

ONDE & SUONO

Rugna Alfonso Antonio
&
Claudio Capriccioso

Liceo scientifico F. Bruno



LE ONDE



Sommario

[Caratteristiche generali](#)



[Tipi di onde](#)

[Descrizione](#)

[Fronte d'onda](#)

[Grandezze](#)

[Sovrapposizione](#)

[Interferenza](#)

[Sorgenti coerenti](#)

[Onde stazionarie](#)

[Frequenze onde stazionarie](#)





Caratteristiche generali delle onde

Un'onda è una perturbazione che, a partire da una sorgente, si propaga in tutti i punti contigui dello spazio.

I fenomeni ondulatori si manifestano mostrando aspetti apparentemente molto diversi (il suono, le onde sismiche, le onde luminose, le onde del mare ecc.) ma sono governati dalle stesse leggi fisiche. Solitamente, si usa distinguere le onde in:

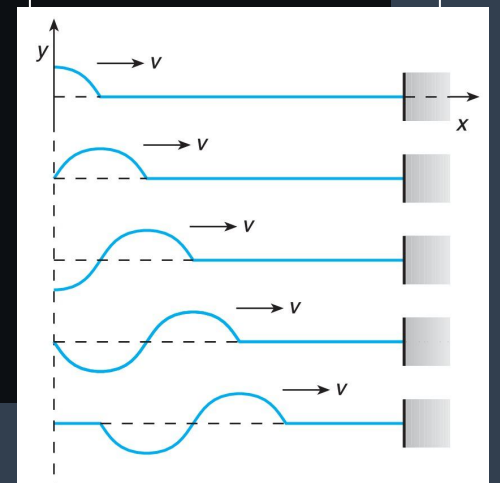
- meccaniche (o elastiche): per propagarsi necessitano di un sostegno (mezzo) materiale;
- elettromagnetiche: si propagano sia nei mezzi materiali sia nel vuoto.

La propagazione di un'onda non comporta mai uno spostamento di materia, ma solo un trasferimento di energia. Ad esempio, un punto di una corda investito da un'onda non cambia la sua posizione relativamente agli

altri punti, ma inizia a oscillare acquistando energia cinetica.

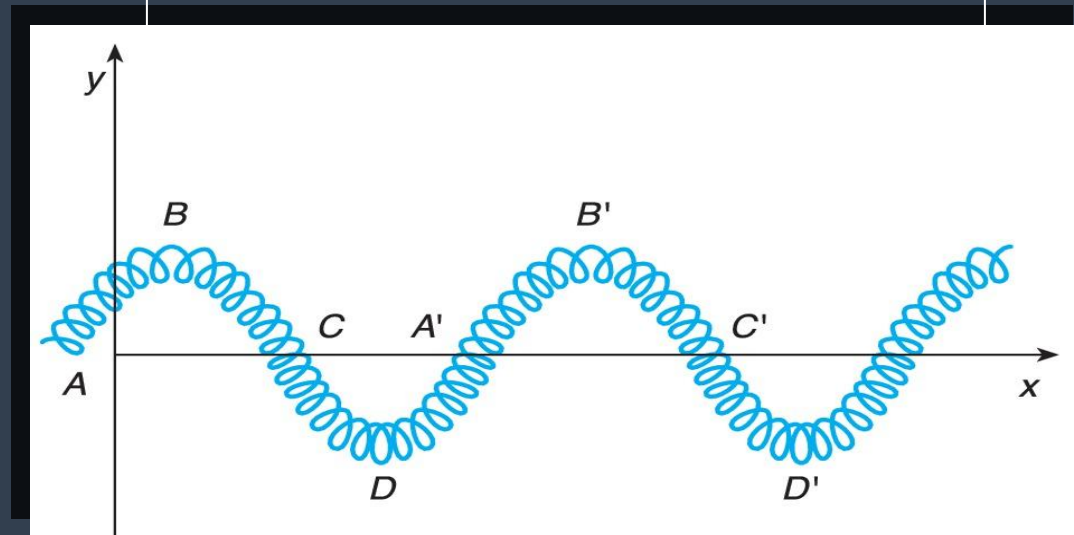
Passata la perturbazione, il punto si ritrova in quiete mentre l'oscillazione interessa un altro punto contiguo.

Una **sorgente** di onde è un punto dello spazio nel quale viene generata la perturbazione; nel caso di una corda tesa, si produce un'oscillazione forzata muovendo un'estremità (quella posta nell'origine del sistema di riferimento in figura) e riportandola nella posizione iniziale. Si genera così un impulso che, a causa dell'elasticità del materiale che costituisce il mezzo (la corda), inizia a propagarsi con una certa velocità. Se si produce l'oscillazione un certo numero di volte consecutivamente, le successive perturbazioni si muovono l'una in fila all'altra, costituendo un treno di impulsi.



ONDA ARMONICA

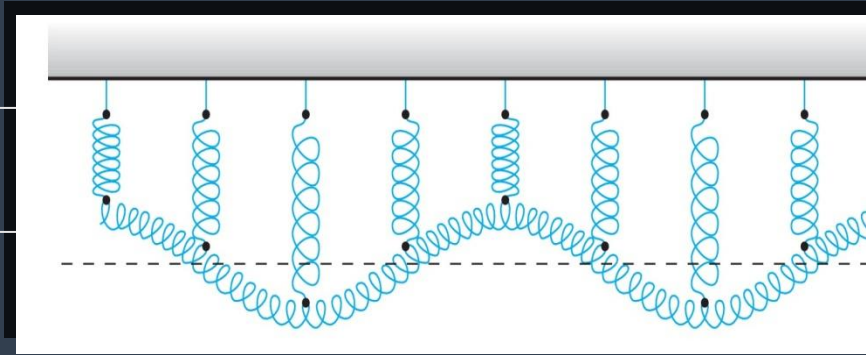
In presenza di un mezzo perfettamente elastico le oscillazioni possono propagarsi senza smorzamento, altrimenti cessano dopo un tempo che dipende dalla costante di smorzamento (di solito provocato dall'attrito) del materiale. È anche possibile che la sorgente oscilli di moto armonico: in questo caso si produce un'onda armonica.



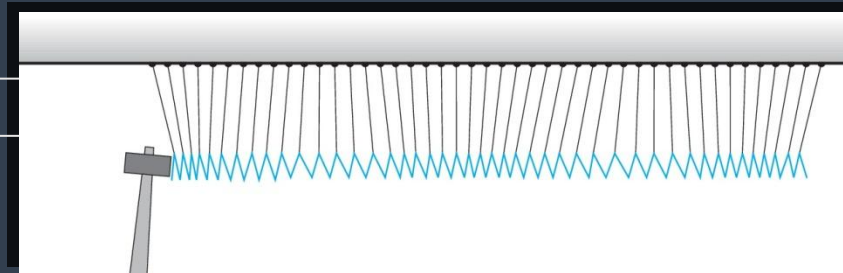
Onda trasversale e longitudinale

Un'onda si propaga unicamente in due modi:

- onda **trasversale**: l'oscillazione prodotta dall'onda avviene in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione della stessa;



- onda **longitudinale**: l'oscillazione avviene nella stessa direzione della propagazione.



