicolari ai fronti d'onda sono dette **raggi** e indicano, in ogni punto, la direzione lungo cui si propaga l'onda.

■ In un'onda sferica, che si propaga in tutte le direzioni, i raggi sono semirette uscenti dalla sorgente.



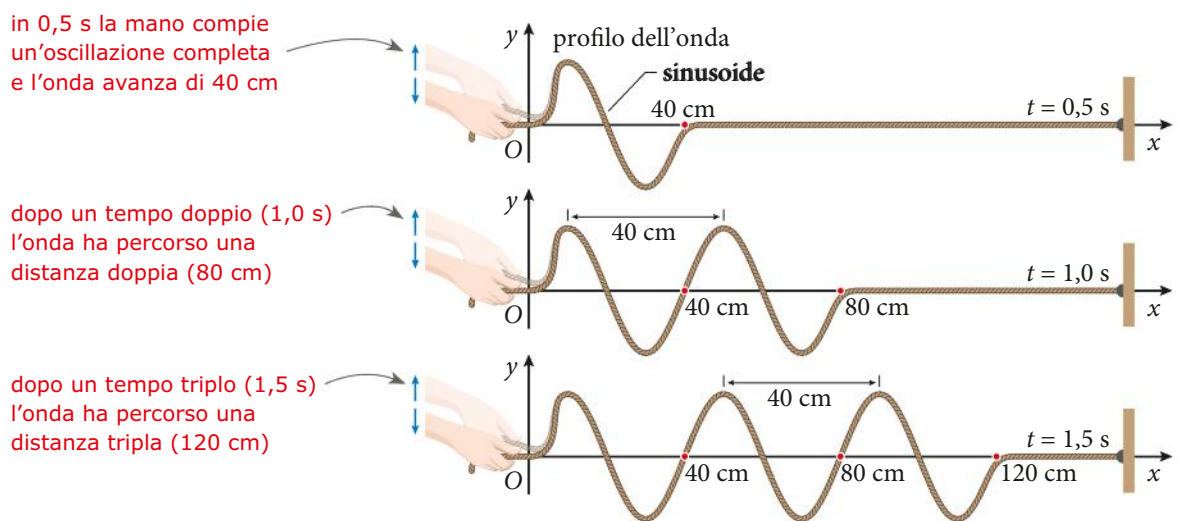
■ In un'onda piana, che viaggia in un'unica direzione, i raggi sono paralleli tra loro.



2 Le onde periodiche

Immaginiamo di scuotere molte volte con la mano un'estremità di una corda tesa, senza mai cambiare ritmo. Supponiamo di compiere un moto armonico con periodo di 0,5 s.

Mentre la mano si muove, un'onda si propaga lungo la corda, nella direzione x , e ogni pezzetto di corda raggiunto dall'onda oscilla nella direzione y . Qui sotto, la corda è rappresentata a tre istanti diversi.

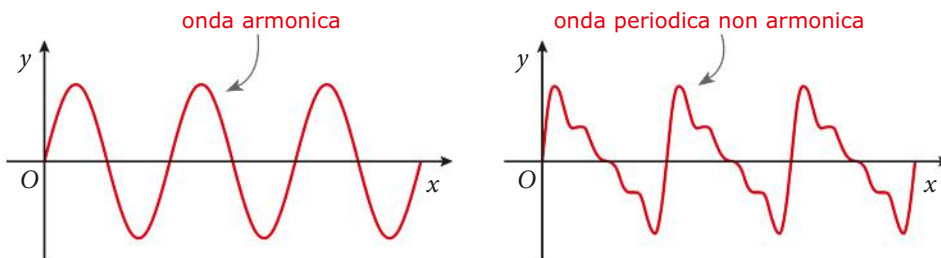


In qualsiasi tipo di onda si ha una grandezza y che varia con il tempo t e con la posizione x . Il grafico di y in funzione di x , disegnato per un istante t fissato, è chiamato **profilo dell'onda**.

Al profilo dell'onda che si forma lungo la corda, ogni oscillazione completa della mano aggiunge uno stesso tratto di sinusoidale, composto da un arco incurvato verso il basso e un arco simmetrico incurvato verso l'alto. Per la regolarità di questo andamento, l'onda generata dall'oscillazione della mano è detta *periodica*.

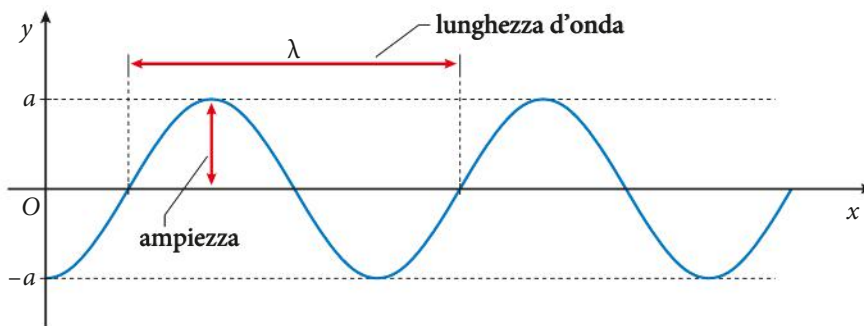
Un'onda **periodica** è un'onda la cui sorgente compie un moto periodico e il cui profilo si ripete identico a distanze regolari.

Se la sorgente oscilla di moto armonico, allora l'onda ha un profilo sinusoidale ed è chiamata **onda armonica**. Tutte le onde armoniche sono periodiche, ma non tutte le onde periodiche sono armoniche.



La lunghezza d'onda e l'ampiezza

Nella figura che segue sono indicate la *lunghezza d'onda* e l'*ampiezza*, due grandezze che caratterizzano ogni onda periodica.



La **lunghezza d'onda** λ è la minima distanza dopo la quale il profilo di un'onda periodica torna a riprodursi identico a sé stesso.

Nel profilo dell'onda, due massimi (o due minimi) consecutivi sono separati da una distanza λ . Nel precedente esempio della corda si ha $\lambda = 40$ cm.

