

ONDE E SUONO

Le caratteristiche generali delle onde



Una perturbazione che si propaga da un punto ad un altro è chiamata **onda**. Le onde si propagano ad una ben definita velocità, determinata dalle proprietà del mezzo in cui viaggiano, *non trasportano materia ma trasportano energia*.

In base all'origine della perturbazione, le onde sono classificate in:

- **Onde meccaniche**, che si propagano attraverso la materia, il *mezzo*, e sono prodotte perturbando un punto del mezzo;
- **Onde elettromagnetiche**, onde prodotte da campi elettrici e magnetici variabili nel tempo, che non necessitano di un mezzo per propagarsi e si propagano anche nel vuoto.

E' importante distinguere il moto dell'onda dal moto delle singole particelle che la formano

Un'onda che si propaga a causa del vento in un campo di grano, dove le singole spighe oscillano avanti ed indietro nella stessa direzione di propagazione dell'onda, ma non cambiano la loro posizione di equilibrio.



Onda
longitudinale

Un'onda creata dagli spettatori di una partita di calcio che fanno la «ola», dove le singole persone formano l'onda si alzano e si risiedono muovendosi perpendicolarmente alla direzione dell'onda, ma rimangono al loro posto.



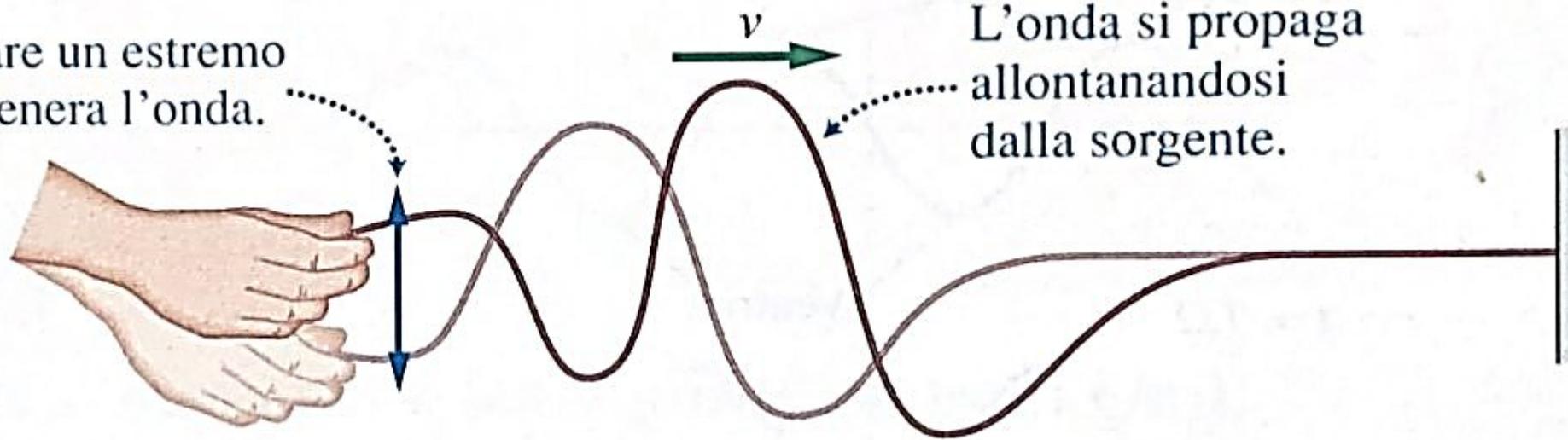
Onda
trasversale

ONDE TRASVERSALI

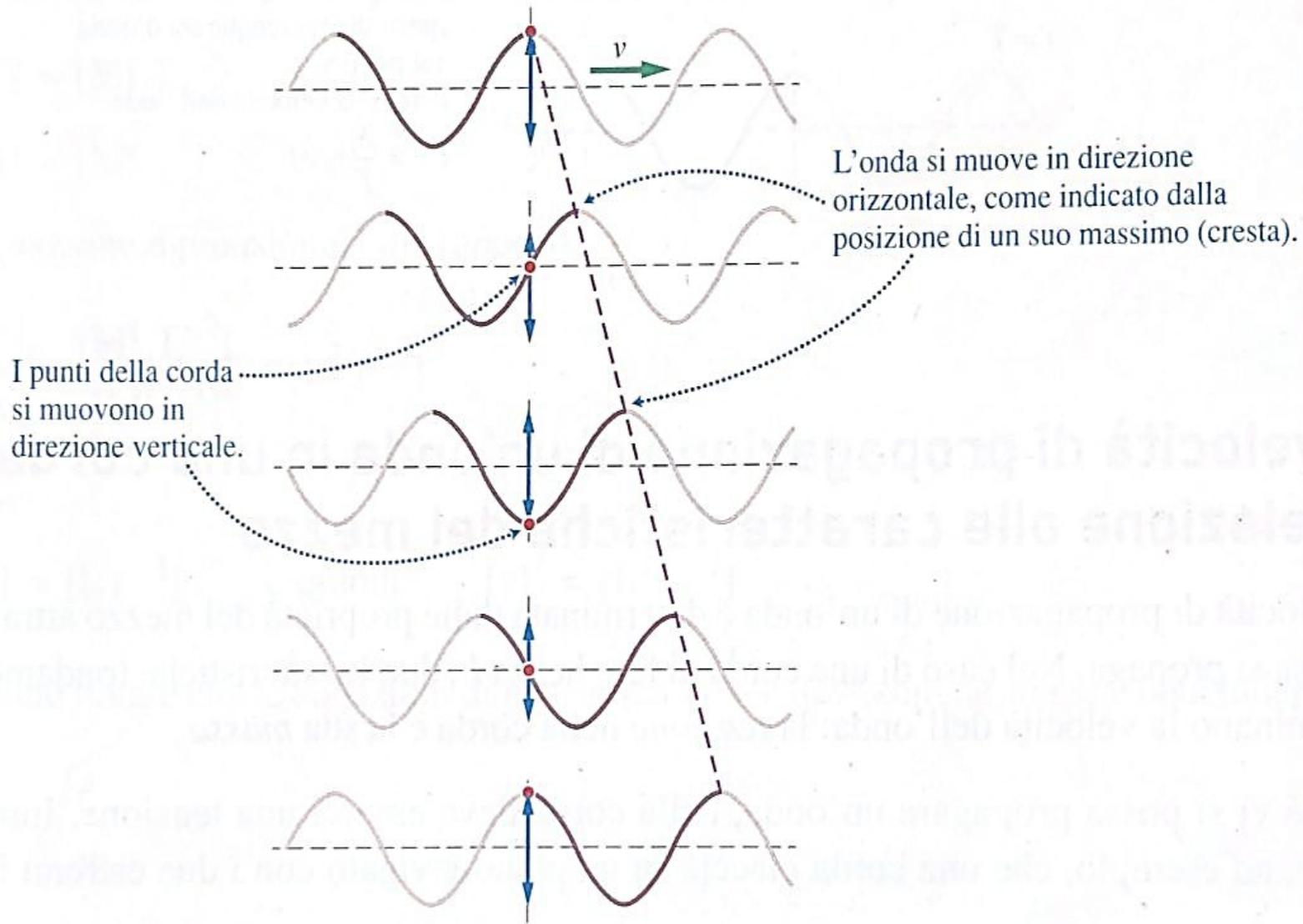
In un'onda trasversale lo spostamento delle singole particelle avviene nella *direzione perpendicolare* a quella della propagazione dell'onda.

Il tipo di onda trasversale più semplice da analizzare e studiare è un'onda che si propaga lungo la corda.

Facendo oscillare un estremo della corda si genera l'onda.



L'onda si propaga allontanandosi dalla sorgente.