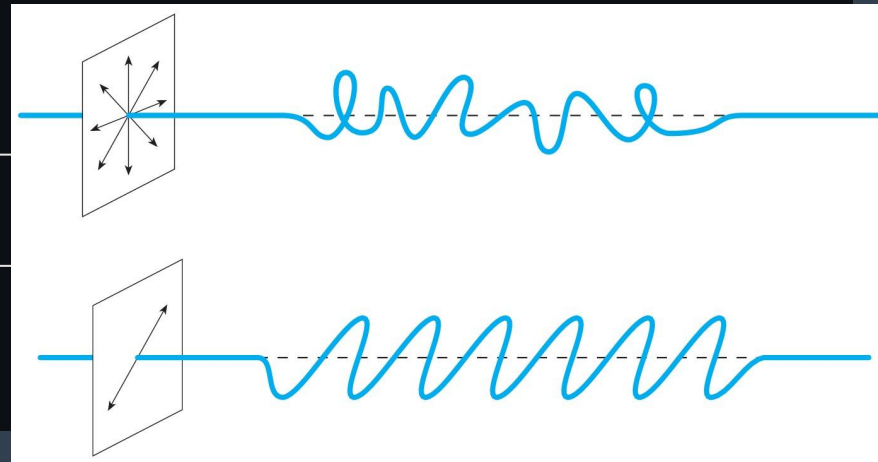


Onda polarizzata

Le onde elastiche che si propagano nei solidi possono essere sia longitudinali sia trasversali, nei fluidi si hanno solo onde longitudinali. Le onde elettromagnetiche sono trasversali.

Nel caso di onde trasversali, la direzione di vibrazione può avvenire lungo una qualsiasi delle infinite direzioni ortogonali a quella di propagazione .

Se la vibrazione trasversale avviene in un piano fisso, l'onda si dice **polarizzata** .



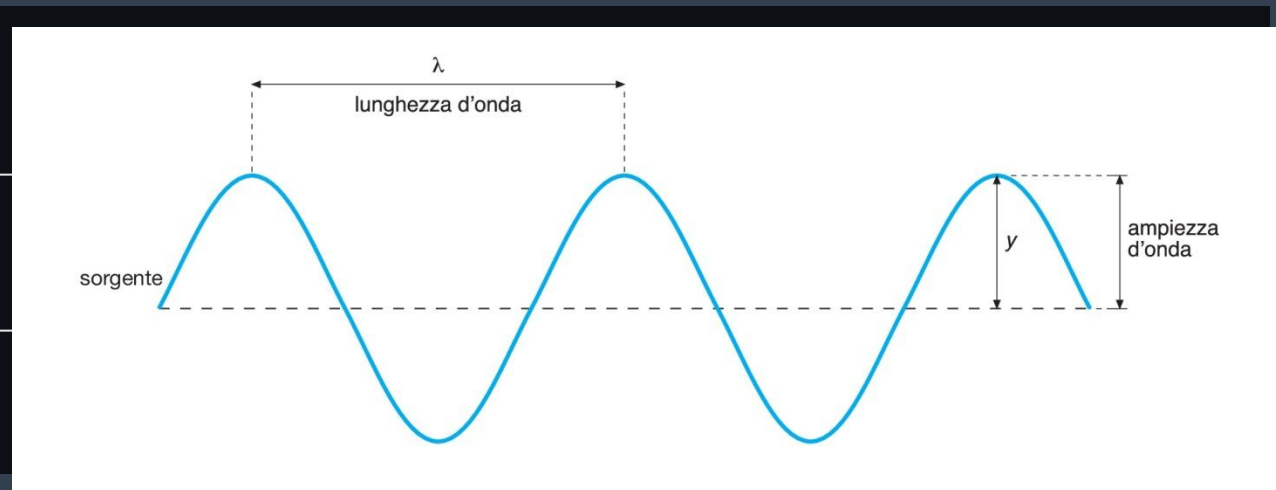
Descrizione delle onde

Il meccanismo fisico che permette la propagazione delle onde meccaniche longitudinali deriva dalla possibilità che hanno gli atomi o le molecole contigue di spostarsi dalla loro posizione di equilibrio, grazie all'azione di forze d'interazione che, su scala di distanza atomica, sono di natura elastica. Quando, nella sorgente della perturbazione, si crea un aumento di pressione, in prossimità della sorgente si genera uno spostamento iniziale degli atomi, che viene trasmesso agli atomi contigui mentre i primi vengono richiamati nelle loro posizioni di equilibrio. L'inerzia della materia fa superare la posizione di equilibrio; le forze di richiamo producono allora un'ulteriore spostamento in senso contrario e così via. Si creano così zone di compressione e rarefazione, alle quali corrispondono aumenti e diminuzioni della pressione, in movimento progressivo. Le onde trasversali sono prodotte dall'elasticità per scorrimento, fenomeno mostrato dalle sostanze solide: se, ad esempio, in una sbarra viene prodotta una deformazione laterale, gli strati di materiale contigui scorrono gli uni rispetto agli altri. Le forze di interazione atomiche agiscono in modo da riportare gli atomi, assieme agli strati di appartenenza, nelle loro posizioni iniziali. Per effetto dell'inerzia, si creano delle oscillazioni laterali prodotte dalle forze elastiche di richiamo. Rispetto al caso delle oscillazioni longitudinali la densità della materia si mantiene costante. Per effetto delle stesse forze d'interazione, lo spostamento laterale di un tratto di sbarra si trasmette al tratto successivo con un certo ritardo e in questo modo la perturbazione si propaga. La propagazione di un'onda è un fenomeno che avviene nello spazio e nel tempo: è allora possibile darne una descrizione secondo le sue caratteristiche spaziali o secondo quelle temporali.



Descrizione spaziale

- Descrizione spaziale: immaginando di scattare un'istantanea della perturbazione, in un sistema di assi cartesiani si riportano le posizioni dei punti investiti dall'onda assieme al valore della perturbazione. In figura è rappresentato in ordinata lo spostamento dalla posizione di equilibrio subito dai punti del mezzo entro il quale si propaga un'onda armonica, in funzione della distanza dalla sorgente (ascissa).

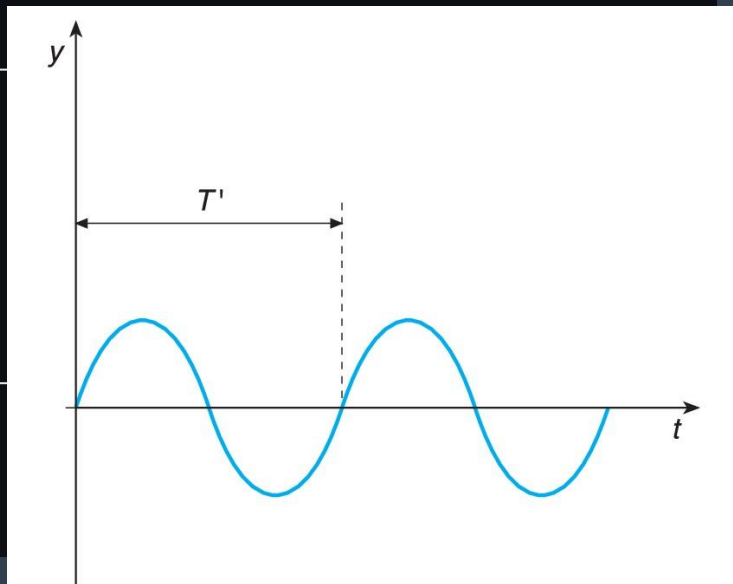




Descrizione temporale

- Descrizione temporale: si fissa l'attenzione su un punto in una determinata posizione e, in un diagramma cartesiano, si riporta il valore della perturbazione (ordinata) in funzione del tempo (ascissa). In figura è rappresentato lo spostamento dalla posizione di equilibrio di un determinato punto del mezzo, nel caso di un'onda armonica.