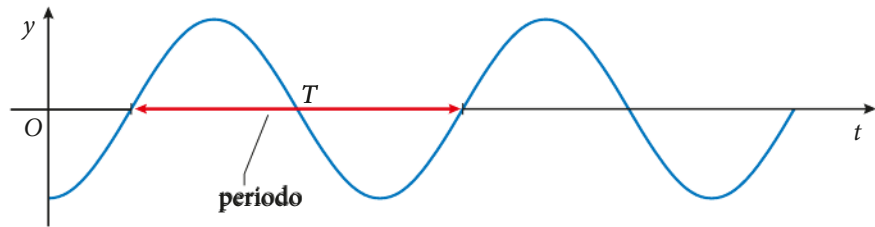
L'**ampiezza** a di un'onda periodica è la differenza tra il valore massimo della grandezza oscillante y e il suo valore di equilibrio.

Le onde del mare, nel loro insieme, formano un'onda periodica: se le loro creste distano 3 m l'una dall'altra, la lunghezza d'onda è di 3 m; se sono sollevate di 1 m rispetto al livello imperturbato dell'acqua, l'ampiezza è di 1 m.



Il periodo e la frequenza

Il grafico qui riportato descrive l'andamento temporale di un'onda armonica in un dato punto.



In un punto x fissato lungo la direzione di propagazione di un'onda periodica, la grandezza y oscilla con moto periodico in funzione del tempo t : il periodo T dell'onda è la durata di un'oscillazione completa di y al variare di t .

La **frequenza** f è il numero di oscillazioni che l'onda compie in punto fissato nell'unità di tempo, cioè in 1 s.

Come sappiamo dalla meccanica, la frequenza è misurata in s^{-1} , cioè in hertz (Hz), e la sua relazione con T è $f = 1/T$. Nell'esempio della corda il periodo è 0,5 s e la frequenza è 2 Hz.

Il periodo e la frequenza di un'onda periodica sono uguali al periodo e alla frequenza con cui oscilla la sorgente dell'onda.

FERMATI A PENSARE

Sei seduto all'estremità di un pontile sul mare e osservi le creste d'onda che oltrepassano il pilone sotto di te.

► Se in 30 s ne conti 6, qual è la frequenza delle onde?

La velocità di propagazione

Nell'intervallo di tempo di un periodo T , un'onda periodica percorre la distanza di una lunghezza d'onda λ ; quindi la **velocità di propagazione** dell'onda è

VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE IN FUNZIONE DI LUNGHEZZA D'ONDA E PERIODO

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

velocità di propagazione (m/s) — v — lunghezza d'onda (m) — λ — periodo (s) — T
[1]

o anche, per la relazione tra periodo e frequenza,

VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE IN FUNZIONE DI LUNGHEZZA D'ONDA E FREQUENZA

$$v = \lambda f$$

velocità di propagazione (m/s) — v — lunghezza d'onda (m) — λ — frequenza (Hz) — f
[2]

Dalle leggi della meccanica si può dimostrare che:

la velocità di propagazione dipende dalle proprietà del mezzo materiale attraversato dall'onda.

Di conseguenza, poiché il periodo T o la frequenza f sono determinati solo dal moto della sorgente, dall'equazione [1] o dalla [2] si vede che anche la lunghezza d'onda dipende dal mezzo.

La velocità v di un'onda lungo una corda tesa dipende dal rapporto tra l'intensità F_T della forza di tensione e la densità lineare d_L della corda, che per una corda omogenea è il rapporto tra la massa m e la lunghezza L :

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{d_L}} = \sqrt{\frac{F_T L}{m}} \quad [3]$$

La formula di v mostra che l'onda è tanto più veloce quanto più la corda è tesa e tanto più lenta quanto maggiore è la densità lineare, cioè l'inerzia della corda.

PER ESEMPIO

Una fune di acciaio di lunghezza uguale a 1,86 m e massa uguale a 390 g è tesa da una forza di 961 N.

► Calcola la velocità delle onde meccaniche lungo la fune.

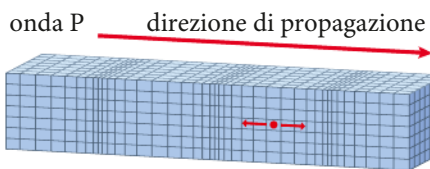
Risoluzione

Dalla formula [3] troviamo:

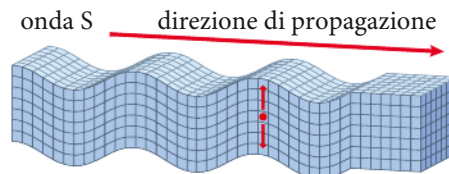
$$v = \sqrt{\frac{(961 \text{ N})(1,86 \text{ m})}{0,390 \text{ kg}}} = 67,7 \sqrt{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \frac{\text{m}}{\text{kg}}} = 67,7 \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 67,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocità di propagazione di un'onda attraverso un mezzo dipende anche dal tipo di onda. Nel sottosuolo, per esempio, possono propagarsi onde sismiche longitudinali, chiamate onde P (primarie), e onde sismiche trasversali, chiamate onde S (secondarie).

■ Le onde P sono più veloci; attraverso il granito viaggiano a circa 5 km/s.



■ Le onde S si propagano nel granito con una velocità di circa 3 km/s.



La velocità del suono e l'eco

La velocità di propagazione del suono cambia da un mezzo a un altro e, per un dato mezzo, dipende dalla temperatura e dalla pressione. Gli esperimenti mostrano che:

in aria secca, alla pressione atmosferica normale di $1,01 \times 10^5$ Pa e alla temperatura di 0°C , il suono si propaga con una velocità di 332 m/s; a temperatura ambiente, invece, si propaga con una velocità circa uguale a 340 m/s.

➔ FERMATI A PENSARE

La luce è talmente veloce che la sua propagazione attraverso distanze non astronomiche è quasi istantanea.

- ▶ Se vediamo un fulmine e dopo 3 s sentiamo il tuono, quanto dista da noi, all'incirca, il temporale?
- ▶ E se il ritardo del tuono dal fulmine è doppio o triplo?