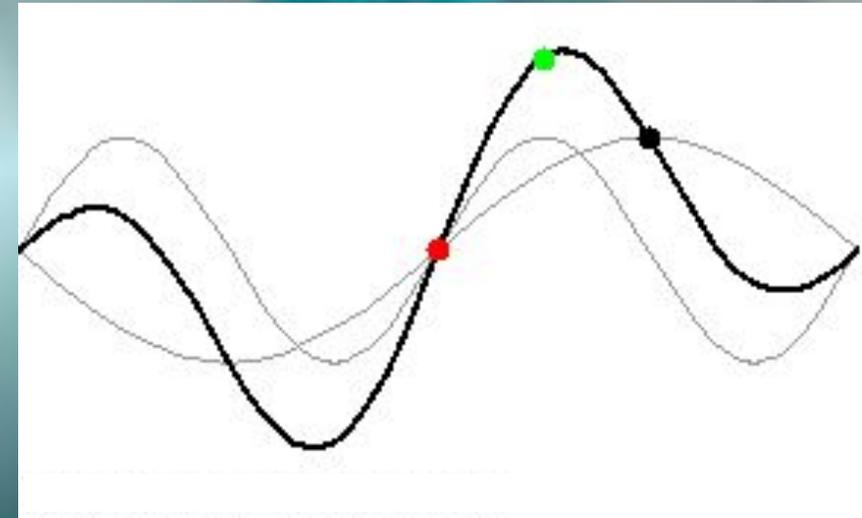


Così facendo, produciamo un'onda che viaggia lungo la corda, verso la parete, in direzione orizzontale, mentre ogni punto della corda oscilla, come la nostra mano, in direzione verticale. Se questo movimento è un moto armonico semplice costante nel tempo l'onda è detta **onda armonica**.

Lunghezza d'onda, frequenza e velocità di propagazione

Consideriamo gli elementi che caratterizzano un'onda armonica:

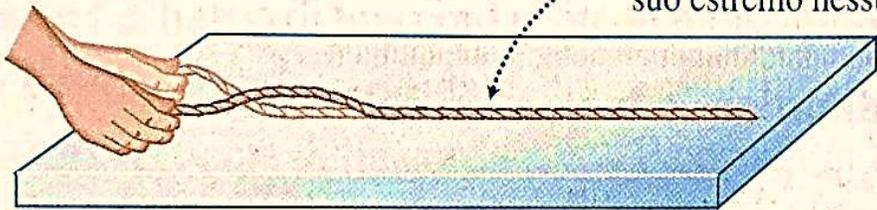
- **creste:** sono i punti dell'onda corrispondente al massimo spostamento verso l'alto;
- **ventri:** sono i punti dell'onda corrispondenti al massimo spostamento verso il basso;
- **ampiezza A :** è l'altezza dell'onda rispetto alla posizione di equilibrio;
- **lunghezza d'onda (λ):** è la distanza tra una cresta e l'altra. È anche lo spazio percorso dalla perturbazione nel tempo in cui una singola particella compie un'oscillazione completa;
- **periodo T :** è il tempo necessario affinché una singola particella compia un'oscillazione completa;
- **frequenza f :** è l'inverso del periodo ($f=1/T$);
- **velocità di propagazione v :** è il rapporto fra lo spazio percorso e il tempo impiegato a percorrerlo.



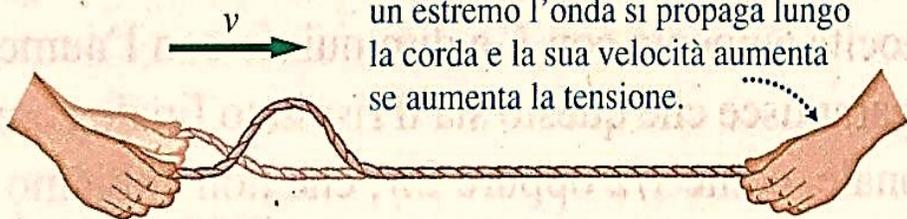
Propagazione di un'onda con e senza tensione

La velocità di propagazione di un'onda è determinata dalle proprietà del mezzo attraverso cui essa si propaga. Nel caso di una corda di lunghezza L , due caratteristiche fondamentali determinano la velocità dell'onda: la *tensione* della corda e la sua *massa*.

Se la corda giace su un piano e non è tesa, quando scuotiamo un suo estremo nessuna onda si propaga.



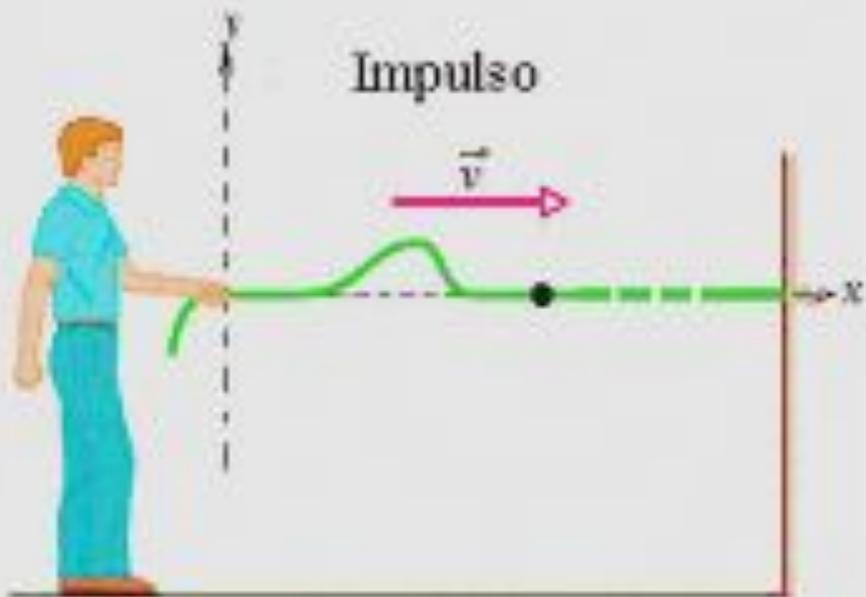
Se la corda viene tesa tirandola nell'altro estremo, quando scuotiamo un estremo l'onda si propaga lungo la corda e la sua velocità aumenta se aumenta la tensione.



La tensione permette la propagazione dell'onda. Se prendiamo in mano un estremo e lo scuotiamo, la parte della corda vicina alla mano oscillerà debolmente, ma nessuna onda viaggerà fino all'altro estremo.

Se un'altra persona prende l'estremo della corda e lo tira, allora qualsiasi movimento si propagherà da un estremo ad un altro. Se la tensione aumenta, le onde viaggiano più velocemente lungo la corda. Per provocare questa tensione viene applicata una forza F .

Densità lineare



(a)



(b)

Consideriamo ora la massa m della corda. Se cerchiamo di inviare un'onda lungo una cordicella e lungo una grossa fune, entrambe sottoposte alla stessa tensione, possiamo osservare che l'onda lungo la fune viaggia più lentamente. A causa dell'inerzia, maggiore è la massa della corda, minore è la velocità di propagazione di un'onda lungo essa. Bisogna precisare che quando si parla di massa non si intende la massa totale della corda, ma si intende la massa per unità di lunghezza che prende il nome di densità lineare.