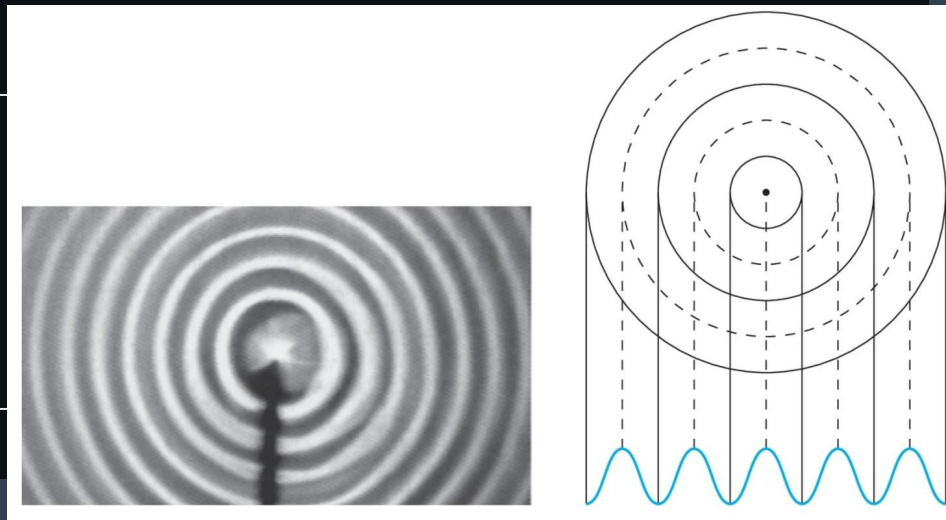
Due punti investiti dalla perturbazione si dicono in fase se la perturbazione assume lo stesso valore nello stesso istante di tempo. Se la perturbazione assume valori opposti, i punti si dicono in opposizione di fase.





Il fronte d'onda

Due punti investiti dalla perturbazione si dicono in fase se la perturbazione assume lo stesso valore nello stesso istante di tempo. Se la perturbazione assume valori opposti, i punti si dicono in opposizione di fase. Il fronte d'onda è il luogo geometrico dei punti in fase. Se il fronte è una superficie nello spazio si parla di superficie d'onda. Se il fronte d'onda è circolare o sferico, l'onda si classifica utilizzando la stessa terminologia.



A sinistra, fronti d'onda circolari e rappresentazione di un'onda sferica attraverso le superfici d'onda e i suoi raggi. A destra, profilo dell'onda in funzione della distanza dalla sorgente. Sono evidenziate le posizioni delle creste (cerchi tratteggiati) e delle valli (cerchi con linea continua).



Le grandezze delle onde

Le onde presentano grandezze caratteristiche in comune, a prescindere dalla loro natura:

- **periodo T**: intervallo di tempo minimo dopo il quale l'oscillazione riassume le stesse caratteristiche; si misura in secondi (s);
- **frequenza n**: è il numero di oscillazioni complete compiute al secondo; vale la relazione: $\nu = 1/T$

La frequenza si misura in hertz (Hz);

- **lunghezza d'onda l**: distanza percorsa dall'onda nell'intervallo di tempo pari a un periodo, ovvero distanza minima tra due punti per i quali la perturbazione assume le stesse caratteristiche (punti in fase); si misura in metri (m) o in centimetri (cm);
- **ampiezza A**: massimo spostamento dalla posizione di equilibrio; si misura in metri o in centimetri.





Quando un'onda si propaga con una certa velocità v , la perturbazione investe successivamente punti contigui: fissando una posizione, in un intervallo di tempo pari a un periodo, la perturbazione riacquista le stesse proprietà che aveva a una distanza pari a una lunghezza d'onda dalla posizione in esame. In altri termini, il punto in esame si trova in fase con il punto che lo precede di una distanza pari a λ . Tra le grandezze in gioco vale la relazione:

$$\lambda = v T$$

Esprimendo il periodo in funzione della frequenza, la relazione precedente equivale alla seguente:

$$\lambda \nu = v$$

In questo caso, la velocità v prende il nome di velocità di fase, in quanto non è la velocità di un punto materiale, bensì la velocità di una perturbazione che investe più punti.





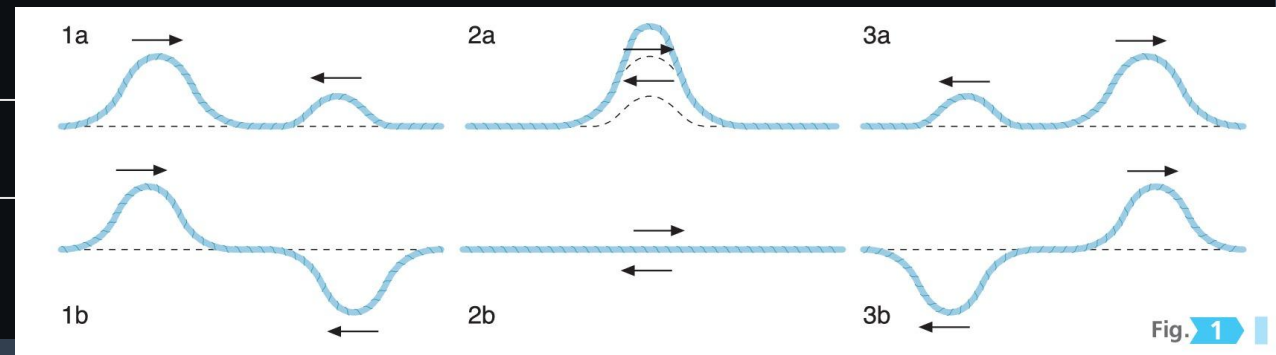
Sovrapposizione

Quando due perturbazioni che si propagano investono lo stesso punto dello spazio, questo è sollecitato da entrambe a mutare il proprio stato iniziale. Vale l'importante:

Principio di sovrapposizione

Lo spostamento prodotto in un punto dello spazio da due o più onde è uguale, in ogni istante, alla somma vettoriale degli spostamenti che ciascuna onda produce nello stesso punto e nello stesso istante indipendentemente dalle rimanenti.

Si può verificare tale principio esaminando il moto di due onde che si propagano in versi opposti lungo una fune.



Interferenza

Si definisce **interferenza** la sovrapposizione di due o più perturbazioni in una data regione dello spazio.

Si può interpretare il principio di sovrapposizione mediante le proprietà matematiche dell'equazione di propagazione delle onde: se

$$Y_1(x; t) \text{ e } Y_2(x; t)$$

sono le soluzioni di tale equazione che rappresentano il moto di due onde lungo una determinata direzione, si può dimostrare che anche

$$Y(x; t) = Y_1(x; t) + Y_2(x; t)$$

è soluzione della stessa equazione.

È possibile applicare il principio di sovrapposizione solo se il mezzo entro il quale avviene la propagazione delle perturbazioni soddisfa la legge di Hooke delle deformazioni lineari: in questo caso esiste una proporzionalità diretta tra deformazione e forza di richiamo.