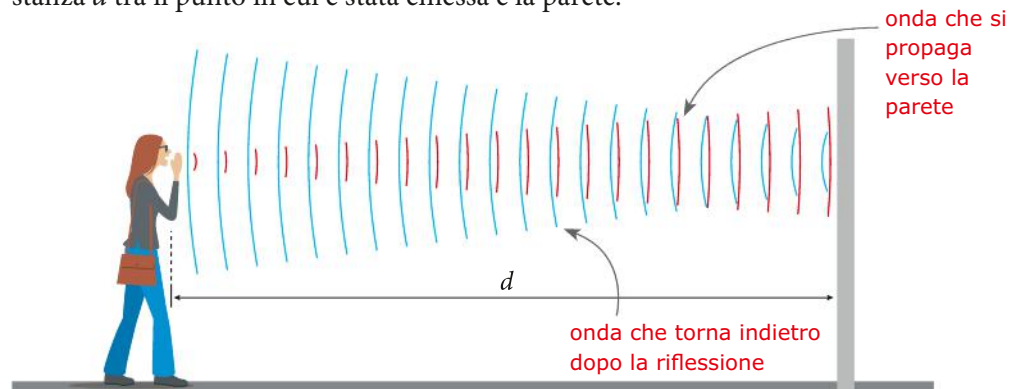
Nell'acqua il suono è oltre 4 volte più veloce che nell'aria e nel ferro è 15 volte più veloce (tabella). Rispetto alla luce, che viaggia a 300 000 km/s, il suono è molto lento: ciò spiega perché vediamo il fulmine prima di sentire il tuono ➔.

VELOCITÀ DEL SUONO IN DIVERSI MEZZI MATERIALI		
Mezzo	Temperatura (°C)	Velocità (m/s)
Aria	0	332
Acqua	15	1450
Piombo	20	1230
Ferro	20	5130
Granito	20	4000
Gomma vulcanizzata	0	54

Qualsiasi onda, meccanica o elettromagnetica, si riflette quando incontra un confine del mezzo in cui si propaga.

La riflessione di un'onda sonora può produrre l'eco.

Quando la voce si riflette su una parete e torna indietro, essa percorre due volte la distanza d tra il punto in cui è stata emessa e la parete.



Per compiere questo cammino alla velocità di propagazione v , la voce impiega il tempo

$$\Delta t = \frac{2d}{v} \quad [4]$$

Per esempio, per $d = 20$ m e $v = 340$ m/s, l'eco viene udita dopo un tempo poco maggiore di un decimo di secondo:

$$\Delta t = \frac{2(20 \text{ m})}{340 \text{ m/s}} = 0,12 \text{ s}$$

L'orecchio umano percepisce due suoni in modo distinto se essi sono separati da almeno un decimo di secondo. Poiché in questo tempo un'onda sonora percorre 34 m, per sentire l'eco della propria voce una persona deve trovarsi a più di 17 m (la metà di 34 m) dalla parete riflettente.

La riflessione delle onde sonore è sfruttata nell'ecografia, per costruire immagini degli organi interni e anche per tenere sotto osservazione lo sviluppo del feto; inoltre è sfruttata nel *sonar*, lo strumento nautico che calcola la profondità del fondale o la distanza dei corpi sommersi dalla misura del ritardo dell'eco.



GagliardiPhotography/Shutterstock

3 Le caratteristiche delle onde sonore

Un *rumore* è un'onda sonora non periodica, che varia in modo irregolare; un *suono* propriamente detto è un'onda sonora periodica. Ogni suono ha tre caratteristiche: l'*altezza*, l'*intensità* e il *timbro*.

L'*altezza* distingue un suono più acuto da uno più grave e dipende dalla frequenza dell'onda: più la frequenza è grande, più il suono è acuto (o alto).

La frequenza determina i **limiti di udibilità** di un suono:

- per poter essere percepita dall'uomo, un'onda sonora deve avere una frequenza compresa tra 20 Hz e 20 000 Hz;
- le onde sonore con frequenze inferiori a 20 Hz sono dette *infrasuoni*;
- quelle con frequenze superiori a 20 000 Hz sono dette *ultrasuoni*.

Gli infrasuoni e gli ultrasuoni sono percepiti da alcuni animali. Per esempio, le frequenze sonore a cui sono sensibili i pipistrelli arrivano fino ai 120 000 Hz.

FERMATI A PENSARE

- ▶ In uno stesso mezzo materiale, sono maggiori le lunghezze d'onda degli infrasuoni o quelle degli ultrasuoni?

L'*intensità* distingue un suono forte, o ad alto volume, da uno debole, o a basso volume.

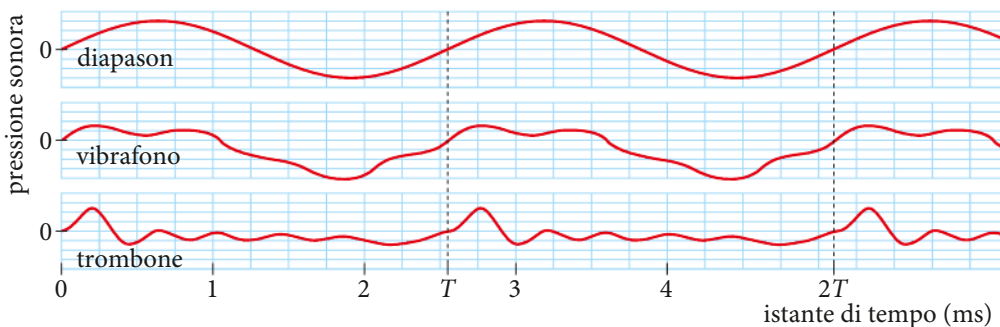
L'*intensità* cresce con l'ampiezza dell'onda. Un'onda sonora di ampiezza maggiore crea compressioni e rarefazioni dell'aria più marcate, ossia trasporta più energia; quindi è un suono che si ode meglio.

Il *timbro* differenzia le onde sonore in base alla particolare forma del loro profilo o, in modo equivalente, in base alla legge periodica con cui, in un dato punto, esse oscillano nel tempo.

Ogni strumento musicale ha un proprio timbro, che corrisponde a un diverso tipo di onda periodica. La figura che segue mostra gli andamenti temporali delle onde emesse, rispettivamente, da un diapason, un vibrafono e un trombone. Le tre onde hanno lo stesso periodo di 2,6 ms (nota sol).