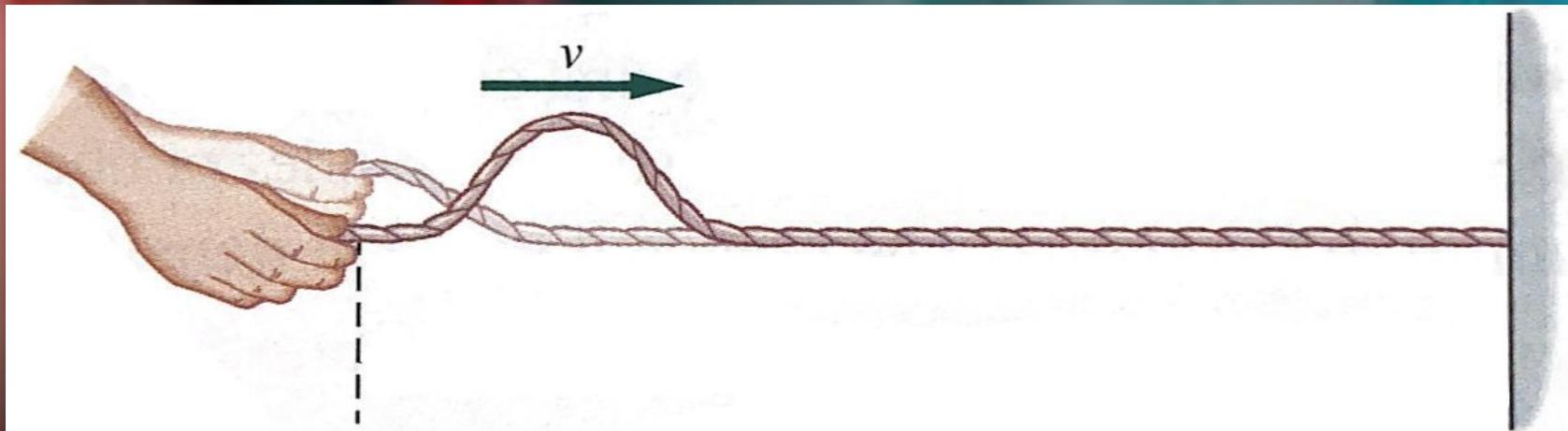
$$\mu = \frac{m}{L}$$

Velocità di propagazione di un'onda in una corda

Possiamo scrivere la relazione che esprime la velocità di un'onda in funzione della tensione F e della densità lineare:

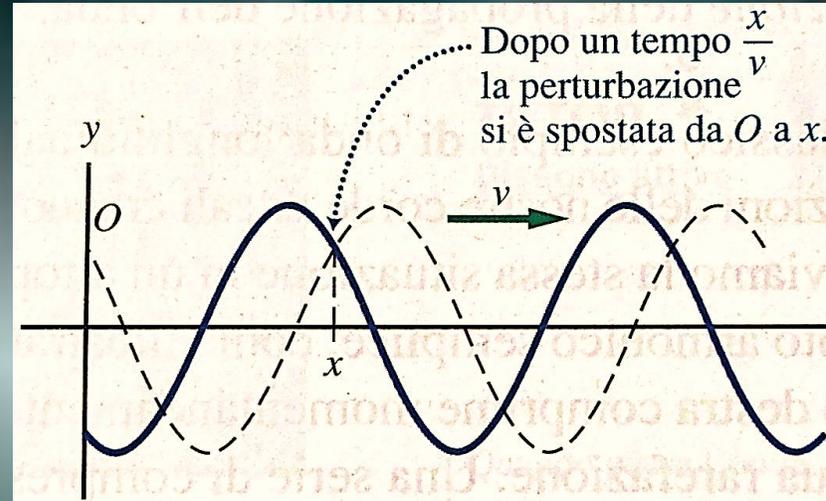
$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

La velocità aumenta con la tensione e diminuisce con l'aumentare della densità. In generale, la velocità di propagazione dell'onda aumenta all'aumentare della rigidità del mezzo e si riduce se diminuisce la densità del mezzo.

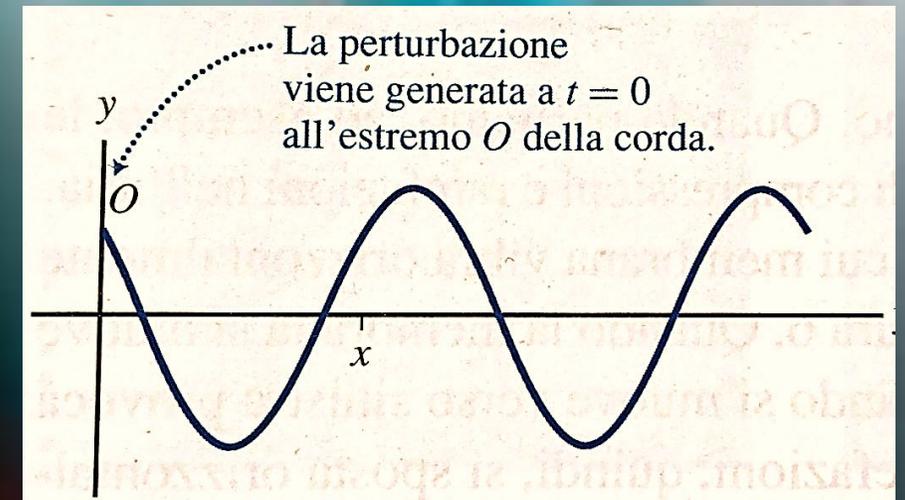


La funzione d'onda armonica

Se facciamo oscillare l'estremo di una corda con un moto armonico semplice, diamo origine ad un'onda che ha andamento sinusoidale. La direzione y indica lo spostamento verticale della corda e $y=0$ corrisponde alla corda tesa senza onde.



Volendo ricavare per un'onda armonica di questo tipo l'espressione matematica che descrive y in funzione del tempo t e della posizione x , significa che vogliamo definire la **funzione d'onda armonica**.



Onda progressiva

Se la funzione d'onda si propaga nel verso positivo dall'asse x , otteniamo:

$$y(x, t) = A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

Onda regressiva

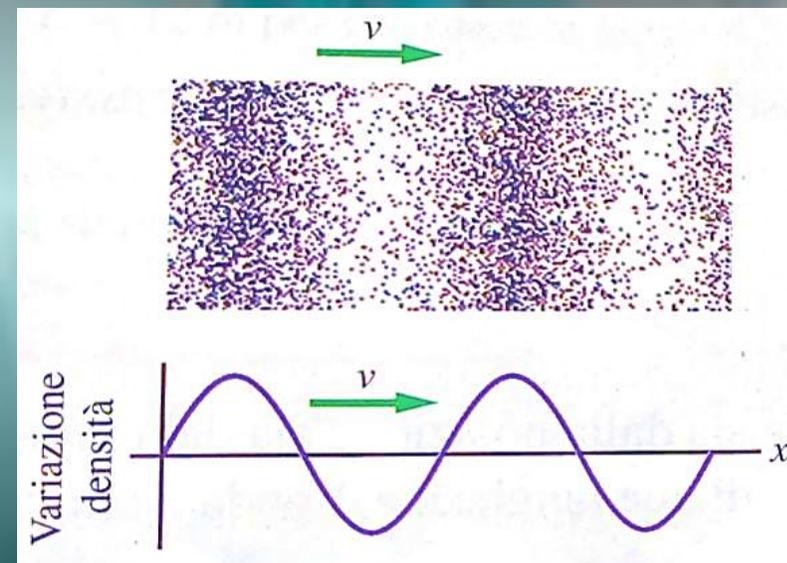
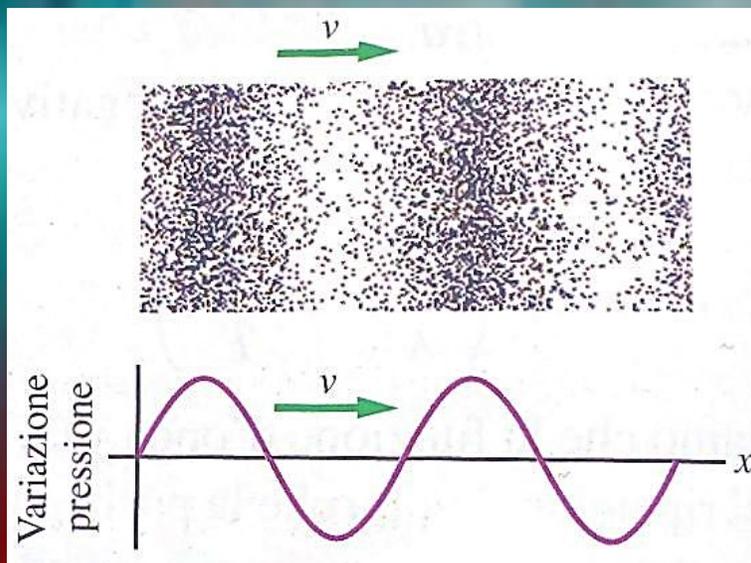
Se la funzione d'onda si propaga nel verso negativo dall'asse x , otteniamo

$$y(x, t) = A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{T} t \right)$$

ONDE LONGITUDINALI

In un'onda longitudinale lo spostamento delle singole particelle avviene nella stessa *direzione* della propagazione dell'onda.