Poiché l'equazione di propagazione per le onde elastiche ha le stesse proprietà matematiche di quella per le onde elettromagnetiche, il principio di sovrapposizione può essere applicato anche in questo caso: in particolare, anche alla propagazione nel vuoto.





Interferenza costruttiva e distruttiva

Quando facciamo incontrare due onde elettromagnetiche corrispondenti alla luce visibile, i punti di interferenza distruttiva corrispondono a punti di buio (frange scure), mentre l'interferenza costruttiva si manifesta con della luce (frange luminose). Ponendo uno schermo davanti a due sorgenti luminose con la stessa frequenza otterremmo delle frange chiare e delle frange scure che si alternano:



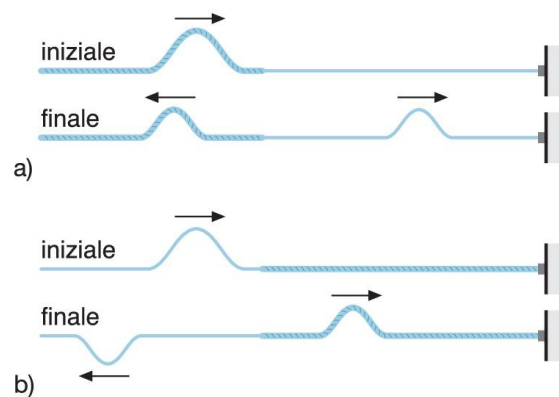


Sorgenti coerenti

L'energia per unità di tempo trasportata da un'onda è proporzionale al quadrato della sua ampiezza: ne consegue che la distribuzione spaziale dell'energia in seguito alla sovrapposizione di due perturbazioni segue l'andamento dell'ampiezza risultante. È da notare che, anche in questo caso, rimane valido il principio di conservazione dell'energia: la sovrapposizione delle perturbazioni ha come effetto solo quello di distribuirla diversamente nello spazio.

Quando un'onda si riflette sulla superficie di separazione da un mezzo meno rifrangente a un altro più rifrangente, oltre alla variazione di direzione subisce anche una variazione di fase pari a π rad. Si verifica questa proprietà, ad esempio, nel caso di una corda con un estremo fisso, o di una corda leggera unita a una più pesante: in questo caso un impulso si riflette ritornando indietro ribaltato. Nel caso in cui la riflessione avvenga sulla superficie di separazione da un mezzo più rifrangente a un altro meno rifrangente non vi è variazione di fase (come nel caso di una corda con un estremo libero oppure di una corda pesante unita a una più leggera).

Due sorgenti (e le onde emesse) si dicono **coerenti** quando vibrano con la stessa frequenza e hanno differenza di fase costante nel tempo.



Onde stazionarie in una corda fissata agli estremi

Una corda tesa e fissata agli estremi sostiene un'onda stazionaria solo se l'onda presenta due nodi sugli estremi della corda, che non si possono muovere.

Per quanto visto sulle onde stazionarie, i nodi si formano in corrispondenza delle ascisse che soddisfano la relazione

$$x_n = n \frac{\lambda}{2}$$

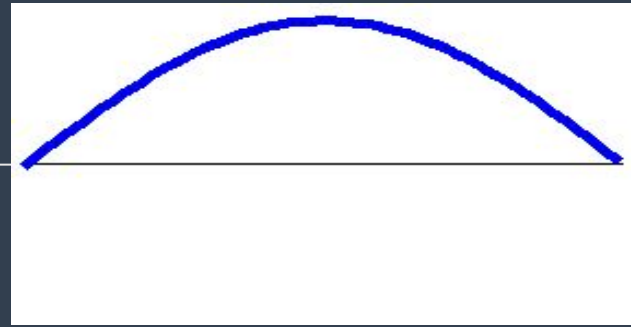
Perciò, se la corda è lunga L , si formano due nodi agli estremi, quando la lunghezza d'onda della corda soddisfa la relazione

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

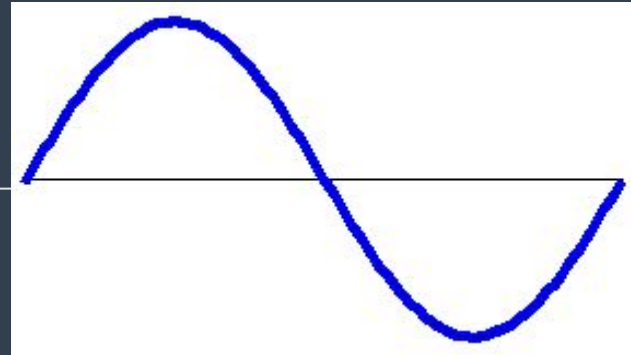




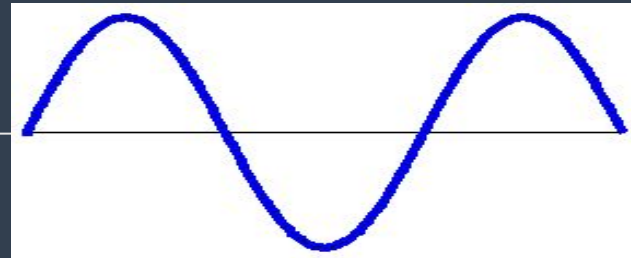
Per $n=1,2,3,\dots$
Per $n=1$ si hanno esattamente
due nodi agli estremi



Per $n=2$ ci sono 3 nodi



Per $n=3$ ci sono 4 nodi, due dei
quali agli estremi



La distanza tra due nodi successivi è $l/2$



FREQUENZE D'ONDA STAZIONARIA

Le onde stazionarie sono anche dette modi di vibrazione normali o armonici della corda.

Quando una corda vibra ad una delle frequenze armoniche, essa genera un'onda sonora alla stessa frequenza. Ogni nota emessa dagli strumenti a corde corrisponde ad un'onda stazionaria con una precisa frequenza di vibrazione. Ad esempio la nota LA del diapason corrisponde alla frequenza di 440 Hz, la nota DO centrale alla frequenza di 262 Hz.

Se ogni strumento emettesse soltanto la frequenza caratteristica di una nota, non saremmo in grado di distinguere il suono di un pianoforte da quello di un violino. In pratica però, quando una nota viene suonata sono eccitate anche tutte le frequenze armoniche della serie corrispondente a quella nota. La conformazione della cassa acustica dello strumento è scelta in modo tale che solo alcune frequenze tra le armoniche sono amplificate per risonanza e risultano perciò più intense. La differente combinazione di frequenze armoniche associata ad ogni nota costituisce il timbro dello strumento e ci permette di distinguere il suono di un pianoforte da quello di un violino.





Negli strumenti a fiato il suono è generato dalle onde stazionarie che si instaurano in tubi d'aria con i ventri in corrispondenza delle estremità aperte e i nodi di quelle chiuse.