Video In laboratorio
Oscilloscopio
e onde sonore



Le note musicali

L'alfabeto della musica è una sequenza di sette note, che si ripetono a intervalli di un'ottava:

- ogni **nota** è un suono di diversa frequenza;
- l'**intervallo** tra due note (nella terminologia musicale) è il *rapporto* tra le loro frequenze;
- un'**ottava** è l'intervallo di valore 2 che separa un do dal do precedente (o qualunque altra nota dalla nota precedente di uguale nome).

do	$\frac{9}{8}$
re	$\frac{10}{9}$
mi	$\frac{16}{15}$
fa	$\frac{9}{8}$
sol	$\frac{10}{9}$
la	$\frac{9}{8}$
si	$\frac{16}{15}$
do	

Quindi, ogni do che ricomincia la sequenza delle sette note ha frequenza doppia rispetto al do che viene prima, ogni re ha frequenza doppia rispetto al re della sequenza precedente e così via. Le frazioni elencate nella tabella sono gli intervalli tra note consecutive nella cosiddetta **scala naturale**: partendo dal la naturale, a cui è assegnata la frequenza di 440 Hz, e moltiplicando la frequenza di ogni nota per la frazione corrispondente, si ottiene la frequenza della nota che segue.

L'intervallo più piccolo della tabella vale $\frac{16}{15} \approx 1,067$ e rappresenta un *semitono*, mentre gli intervalli più grandi, $\frac{10}{9} \approx 1,111$ e $\frac{9}{8} \approx 1,125$, rappresentano entrambi un *tono*, che corrisponde a due semitoni. L'intera ottava, che conta 5 toni e 2 semitoni, è composta da $5 \times 2 + 2 = 12$ semitoni.

La **scala temperata** assegna ai semitoni un valore fisso k , cioè elimina le irregolarità della scala naturale.

Detta f_0 la frequenza di un do, la frequenza successiva della scala temperata (quella del do diesis) è $f_1 = k f_0$ e quella ancora successiva (del re) è $f_2 = k f_1 = k^2 f_0$. Dodici semitoni al di sopra del do di partenza si trova un altro do, la cui frequenza è $f_{12} = k^{12} f_0$. Poiché, per come è definita un'ottava, f_{12} è uguale a $2f_0$, si ha:

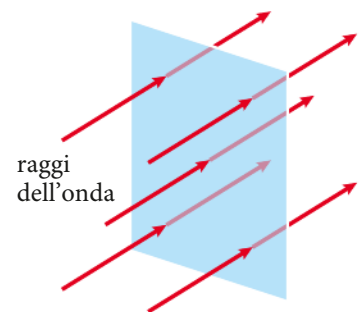
$$2 f_0 = k^{12} f_0 \Rightarrow k = \sqrt[12]{2} \approx 1,059$$

...

L'intensità di un'onda sonora

Un'onda sonora trasporta energia parallelamente ai raggi, cioè lungo la direzione di propagazione. Per definire l'intensità dell'onda dobbiamo considerare una superficie perpendicolare ai raggi.

L'**intensità** I di un'onda sonora nei punti di una superficie di area A , perpendicolare alla direzione di propagazione, è data dall'energia E che l'onda trasporta sulla superficie in un intervallo di tempo Δt , divisa per A e per Δt :



INTENSITÀ DI UN'ONDA SONORA

intensità sonora (W/m^2)

energia (J)

$$I = \frac{E}{A \Delta t}$$

area (m^2)

intervallo di tempo (s)

[5]

Poiché il rapporto $E/\Delta t$ è la potenza P che investe la superficie, una definizione equivalente è

$$I = \frac{P}{A} \quad [6]$$

intensità sonora (W/m^2)
potenza (W)
area (m^2)

RELAZIONE TRA INTENSITÀ, POTENZA E AREA

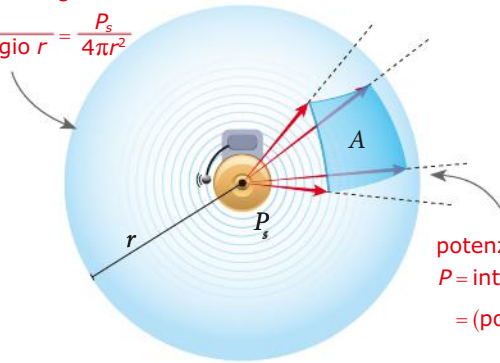
L'unità di misura dell'intensità sonora I è il joule al metro quadrato al secondo, cioè il watt al metro quadrato:

$$1 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Sappiamo per esperienza che anche un suono assordante, come quello di una campana, si attenua con la distanza. Per studiare questo fenomeno, supponiamo che la sorgente sia puntiforme e osserviamo la figura che segue: l'onda sonora si propaga in tutte le direzioni e, se non incontra ostacoli, distribuisce la propria energia in modo uniforme su fronti d'onda sferici via via più grandi.

intensità sonora a distanza r dalla sorgente:

$$I = \frac{\text{potenza emessa}}{\text{area del fronte d'onda di raggio } r} = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$



potenza trasportata su una porzione del fronte d'onda:
 $P = \text{intensità} \times (\text{area della porzione}) =$
 $= (\text{potenza emessa}) \times \frac{\text{area della porzione}}{\text{area del fronte d'onda}} = P_s \frac{A}{4\pi r^2}$

La sorgente sviluppa una potenza costante P_s , che l'onda, a distanza r , porta in direzione perpendicolare attraverso una superficie di area $4\pi r^2$. Quindi, per la [6], vale la formula

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2} \quad [7]$$

Questo risultato mostra che:

l'intensità I dell'onda sonora generata da una sorgente puntiforme è inversamente proporzionale al quadrato della distanza r dalla sorgente.

Nella figura è evidenziata una superficie di area A , che costituisce una porzione del fronte d'onda sferico di raggio r e quindi è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda in ogni punto. Per le formule [6] e [7], la potenza sonora P che giunge su questa superficie è

$$P = IA = P_s \frac{A}{4\pi r^2} \quad [8]$$

Osserviamo che P sta alla potenza totale P_s emessa dalla sorgente nello stesso rapporto in cui A sta all'area totale del fronte d'onda di raggio r .

$$[8] P = IA = P_s \frac{A}{4\pi r^2}$$

➔ FERMATI A PENSARE

L'intensità sonora vale I_1 a distanza r_1 da una sorgente puntiforme e vale I_2 a distanza r_2 .