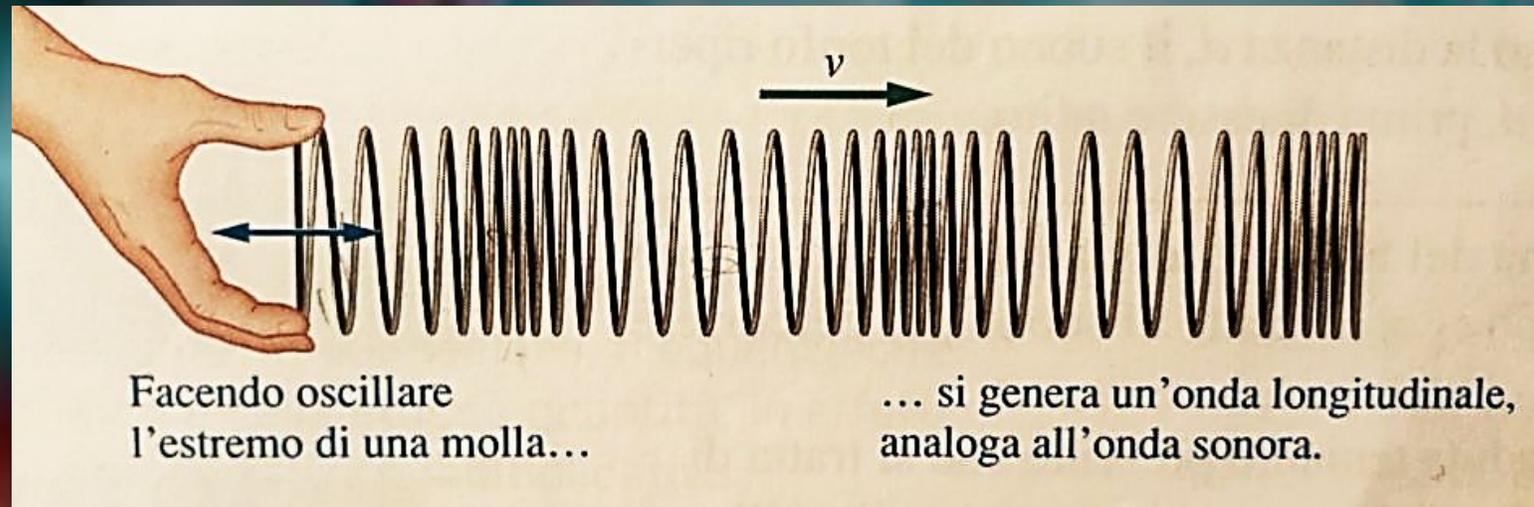
A prima vista l'onda longitudinale sembra non avere il caratteristico aspetto sinusoidale, ma se riportiamo sull'asse y la densità del mezzo in funzione di x , risulta evidente che essa oscilla in modo sinusoidale. Nelle regioni nelle quali la densità è elevata, anche la pressione è elevata, e in quelle nelle quali la pressione è bassa, anche la densità lo è. Una differenza è la definizione di creste e ventri: le prime sono i punti del mezzo che hanno la massima pressione e densità, i secondi sono i punti che hanno la minima pressione e densità.



Un classico esempio di onda longitudinale è il suono.

Le onde sonore

Un efficace modello meccanico delle onde sonore è rappresentato da una molla.

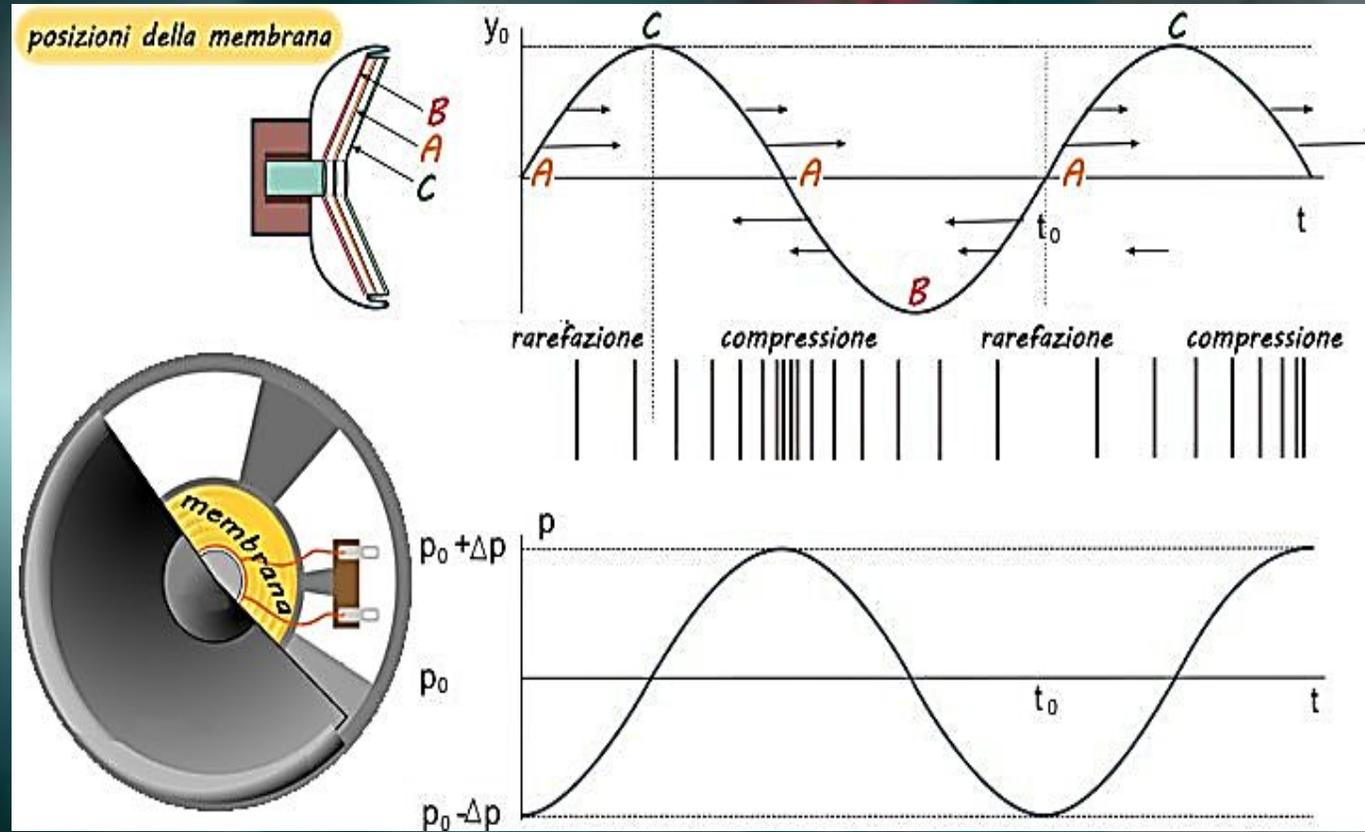


Come nel caso della molla, l'onda sonora si allontana dalla sorgente orizzontalmente ed è costituita da regioni compresse, che si alternano a regioni rarefatte.

Velocità di propagazione di un'onda sonora

La **velocità di propagazione** del suono è determinata dalle proprietà del mezzo attraverso il quale si propaga. Nell'aria, in condizioni di *pressione e temperatura* (20°) normali, la velocità di propagazione del suono è approssimativamente **343 m/s**.