Le frequenze normali delle onde in un tubo con le due estremità aperte, alle quali corrispondono due ventri, si trovano in modo analogo a quanto visto per le corde fissate agli estremi.

$$f_n = \frac{n}{2L}v$$

dove $n=1, 2, 3, \dots$

Le frequenze normali di onde stazionarie in un tubo con un'estremità chiusa e una aperta sono invece spaziate di $l/4$

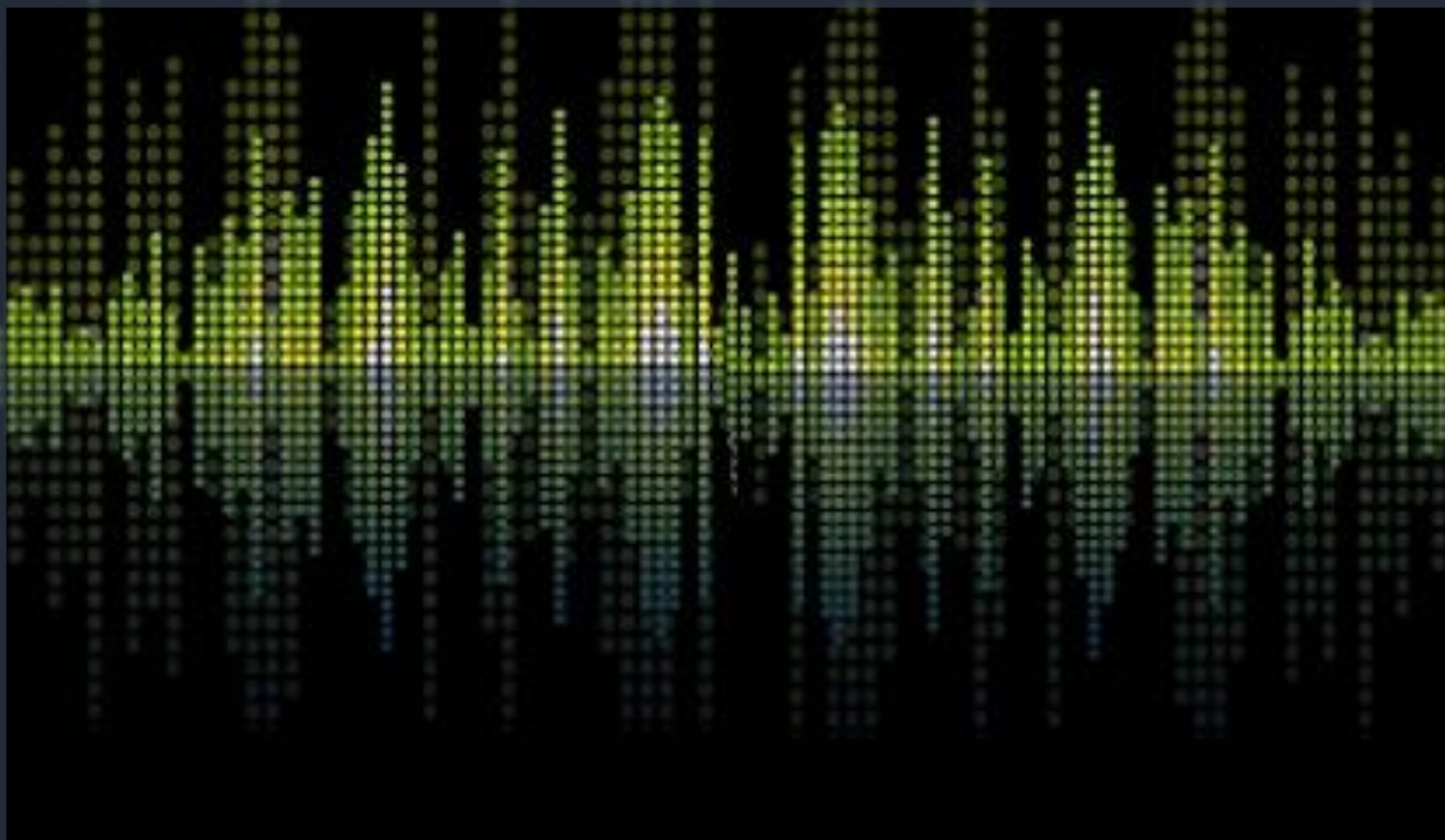
$$f_n = \frac{n}{4L}v$$

con $n=1, 2, 3, \dots$





IL SUONO



Sommario

[La natura del suono](#)



[Frequenza di un'onda sonora](#)

[Altezza e timbro](#)

[Ampiezza](#)

[Velocità](#)

[Intensità](#)

[Effetto Doppler](#)

[Boom sonico](#)



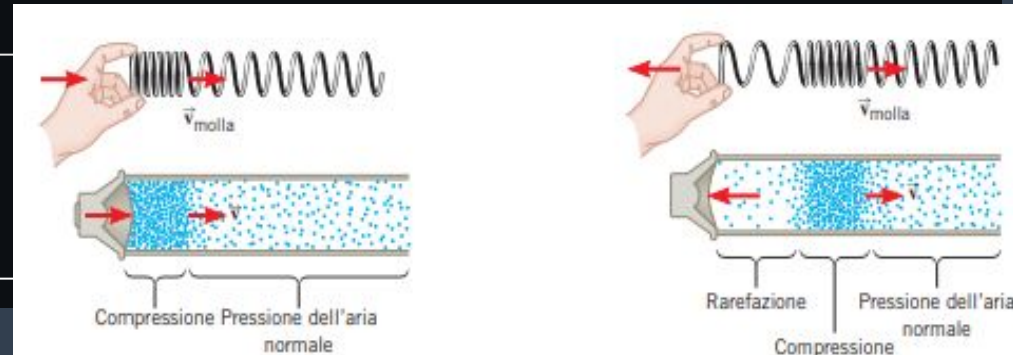
La natura del suono

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, come tutte le onde meccaniche, non si propaga nel vuoto.



Per capire come si generano le onde sonore e perché sono onde longitudinali, consideriamo la membrana di un altoparlante. 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.



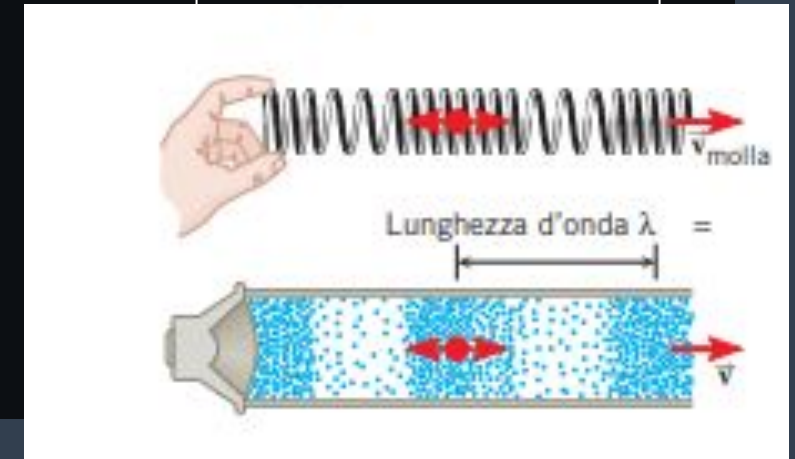
Dopo aver prodotto la compressione, la membrana dell'altoparlante torna indietro, muovendosi verso l'interno e producendo nello strato d'aria a contatto con essa una regione chiamata rarefazione, in cui la pressione dell'aria è leggermente minore di quella normale. La rarefazione è analoga alla regione 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.