► Dimostra l'equazione

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Sfruttando la formula [8], possiamo infine calcolare l'energia E trasportata dall'onda sonora in un intervallo di tempo Δt sulla porzione di fronte d'onda considerata ➔:

$$E = P\Delta t = P_s \frac{A}{4\pi r^2} \Delta t \quad [9]$$

Il livello di intensità sonora e i decibel

La percezione del suono non è direttamente proporzionale all'intensità I dell'onda sonora che ci giunge all'orecchio, ma varia con I secondo una scala logaritmica. Il **livello di intensità sonora** L_s è una misura della sensazione uditiva, espressa in **decibel** (dB) dalla seguente formula, in cui $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ è l'intensità minima rilevabile dall'orecchio umano:

LIVELLO DI INTENSITÀ SONORA

livello di intensità
sonora (dB)

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

intensità (W/m²)

minima intensità
percepibile (W/m²)

[10]

In base a questa definizione, il numero di decibel che indica il valore di L_s è un numero puro.

Il logaritmo decimale di un numero reale x è l'esponente al quale si deve elevare 10 per ottenere come risultato x :

$$y = \log_{10} x \Leftrightarrow 10^y = x$$

Perciò,

$$\log_{10} 1 = 0, \quad \log_{10} 10 = 1, \quad \log_{10} 100 = 2 \dots$$

Per queste proprietà del logaritmo, dalla [10] segue che il valore di 0 dB corrisponde alla minima intensità percepibile I_0 , cioè rappresenta il livello di intensità sonora della *soglia di udibilità*.

PER ESEMPIO

Sui timpani di un'atleta l'intensità del suono emesso dal fischietto dell'allenatore vale $I = 3,47 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$.

► Determina il livello di intensità sonora percepito dall'atleta.

Risoluzione

Il livello di intensità sonora si calcola dalla formula [9]:

$$\begin{aligned} L_s &= 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{3,47 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2}{1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \text{ dB} = \\ &= 10 \log_{10}(3,47 \times 10^9) \text{ dB} = 10 \times 9,54 \text{ dB} = \mathbf{95,4 \text{ dB}} \end{aligned}$$

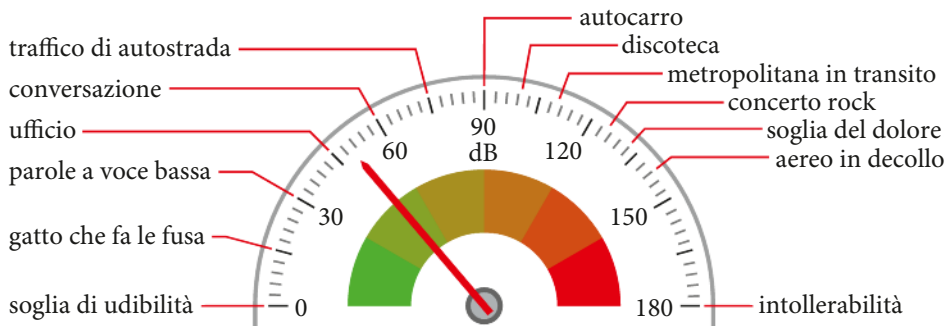
FERMATI A PENSARE

Quando l'intensità dell'onda sonora vale I_1 il corrispondente livello di intensità sonora vale $L_{s,1}$.

► Quanto vale il livello dell'intensità sonora $L_{s,2}$ quando l'intensità dell'onda vale $I_2 = 100 I_1$?

Suggerimento: vale l'identità $\log_{10}(xy) = \log_{10}x + \log_{10}y$

I 130 dB sono chiamati *soglia del dolore*. I suoni e i rumori che hanno questo livello di intensità trasportano un'energia 10^{13} volte più grande di quelli con intensità di soglia. L'esposizione prolungata a livelli sonori superiori ai 100 dB può danneggiare l'udito in modo permanente.



PROBLEMA MODELLO 1 Dalla potenza al livello di intensità sonora

Lucia e Anna hanno selezionato la loro canzone preferita da lettori MP3 identici, di potenza 0,50 mW, allo stesso volume di ascolto. Lucia usa le cuffie, che hanno un diametro di 90 mm, mentre Anna usa auricolari con diametro di 10 mm.

- ▶ Calcola l'intensità dell'onda sonora prodotta nei due casi.
- ▶ Calcola la differenza tra i livelli di intensità sonora (in dB) percepiti dalle due ragazze.

ANALISI

DATI

- Diametro delle cuffie: $d_c = 90$ mm
- Diametro degli auricolari: $d_a = 10$ mm
- Potenza sonora: $P = 0,50$ mW

INCOGNITE

- Intensità sonora prodotta dalle cuffie: $I_c = ?$
- Intensità sonora prodotta dagli auricolari: $I_a = ?$
- Differenza di livello sonoro (in dB): $\Delta L = ?$

RISOLUZIONE

■ CALCOLIAMO LE INTENSITÀ SONORE PRODOTTE DALLE CUFFIE E DAGLI AURICOLARI

$$I_c = \frac{P}{A_c} = \frac{0,50 \times 10^{-3} \text{ W}}{\pi (4,5 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 0,079 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$I_a = \frac{P}{A_a} = \frac{0,50 \times 10^{-3} \text{ W}}{\pi (5,0 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 6,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Gli auricolari producono un'intensità sonora maggiore rispetto alle cuffie, perché trasmettono la stessa potenza attraverso una superficie di area minore.

- ##### ■ CALCOLIAMO LA DIFFERENZA TRA I DUE LIVELLI DI INTENSITÀ SONORA
- Esprimiamo tramite la [10] i due livelli di intensità L_a e L_c che corrispondono alle intensità I_a e I_c delle onde sonore prodotte dagli auricolari e dalle cuffie. Sfruttando l'identità $\log_{10} x - \log_{10} y = \log_{10} \frac{x}{y}$, otteniamo:

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_a - L_c = 10 \log_{10} \frac{I_a}{I_0} - 10 \log_{10} \frac{I_c}{I_0} = 10 \left(\log_{10} \frac{I_a}{I_0} - \log_{10} \frac{I_c}{I_0} \right) = 10 \log_{10} \frac{I_a}{I_c} = \\ &= 10 \log_{10} \frac{6,4 \text{ W/m}^2}{0,079 \text{ W/m}^2} = 19 \text{ dB} \end{aligned}$$