La velocità di propagazione del suono nell'aria è direttamente collegata alla velocità delle molecole dell'aria. Inoltre la velocità di propagazione del suono aumenta con la temperatura: se l'aria viene riscaldata le molecole si muovono più rapidamente.



Le onde prodotte da una sorgente sonora si propagano *radialmente* con le creste che formano sfere concentriche attorno alla sorgente. Perciò la velocità di propagazione del suono non dipende dalla direzione, ma è la stessa in **tutte le direzioni**.

La frequenza di un'onda sonora

La **frequenza** determina il tono, o altezza, di un suono. Un suono è tanto più alto quanto maggiore è la frequenza dell'onda che lo produce, e di conseguenza, tanto più basso quanto minore è la frequenza dell'onda. Gli esseri umani possono udire suoni con frequenze comprese tra *20 Hz e 20000 Hz*. Suoni con frequenze superiori sono detti **ultrasuoni**, mentre quelli inferiori sono detti **infrasuoni**.

È importante sottolineare che la velocità di propagazione del suono è la stessa per qualsiasi frequenza.



$$v = \lambda f$$



La velocità v rimane sempre la stessa: se si raddoppia la frequenza di un'onda, la sua lunghezza si dimezza ma la sua velocità rimane uguale.

L'intensità del suono

Il volume di un suono è determinato dalla sua intensità, cioè dalla quantità di energia trasportata dall'onda che passa attraverso una data superficie in un definito intervallo di tempo.

Se l'energia E passa attraverso una superficie di area A nel tempo t , l'intensità I di un'onda che trasporta questa energia è:



$$I = \frac{E}{At}$$



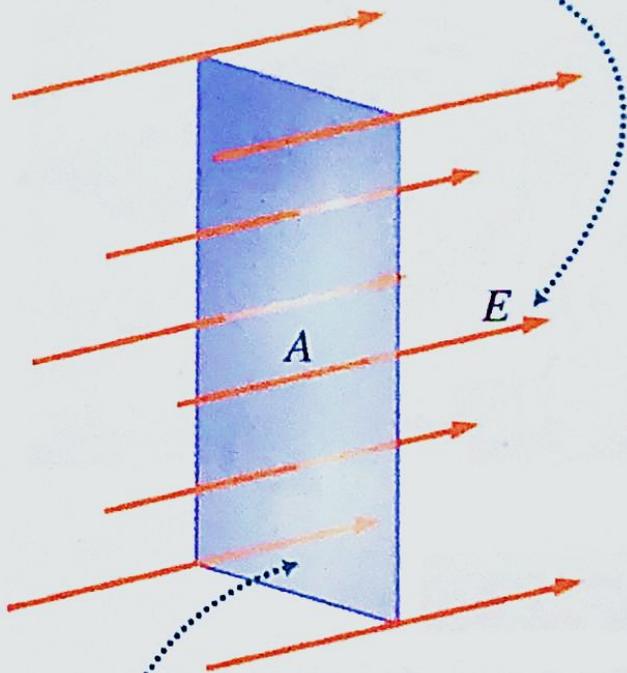
Tenendo conto che la potenza P è il rapporto tra l'energia e il tempo in cui l'onda si sviluppa, l'intensità è:

unità misura:
watt al metro
quadrato
(W/m^2)

$$I = \frac{P}{A}$$



Se un'onda trasporta un'energia E ...



... attraverso un'area A in un tempo t ...

... la corrispondente intensità è $I = E/(At) = P/A$, dove $P = E/t$ è la potenza.

Quando ascoltiamo un suono emesso da una sorgente sonora notiamo che il suo volume diminuisce man mano che ci allontaniamo dalla sorgente. Questo significa che anche l'intensità del suono sta diminuendo, perché man mano che ci si allontana l'energia emessa dalla sorgente si distribuisce su un'area maggiore. Se si considera una sorgente puntiforme che emette un suono con potenza P , l'intensità del suono per una sfera di raggio r :



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



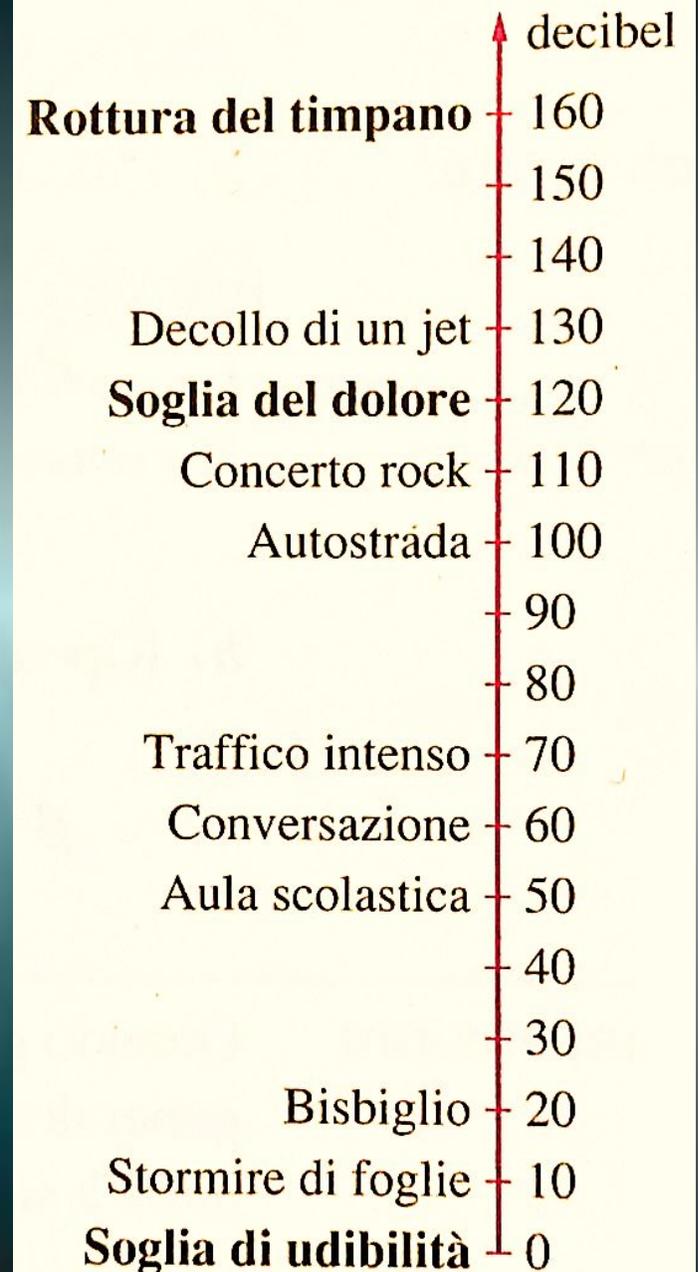
Livello di intensità

La nostra percezione del suono è tale che un aumento uniforme del volume corrisponde ad intensità che crescono in base ad un fattore moltiplicativo. Per questa ragione una scala conveniente per misurare il volume di un suono è una scala che dipende dal *logaritmo dell'intensità*.