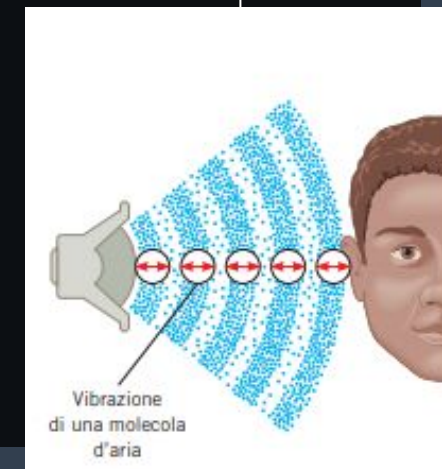
Continuando a vibrare, la membrana genera una successione di zone in cui l'aria è alternativamente compressa e rarefatta: è questa l'onda sonora. Dunque le molecole d'aria, come le particelle della molla, oscillano avanti e indietro nella stessa direzione in cui si propaga l'onda: quindi l'onda sonora è longitudinale.

Dobbiamo inoltre aggiungere che la lunghezza d'onda λ è uguale alla distanza tra i centri di due compressioni successive o di due rarefazioni successive.



Quando le compressioni e le rarefazioni generate dall'altoparlante 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 sottolineare che il suono non è generato dagli spostamenti di masse d'aria come quelli che danno origine ai venti, infatti 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



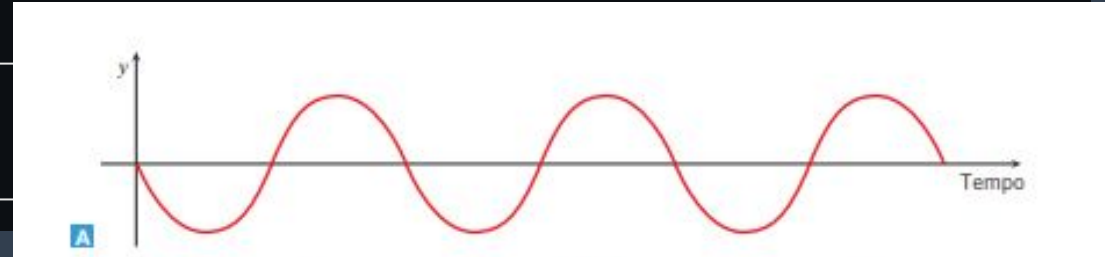
Ogni ciclo di un'onda sonora è composto da una compressione e una rarefazione, e la frequenza dell'onda è il numero di cicli che passano in un secondo in uno stesso punto del mezzo in cui l'onda si propaga. Per esempio, continuando a prendere in considerazione la membrana di un altoparlante, che oscilla avanti e indietro con moto armonico di frequenza 1.000 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.





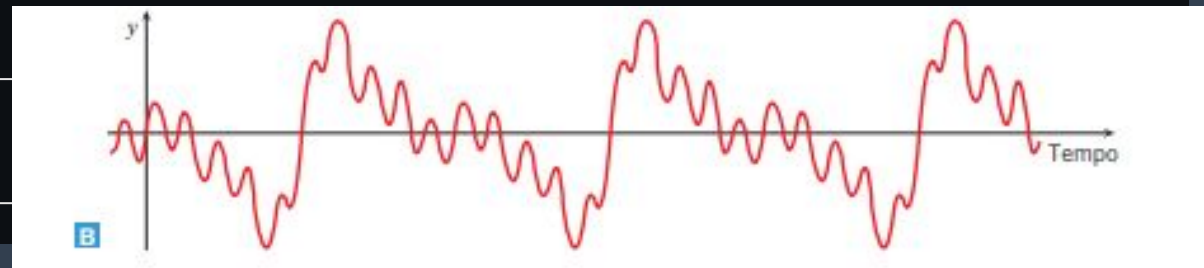
Un suono si dice puro quando le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico:

la frequenza di oscillazione delle particelle è la frequenza del suono puro.
(Un suono puro può essere generato con un diapason)



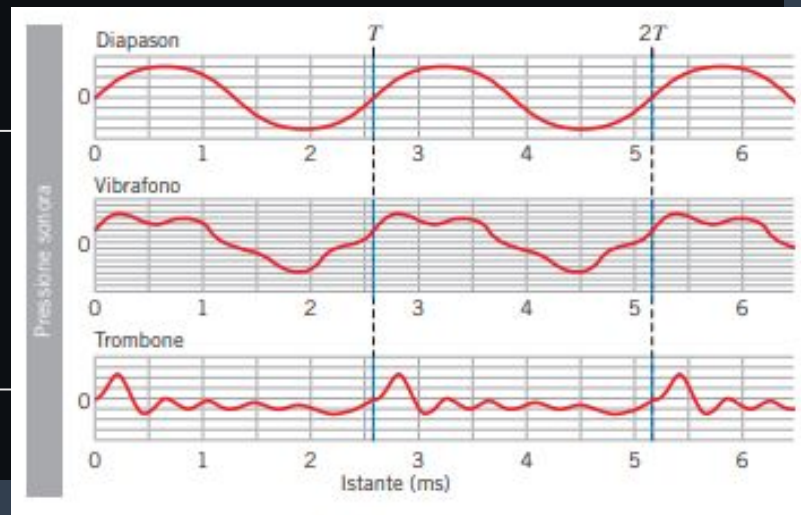
Quando le particelle oscillano di moto periodico ma non armonico, il suono si dice complesso, ma anche in questo caso, si può individuare una frequenza che caratterizza il suono, detta frequenza fondamentale.

(Gli strumenti musicali non emettono suoni puri ma suoni complessi caratterizzati da forme d'onda molto differenti tra loro)



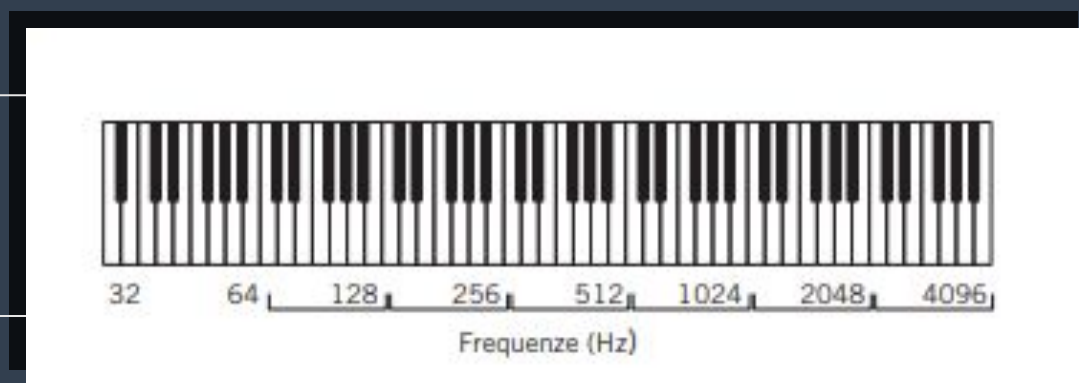
Altezza e timbro

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.