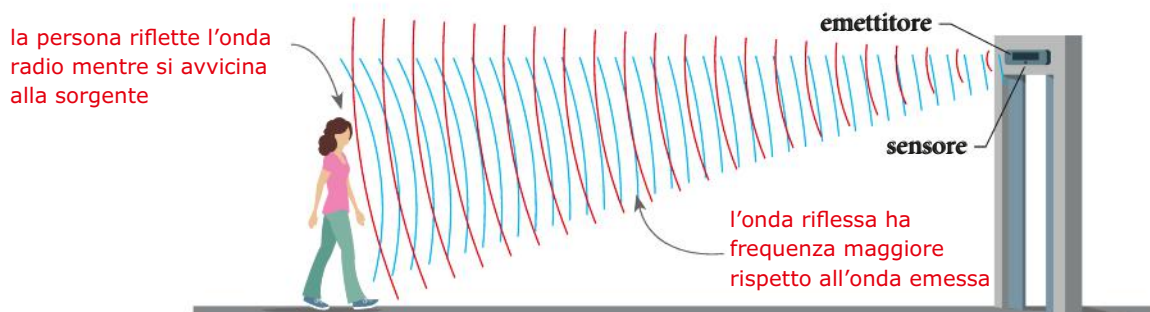
Lev A/Shutterstock

4 L'effetto Doppler

Il suono che ci arriva dalla sirena dei pompieri è più acuto quando il camion si muove verso di noi e più grave quando si allontana.

Il fatto che la frequenza rilevata dal ricevitore di un'onda periodica dipenda dal moto della sorgente, come anche dal moto del ricevitore, è chiamato **effetto Doppler**.

Questo fenomeno, studiato dal fisico austriaco Christian Doppler (1803-1853), è conosciuto per esperienza in relazione al suono, ma interessa tutti i tipi di onde. Su di esso, per esempio, si basano i sensori di movimento a onde radio delle porte automatiche.

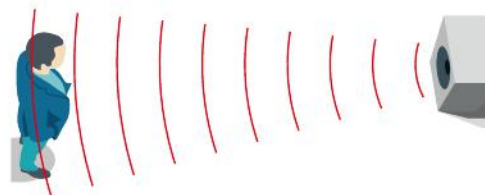


Per il sensore, la frequenza dell'onda radio riflessa da una persona che si avvicina o si allontana è, rispettivamente, maggiore o minore di quella dell'onda emessa. Il sensore ordina l'apertura della porta solo quando la frequenza ricevuta è maggiore.

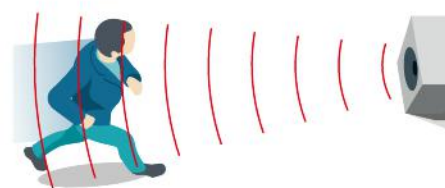
Sorgente ferma e ricevitore in movimento

L'effetto Doppler ha a che fare con il movimento; quindi, per descriverlo, è necessario fissare un sistema di riferimento. Scegliamo il sistema in cui l'aria (il mezzo in cui si propagano le onde sonore) è in quiete. Inoltre, supponiamo che una sorgente ferma rispetto all'aria emetta un'onda sonora di frequenza f e chiamiamo v la velocità del suono.

■ Una persona ferma rispetto alla sorgente (e all'aria) riceve i fronti di compressione dell'aria a intervalli di tempo di un periodo $T = 1/f$.



■ Se la persona corre verso la sorgente, i fronti di compressione la investono a intervalli di tempo $T' < T$, ossia con frequenza $f' > f$.



L'onda sonora che si allontana dalla sorgente è come un treno che si allontana dalla stazione e ogni fronte di compressione dell'aria è come la parte frontale di un vagone del treno. Allora, la lunghezza dei vagoni è l'analogo della lunghezza d'onda λ e la velocità del treno corrisponde alla velocità v del suono.

Un ricevitore che si muove verso la sorgente (la stazione) con velocità v_r va incontro ai fronti di compressione (i vagoni) con velocità relativa di modulo $v + v_r$. Il ricevitore intercetta i fronti di compressione, a distanza λ l'uno dall'altro, a intervalli di tempo

$$\Delta t = \frac{\lambda}{v + v_r}$$

Questo tempo rappresenta il periodo T' dell'onda ricevuta e l'inverso ne rappresenta la frequenza f' :

$$f' = \frac{1}{T'} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v + v_r}{\lambda} \quad [11]$$

Nel sistema di riferimento dell'aria e della sorgente, tra la frequenza f e la lunghezza d'onda λ vale la relazione $v = \lambda f$, da cui

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [12]$$

La formula [12], sostituita nella [11], dà

$$f' = \frac{v + v_r}{v/f} = \frac{v + v_r}{v} f \quad [13]$$

Ripetendo lo stesso ragionamento nel caso in cui il ricevitore si allontani dalla sorgente con velocità di modulo v_r , troviamo una formula che differisce dalla [13] solo per il segno davanti a v_r . In generale, quindi, la frequenza f' rilevata dal ricevitore è

$$f' = \frac{v \pm v_r}{v} f \quad [14]$$

Labels in the diagram:
 - **frequenza rilevata (Hz)** points to f'
 - **velocità del ricevitore (m/s)** points to v_r
 - **velocità del suono (m/s)** points to v
 - **frequenza emessa (Hz)** points to f

**EFFETTO DOPPLER
CON SORGENTE FERMA
E RICEVITORE IN
MOVIMENTO**

- Se il ricevitore si avvicina alla sorgente, si sceglie nella formula [14] il segno «+» e si trova che f' è maggiore di f .
- Se il ricevitore si allontana dalla sorgente, si sceglie il segno «-» e si trova che f' è minore di f .

**CHE COSA DICE
LA FORMULA**

Sorgente in movimento e ricevitore fermo

Se la sorgente è in movimento rispetto all'aria, i fronti di compressione dell'onda sonora sono delle sfere con il centro che si sposta. La velocità con cui si espandono le sfere è la velocità del suono v e la velocità con cui si muove il loro centro è quella della sorgente, di modulo v_s .



Quando la sorgente si avvicina, un ricevitore fermo osserva che la distanza λ' tra i fronti di compressione, ossia la lunghezza d'onda rilevata, è minore di quando la sorgente è ferma; perciò, per il ricevitore, la frequenza rilevata f' è maggiore della frequenza emessa f .