Il livello di intensità di un'onda sonora

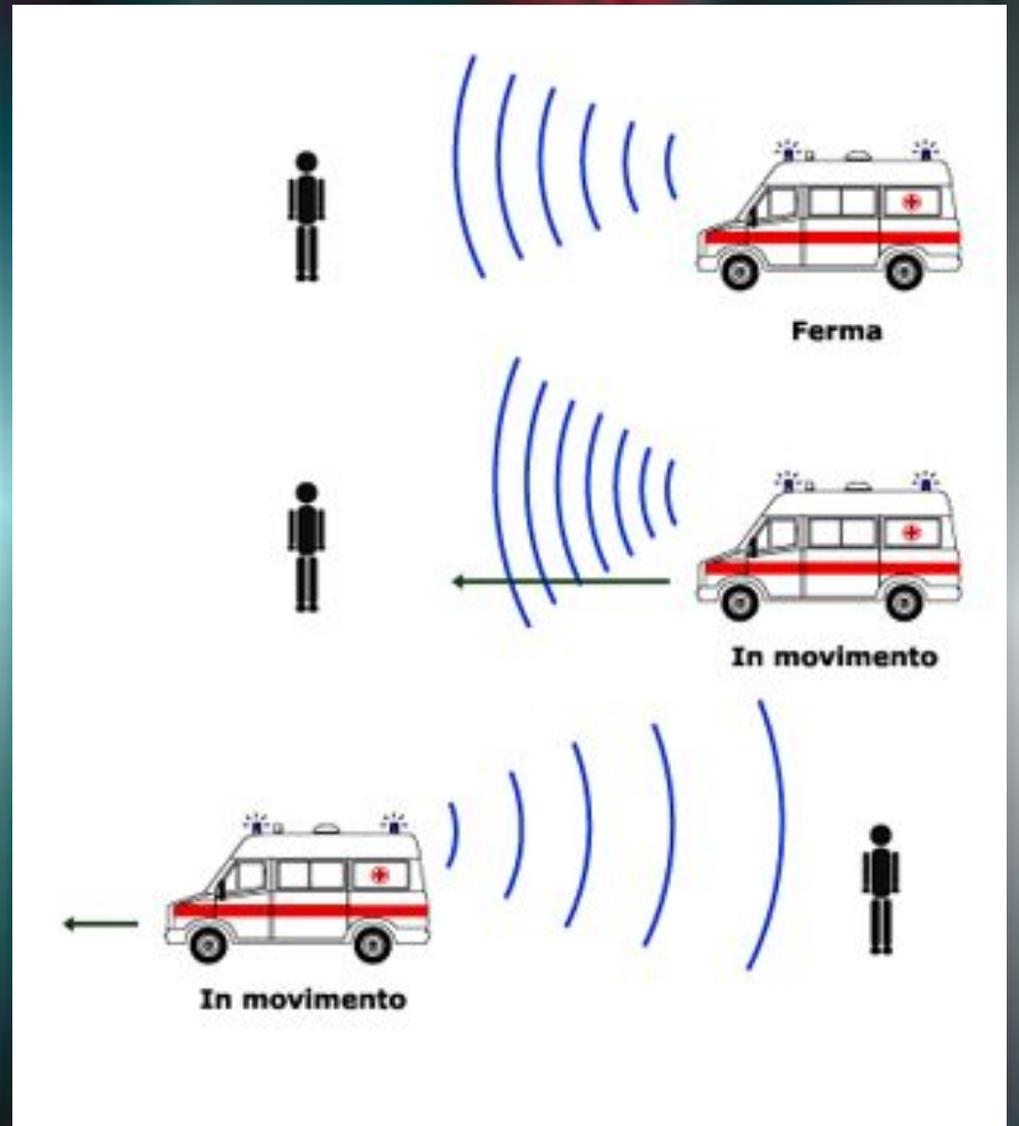
$$\beta = (10 \text{ dB}) \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Il livello di intensità β è una grandezza adimensionale: le uniche dimensioni che entrano nella sua definizione sono quelle delle intensità, che si elidono. Come unità di misura si usa il decibel (dB).



L'effetto Doppler

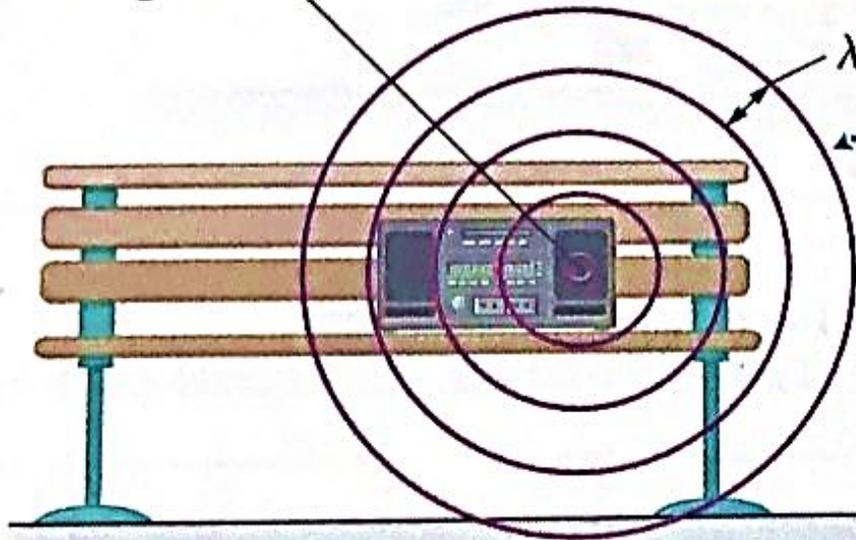
Il cambiamento di tono del clacson di un'automobile quando ci sorpassa è un fenomeno fisico riguardante il suono che sperimentiamo abitualmente. Questo cambiamento di tono, dovuto al moto relativo della sorgente del suono e del ricevitore, è chiamato effetto Doppler. L'effetto Doppler vale per tutti i tipi di fenomeni, non solo per il suono.



Osservatore in movimento

Le onde sonore provenienti da una sorgente in quiete formano dei cerchi concentrici, che si muovono verso l'esterno con velocità v .