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



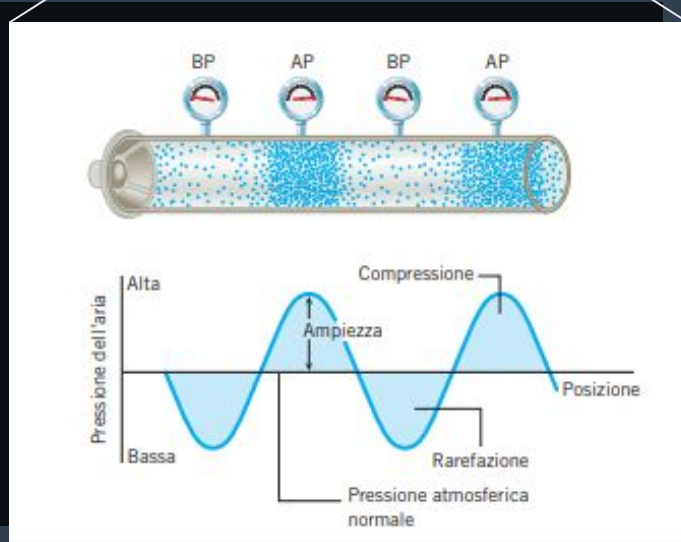
Nel complesso, il nostro udito è uno strumento assai raffinato. Infatti, quando ascoltiamo una stessa nota musicale suonata da strumenti diversi, siamo in grado di distinguerli anche se gli strumenti stanno emettendo suoni con la stessa frequenza fondamentale. Questa diversa percezione è legata a una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





L'ampiezza di un'onda sonora

Il grafico rappresenta un suono puro che si propaga all'interno di un tubo. Alcuni manometri disposti lungo il tubo misurano i valori della pressione in vari punti dell'onda. Il grafico che si ottiene riportando i valori della pressione al variare della posizione del punto sorgente è una sinusoide.



Il grafico mostra che la pressione è maggiore della pressione atmosferica nelle regioni di compressione e minore della pressione atmosferica nelle regioni di rarefazione e possiamo anche osservare 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.

Le variazioni di pressione in un'onda sonora sono in genere molto piccole.

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 (questo dato è valido solo quando la temperatura si trova attorno ai 20°, poiché, come ci suggerisce la teoria cinetica dei gas, la velocità di propagazione del suono nell'aria, così come in tutti i gas, è direttamente collegata alla velocità delle molecole del gas, ed in questo caso dell'aria) ed è notevolmente maggiore nei liquidi e nei solidi.

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

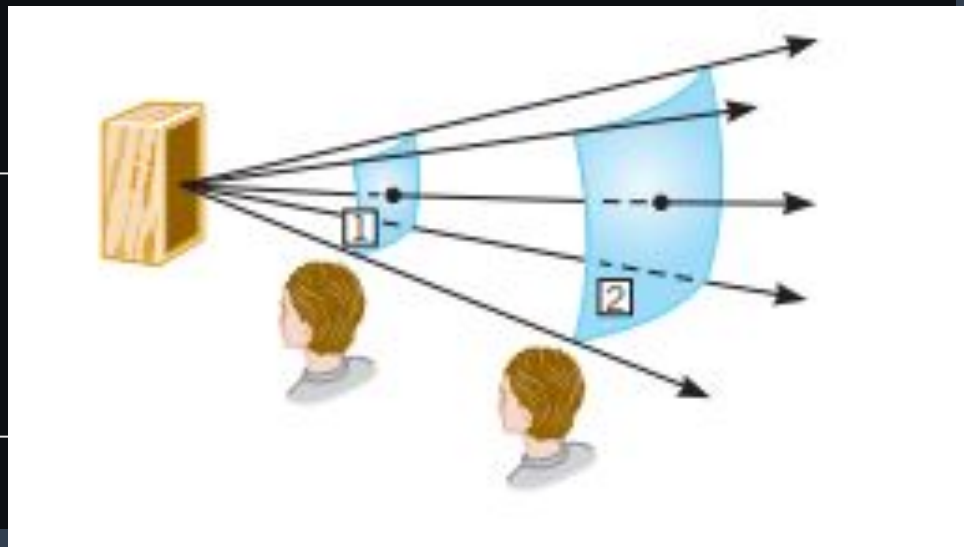
In generale, come possiamo notare dai dati, il suono viaggia più lentamente nei gas, più velocemente nei liquidi e ancora più velocemente nei solidi.



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 watt (W), cioè joule al secondo (J/s).

L'intensità del suono è correlata alla distanza dell'uditore dalla sorgente, infatti, quando questi si allontana dalla sorgente che l'ha emessa l'onda sonora si propaga attraversando superfici di area sempre maggiore, passa la stessa potenza, ma l'intensità del suono è minore nella superficie più lontana.



L'intensità di un suono è poi 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/m²).

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.

Una sorgente di questo tipo al centro di una sfera immaginaria di raggio r, poiché l'intera superficie sferica è attraversata dalla stessa potenza P, l'intensità del suono I in un punto a distanza r dalla sorgente è:

$$I = P / 4\pi r^2$$

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





Livello di intensità sonora

L'intensità minima L_0 di un suono puro con una frequenza di 1000 Hz che può essere percepita da un orecchio umano è:

$$L_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Questo valore dell'intensità è chiamato soglia minima udibile. All'altro estremo si trova la soglia massima sopportabile (o soglia del dolore), che è circa 10 W/m^2 , ma già un'esposizione continua a suoni di intensità superiore a 1 W/m^2 provoca dolori e danni permanenti all'apparato uditivo. È comunque notevole l'ampiezza dell'intervallo di intensità a cui l'orecchio umano è sensibile: l'intensità massima che l'orecchio umano può tollerare senza dolore è mille miliardi di volte l'intensità minima percepibile. La nostra percezione del volume di un suono dipende dall'intensità sonora secondo una relazione che non è lineare ma logaritmica. Per questa ragione si sceglie di misurare l'intensità con cui percepiamo un suono di intensità L mediante il livello di intensità sonora β , così definito:

$$\beta = \log_{10}(I/I_0)$$

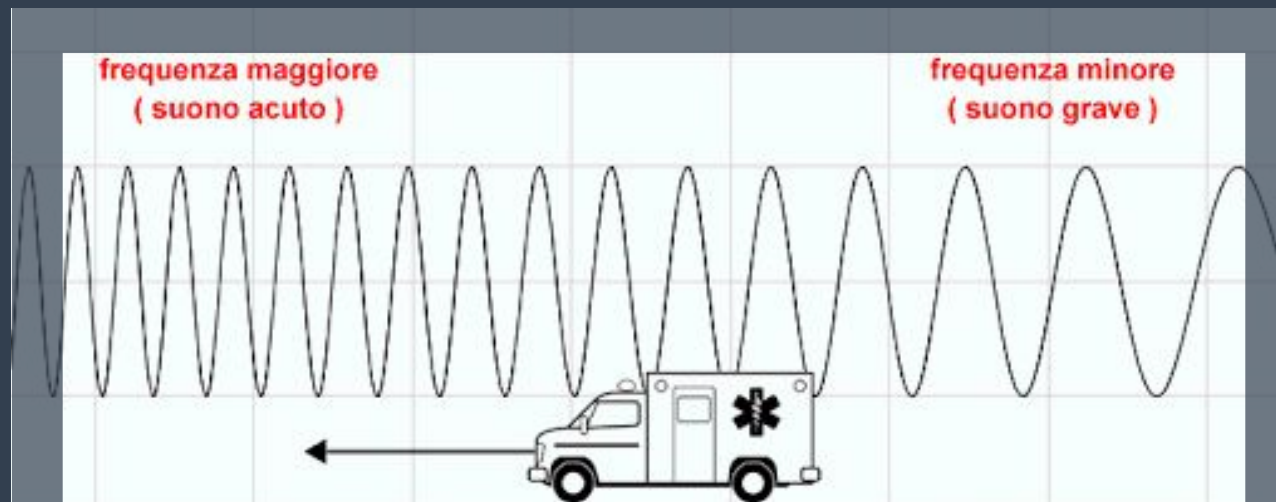
dove $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ è la minima intensità sonora udibile. Nel Sistema Internazionale il livello di intensità sonora è espresso in decibel (dB).