In un tempo $T = 1/f$, una compressione dell'aria percorre una distanza v/f . Poiché la compressione successiva si genera dopo che la sorgente è avanzata di un tratto v_s/f , la distanza λ' tra le due compressioni è

$$\lambda' = \frac{v - v_s}{f}$$

La frequenza corrispondente, uguale al rapporto $f' = v/\lambda'$, è

$$f' = \frac{v}{v - v_s} f \quad [15]$$

La [15], con il segno cambiato davanti a v_s , vale anche nel caso di una sorgente che si allontana. Quindi, in generale,

EFFETTO DOPPLER CON SORGENTE IN MOVIMENTO E RICEVITORE FERMO

$$f' = \frac{v}{v \mp v_s} f \quad [16]$$

frequenza rilevata (Hz) ————— f' ————— frequenza emessa (Hz)
velocità del suono (m/s) ————— $v \mp v_s$ ————— velocità della sorgente (m/s)

CHE COSA DICE LA FORMULA

- Se la sorgente si avvicina al ricevitore, si sceglie nella formula [16] il segno «-» e si trova che f' è maggiore di f .
- Se la sorgente si allontana dal ricevitore, si sceglie il segno «+» e si trova che f' è minore di f .

$$[14] f' = \frac{v \pm v_r}{v} f$$

La [16] è diversa dalla [14]: ciò indica che l'effetto Doppler prodotto dalle onde sonore non dipende solo dalla velocità relativa tra la sorgente e il ricevitore, ma cambia a seconda che a muoversi rispetto all'aria sia l'una o l'altro.

Sorgente e ricevitore entrambi in movimento

Combinando i due risultati [14] e [16], vogliamo ora ricavare la formula che vale quando la sorgente e il ricevitore sono entrambi in movimento rispetto all'aria.

Supponiamo che la frequenza di un'onda sonora sia f_0 nel sistema di riferimento dell'aria. Per la [14], la frequenza f' rilevata da un ricevitore che si muove con velocità v_r verso la sorgente (segno «+») o nel verso opposto (segno «-») è

$$f' = \frac{v \pm v_r}{v} f_0$$

Per la [16], se l'onda proviene da una sorgente che si muove con velocità v_s verso il ricevitore (segno «-») o nel verso opposto (segno «+»), la frequenza f emessa dalla sorgente è tale che

$$f_0 = \frac{v}{v \mp v_s} f$$

Sostituendo la seconda di queste equazioni nella prima otteniamo la formula cercata:

EFFETTO DOPPLER NEL CASO GENERALE

$$f' = \frac{v \pm v_r}{v \mp v_s} f \quad [17]$$

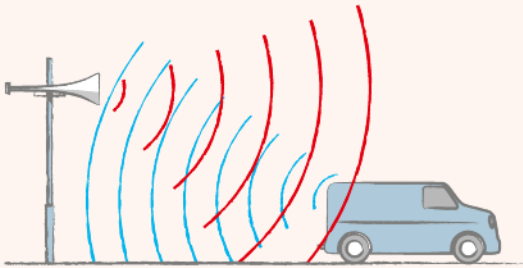
PROBLEMA MODELLO 2 Riflessione sonora su un corpo in movimento

Un altoparlante fissato a un palo emette un'onda sonora della frequenza di 740 Hz; una parte di essa è riflessa da un furgone che si allontana alla velocità di 83 km/h. Assumi per la velocità del suono il valore di 340 m/s.

- Determina la frequenza del suono riflesso, raccolto da un microfono fermo vicino all'altoparlante.

ANALISI

RAPPRESENTIAMO LA SITUAZIONE



DATI

- Frequenza del suono emesso dall'altoparlante: $f = 740$ Hz
- Velocità del furgone: $v_F = 83$ km/h
- Velocità del suono: $v = 340$ m/s

INCOGNITE

- Frequenza ricevuta dal microfono: $f_M = ?$

RISOLUZIONE

- **CALCOLIAMO LA FREQUENZA RICEVUTA DAL CONDUCENTE** La velocità del furgone è

$$v_F = 83 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{83}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Per la formula [14], la frequenza del suono percepito dall'autista del furgone, che si allontana dall'altoparlante, ha la seguente espressione:

$$f' = \frac{v - v_r}{v} f = \frac{v - v_F}{v} f$$

- **CALCOLIAMO LA FREQUENZA RICEVUTA DAL MICROFONO** La stessa frequenza f' è riflessa dal retro del furgone, che ora si comporta come una sorgente in moto; quindi, per la [16], la frequenza ricevuta dal microfono è

$$f_M = \frac{v}{v + v_s} f' = \frac{v}{v + v_F} \frac{v - v_F}{v} f = \frac{(340 - 23) \text{ m/s}}{(340 + 23) \text{ m/s}} \times 740 \text{ Hz} = \mathbf{646 \text{ Hz}}$$

Una sorgente più veloce dell'onda

Più è grande la velocità v_s di una sorgente sonora, più sono ravvicinati i fronti di compressione dell'aria davanti a essa e maggiore è la frequenza del suono udito da un ascoltatore al quale la sorgente si avvicina.

Se v_s è uguale alla velocità v del suono nell'aria, la formula [16] perde significato perché il suo denominatore si annulla. In questo caso i fronti di compressione prodotti dall'onda sonora, invece di allontanarsi precedendo la sorgente, si accumulano l'uno sull'altro. Essi creano, così, una barriera di aria compressa, un'onda d'urto che viaggia assieme alla sorgente.

Se v_s è maggiore di v , l'onda d'urto assume la forma di un guscio conico e si allarga dietro la sorgente, posta al vertice. L'onda d'urto prodotta da un aereo che supera la velocità del suono si propaga fino a terra ed è percepita, da chi ne viene investito, come un *bang supersonico*, cioè un forte boato simile a un'esplosione.

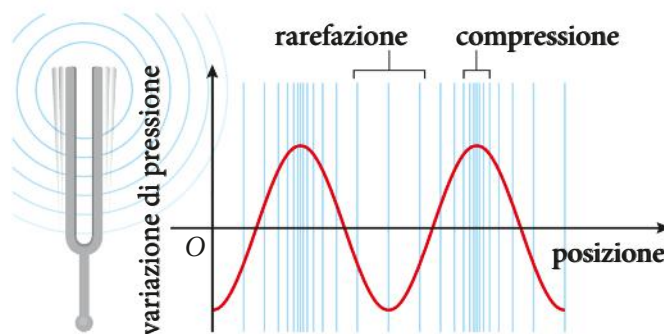


Analoga all'onda d'urto conica di un aereo supersonico è l'onda a forma di V che generano le imbarcazioni quando hanno una velocità maggiore della velocità di propagazione delle onde sulla superficie dell'acqua.