Sorgente stazionaria



Velocità dell'onda

v



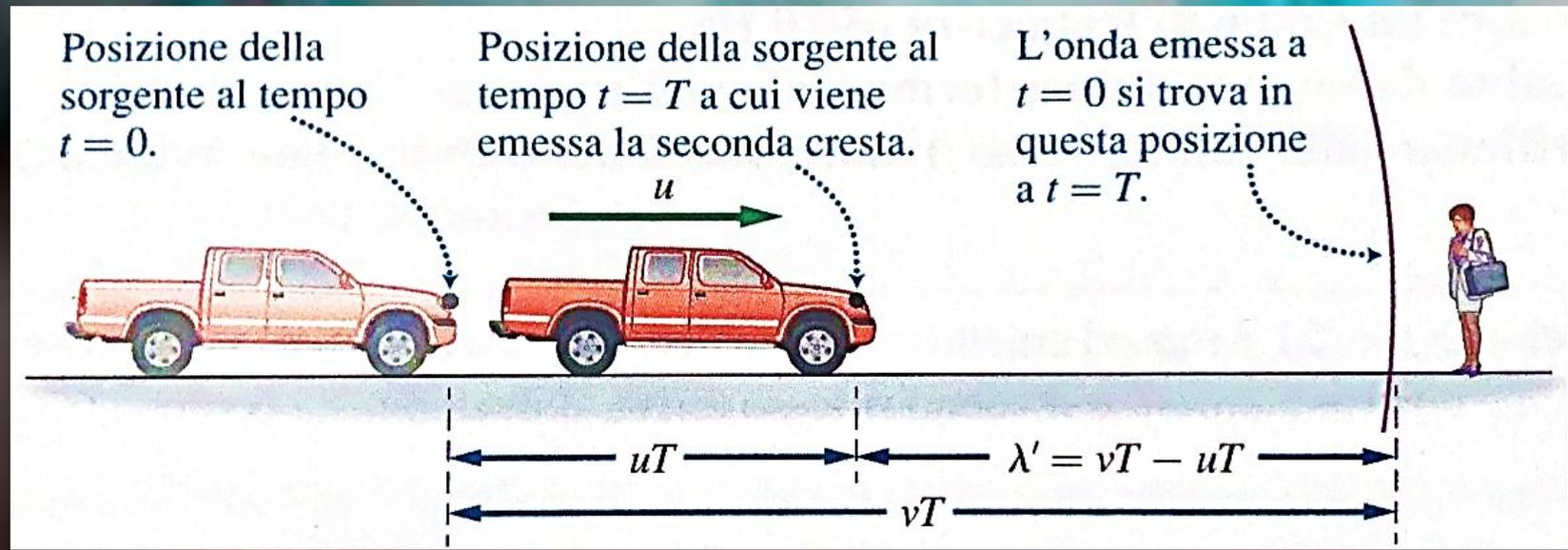
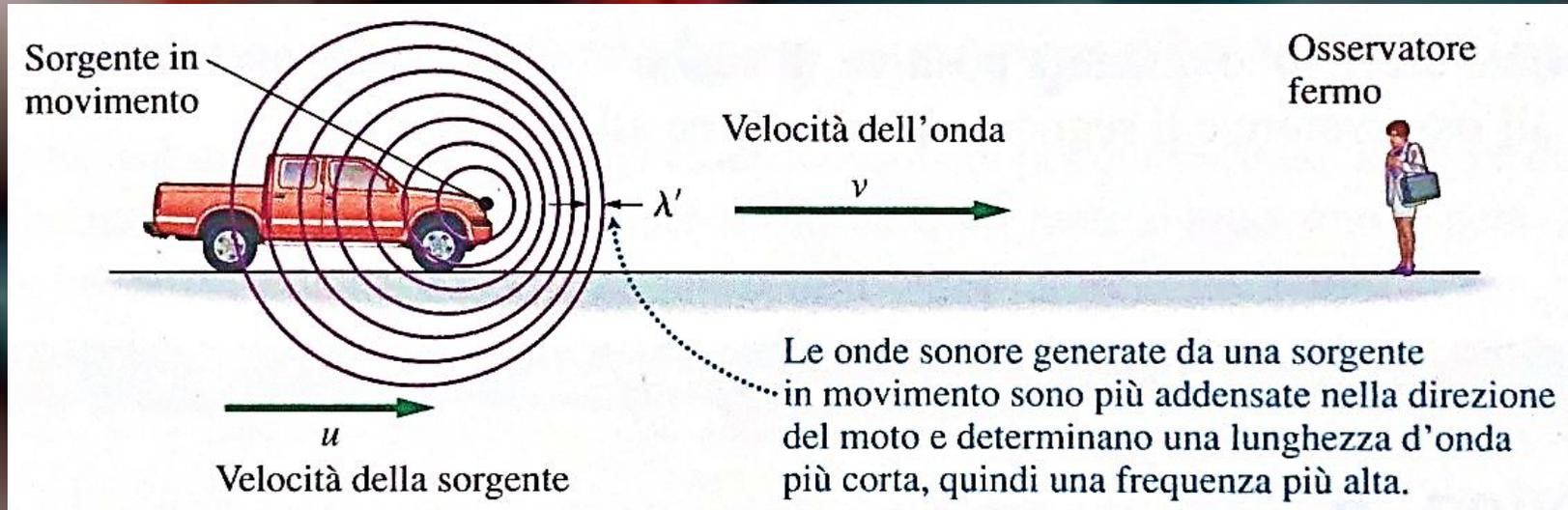
Velocità dell'osservatore

u

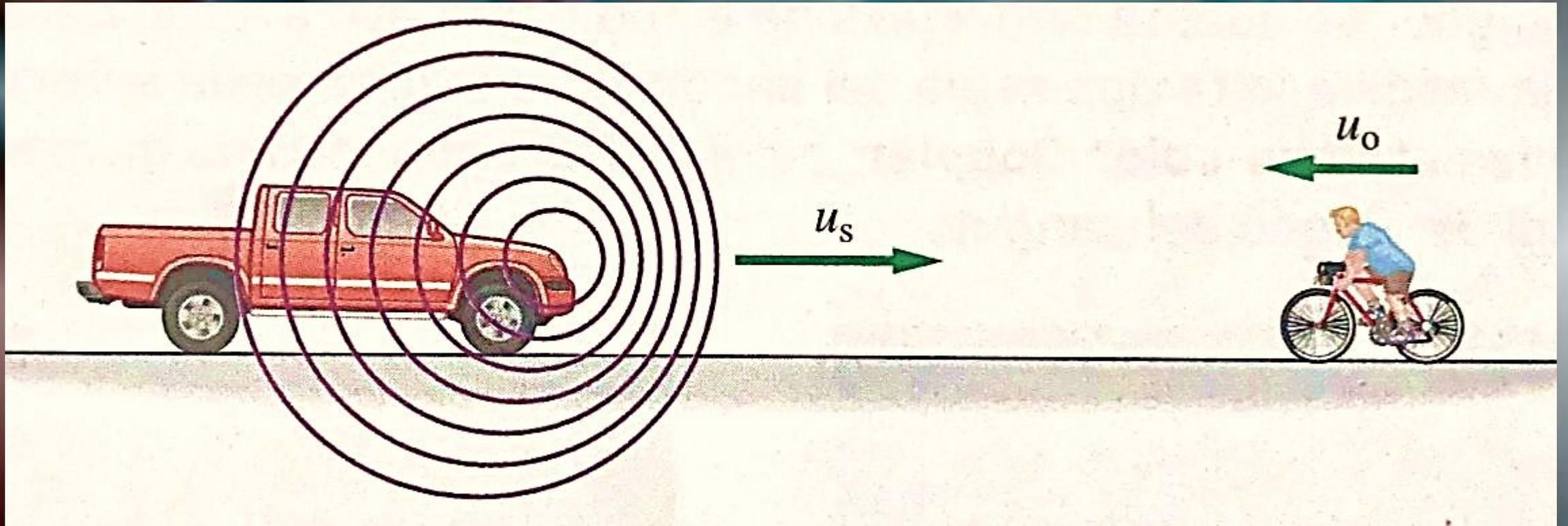


Per un osservatore che si muove verso la sorgente con velocità u , le onde si propagano con velocità $v + u$.