L'effetto Doppler

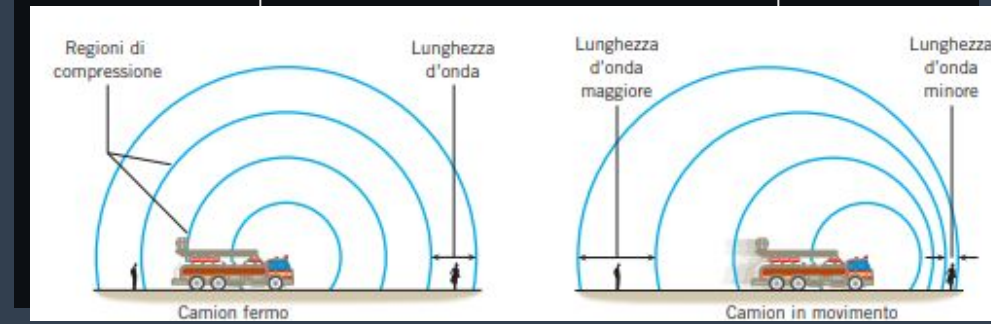
Quando un camion dei pompieri si avvicina a noi il suono della sua sirena è più acuto di quando il camion è fermo o si allontana. Qualcosa di simile accade quando ci avviciniamo a una sorgente sonora ferma o ci allontaniamo da essa. Questi fenomeni furono spiegati nel 1842 dal fisico austriaco Christian Doppler 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 e supponiamo che, oltre al camion, anche l'aria sia ferma rispetto alla Terra.



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, invece, la situazione cambia, 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 emette una compressione nell'istante $t=0$ s, emetterà la compressione successiva nell'istante T , dove T è il periodo dell'onda.



Dunque, la distanza tra queste due compressioni è la lunghezza d'onda λ dell'onda sonora emessa dalla sorgente ferma. Quando il camion si muove con velocità v_s (dove «s» sta per «sorgente» del suono) verso un osservatore fermo, la sirena emette compressioni negli istanti $t=0$ s e $t=T$.

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

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

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

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



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

$$f_x = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}$$

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 λ' è maggiore di λ e il suo valore è dato da:

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

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

Sorgente che si allontana da un osservatore fermo

$$f_r = f_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}}$$

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



Osservatore in movimento e sorgente ferma

(sempre nell'ipotesi che anche l'aria sia ferma)

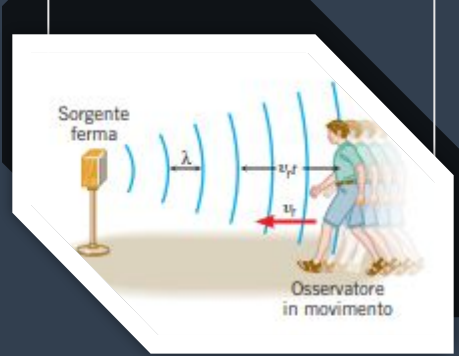
Quando il ricevitore si muove con velocità di modulo v_r verso la sorgente ferma, percorre una distanza $v_r t$ in un tempo t . Durante questo tempo incontra tutte le regioni di compressione che avrebbe incontrato se fosse stato fermo più un certo numero di zone di compressione che è dato dal rapporto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

data da:

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

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

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



Osservatore che si avvicina a una sorgente ferma



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:

Osservatore che si allontana da una sorgente ferma

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

Il meccanismo fisico che produce l'effetto Doppler quando si muove il ricevitore è diverso da quello che lo produce quando si muove la sorgente. Quando si muove la sorgente e il ricevitore è fermo, la lunghezza d'onda λ cambia e di conseguenza cambia la frequenza f_r del suono percepito dal ricevitore. Quando invece si muove il ricevitore e la sorgente è ferma, la lunghezza d'onda λ 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 (Sorgente in moto verso un osservatore fermo) e (Osservatore che si allontana da una sorgente ferma):

Osservatore e sorgente in
moto relativo

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

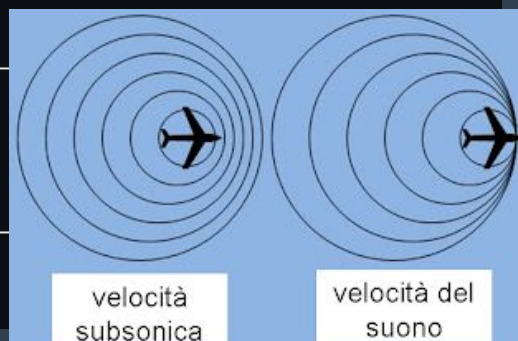
Nel numeratore dell'equazione precedente si deve usare il segno più quando il ricevitore si muove verso la sorgente e il segno meno quando il ricevitore si allontana dalla sorgente. Nel denominatore si deve usare il segno meno quando la sorgente si muove verso il ricevitore e il segno più quando la sorgente si allontana dal ricevitore.





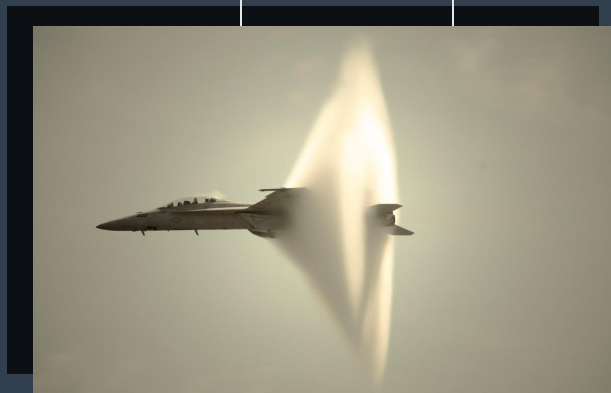
Boom sonico

Per spiegare il boom sonico prendiamo in esame un esempio molto comune, un aereo caccia militare, che raggiungendo la velocità del suono incontra un vero e proprio muro, detto muro del suono, dovuto al sommarsi delle varie compressioni dell'aria.



Nell'istante in cui la velocità della sorgente, in questo caso il nostro aereo, supera la velocità del suono, produce un suono che è percepito come un'onda d'urto e che viene usualmente indicato come boom sonico.

Quando la velocità della sorgente è maggiore di quella del suono si genera un'onda d'urto a forma di cono, tangente a tutte le creste emesse.



THE

END



DI PIU'





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 (figura 12.14A) si chiamano tra loro emettendo infrasuoni con frequenza di circa 5 Hz, mentre i pipistrelli (figura 12.14B) usano ultrasuoni con frequenze fino a 100 kHz per individuare la posizione degli oggetti e per orientarsi nel volo.



Esperimenti di fisiologia dimostrano che il volume percepito sembra raddoppiare quando il livello di intensità sonora aumenta di 10 dB.

	Intensità sonora I (W/m^2)	Livello di intensità sonora β (dB)
Soglia di udibilità	$1,0 \cdot 10^{-12}$	0
Fruscio di foglie	$1,0 \cdot 10^{-11}$	10
Bisbiglio	$1,0 \cdot 10^{-10}$	20
Conversazione normale (a 1 metro)	$3,2 \cdot 10^{-8}$	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