5 Le onde armoniche

Se un'estremità di una corda tesa è fatta oscillare di moto armonico con periodo T , lungo la corda si propaga un'onda armonica: ogni punto della corda raggiunto dall'onda compie un moto armonico dello stesso periodo T .



Analogamente, quando un diapason viene percosso, esso vibra di moto armonico e produce un'onda sonora armonica che si propaga nell'aria.

La legge delle onde armoniche in un punto fissato

Mentre l'onda si propaga, ogni particella del mezzo materiale (un trattino di corda nel caso di un'onda lungo una corda, un volumetto d'aria nel caso di un'onda sonora) oscilla attorno alla posizione di equilibrio. In funzione del tempo t , lo spostamento y del mezzo da una posizione fissata è espresso dalla legge

$$y = a \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi_0\right) = a \cos(\omega t + \phi_0) \quad [18]$$

**ONDA ARMONICA
IN FUNZIONE DEL TEMPO**

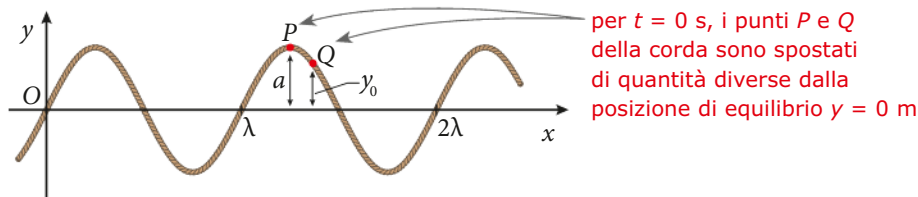
che è una generalizzazione della legge oraria del moto armonico e in cui:

- a è l'ampiezza dell'onda;
- T è il periodo;
- $\omega = \frac{2\pi}{T}$ è la pulsazione del moto armonico, espressa in radianti al secondo;
- $\frac{2\pi}{T}t + \phi_0 = \omega t + \phi_0$, cioè l'argomento della funzione coseno, è la *fase* del moto ed è espressa in radianti;
- ϕ_0 è la *fase iniziale*, ossia il valore della fase all'istante $t = 0$ s.

...

La fase iniziale

La figura che segue rappresenta una corda percorsa da un'onda armonica, a un certo istante scelto come istante iniziale.



Osserviamo che il punto P è spostato della quantità massima a dalla posizione di equilibrio e il punto Q è spostato di una quantità generica y_0 . Nel tempo, i due punti compiono oscillazioni armoniche di uguale periodo T e uguale ampiezza a : per entrambi vale la formula [18], ma i loro spostamenti iniziali sono diversi.

Dalla [18], ponendo $t = 0$ s e $y = y_0$, otteniamo

$$y_0 = a \cos \phi_0 \quad [19]$$

Questa equazione mostra che la fase iniziale ϕ_0 è legata allo spostamento iniziale y_0 :

la **fase iniziale** è una costante che tiene conto delle condizioni iniziali dell'oscillazione.

Risolviamo la [19] nel caso particolare del punto P , in cui y_0 è uguale ad a :

$$a = a \cos \phi_0 \Rightarrow 1 = \cos \phi_0 \Rightarrow \phi_0 = 2k\pi, \text{ con } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Per determinare la funzione che descrive lo spostamento y di P a ogni istante di tempo t , sostituiamo nella [18] una delle infinite soluzioni ottenute per ϕ_0 , per esempio $\phi_0 = 0$ rad.

Otteniamo:

$$y = a \cos(\omega t)$$

Per la periodicità della funzione coseno, se avessimo preso un altro dei valori possibili di ϕ_0 , per esempio $\phi_0 = 2\pi$, avremmo trovato lo stesso risultato:

$$y = a \cos(\omega t + 2\pi) = a \cos(\omega t)$$

Il moto armonico di Q differisce da quello di P solo per le condizioni iniziali, ossia per il valore della fase iniziale ϕ_0 : diciamo, allora, che i due moti sono *sfasati*.

PER ESEMPIO

Un'onda armonica su una corda ha un'ampiezza di 6,8 cm. All'istante $t = 0$ s, in un punto P , lo spostamento verso l'alto della corda misura 3,4 cm. La fase iniziale ϕ_0 dell'onda è positiva.

► Quanto vale ϕ_0 ?

Risoluzione

Per la formula [18] si ha:

$$\cos \phi_0 = \frac{y_0}{a} = \frac{3,4 \text{ cm}}{6,8 \text{ cm}} = \frac{1}{2}$$

Gli angoli di valore assoluto più piccolo che hanno il coseno uguale a $1/2$ sono $\pi/3$ e $-\pi/3$. Il primo di questi valori, positivo, è la fase iniziale cercata:

$$\phi_0 = \frac{\pi}{3}$$

FERMATI A PENSARE

- La funzione $y = a \cos(\omega t)$ ha un massimo uguale ad a per $t = 0$ s. Nella funzione $y = a \cos(\omega t + \pi/3)$ il punto di massimo più vicino all'origine dell'asse dei tempi si trova nel semiasse negativo o in quello positivo?
- Se la fase iniziale è $\phi_0 = -\pi/2$, quanto vale lo spostamento iniziale y_0 e qual è la funzione che dà lo spostamento y a ogni istante t ?

La legge delle onde armoniche in un istante fissato

Il profilo di un'onda è la funzione che descrive, in un istante di tempo fissato, la grandezza oscillante y al variare della posizione x lungo la direzione di propagazione. Per un'onda armonica di lunghezza d'onda λ si ha:

**ONDA ARMONICA
IN FUNZIONE
DELLA POSIZIONE**

$$y = a \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \phi_0\right)$$

[20]

$$\begin{aligned} [18] \quad y &= a \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \phi_0\right) = \\ &= a \cos(\omega t + \phi_0) \end{aligned}$$

Anche in questa formula, come nella [18], compare una «fase iniziale» ϕ_0 : qui, però, ϕ_0 è il valore assunto dalla fase (cioè dall'argomento del coseno) nell'origine dell'asse x , per $x = 0$ m.