Sorgente in movimento

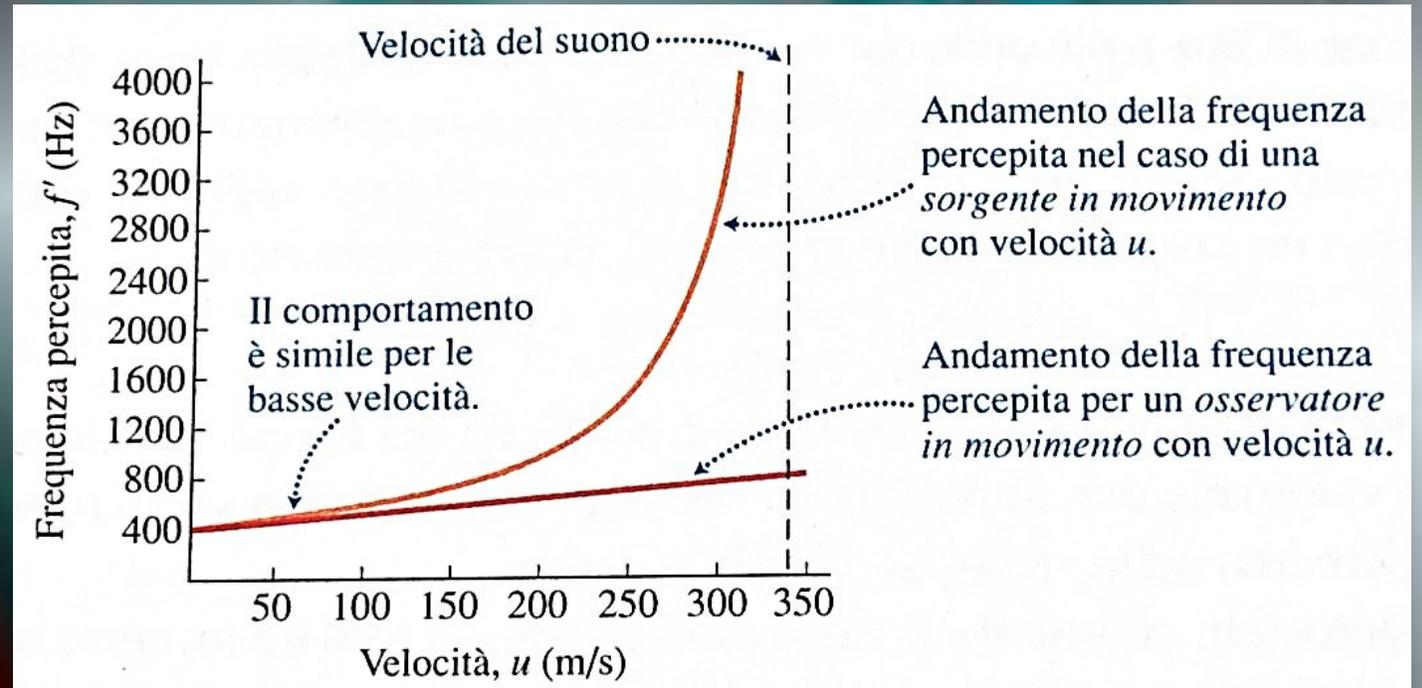


Osservatore e sorgente in movimento



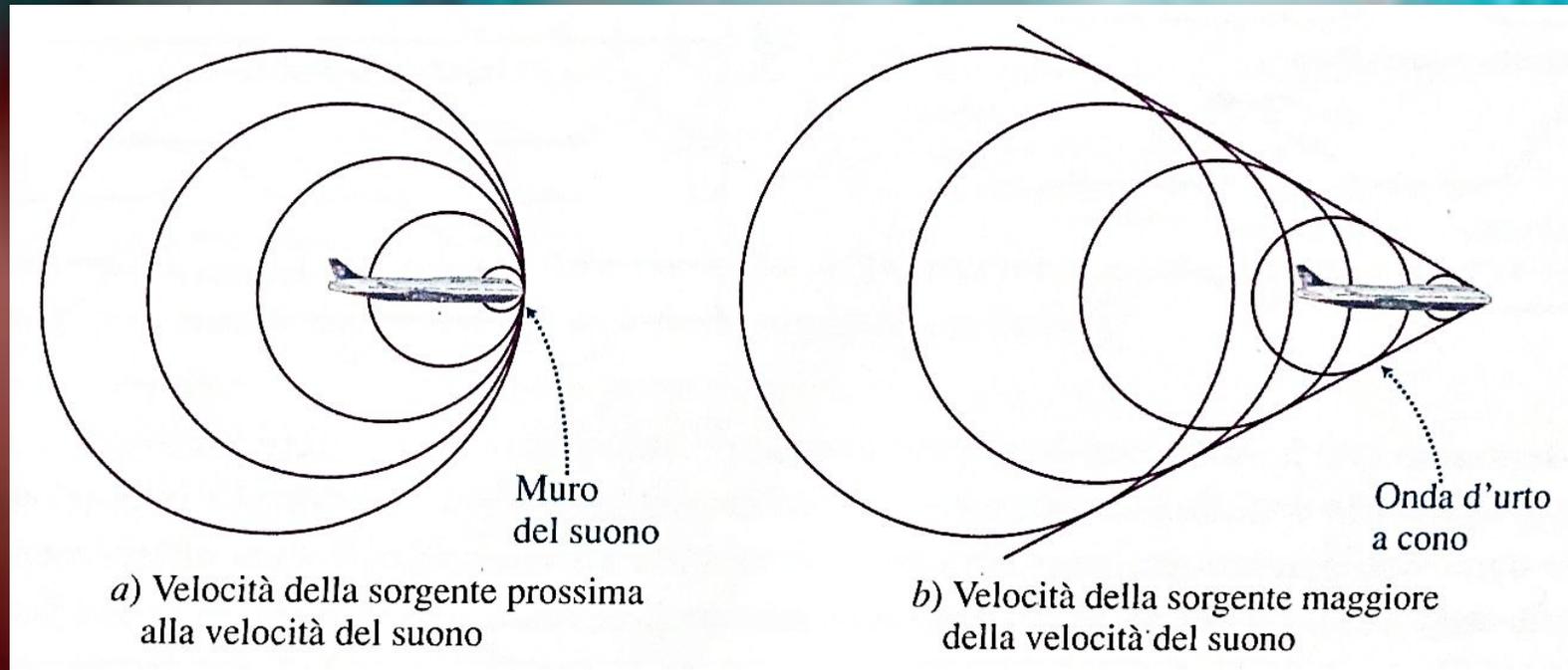
Superamento della velocità del suono

La frequenza Doppler per una sorgente in movimento aumenta enormemente per la velocità vicine a quella del suono, mentre la frequenza Doppler per un osservatore in movimento rimane relativamente bassa. Se la velocità dell'osservatore raddoppia, si dimezza semplicemente il tempo per muoversi da una cresta alla successiva e raddoppia la frequenza. La frequenza è proporzionale alla velocità.



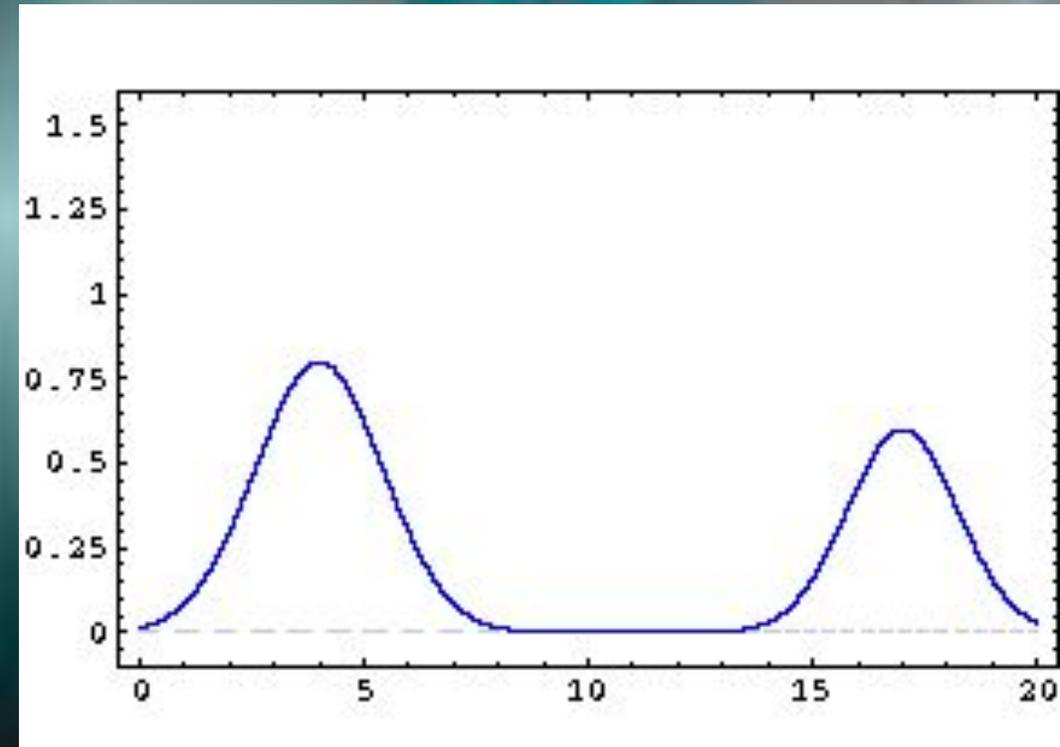
Quando invece si muove la sorgente le creste delle onde diventano più "fitte" nella direzione del moto, poiché la sorgente raggiunge le onde che si propagano. A mano a mano che la velocità della sorgente si avvicina alla velocità del suono, la separazione tra le creste tende ad annullarsi. La frequenza con la quale le creste oltrepassano un osservatore fermo si avvicina all'infinito.

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



Sovrapposizione di onde

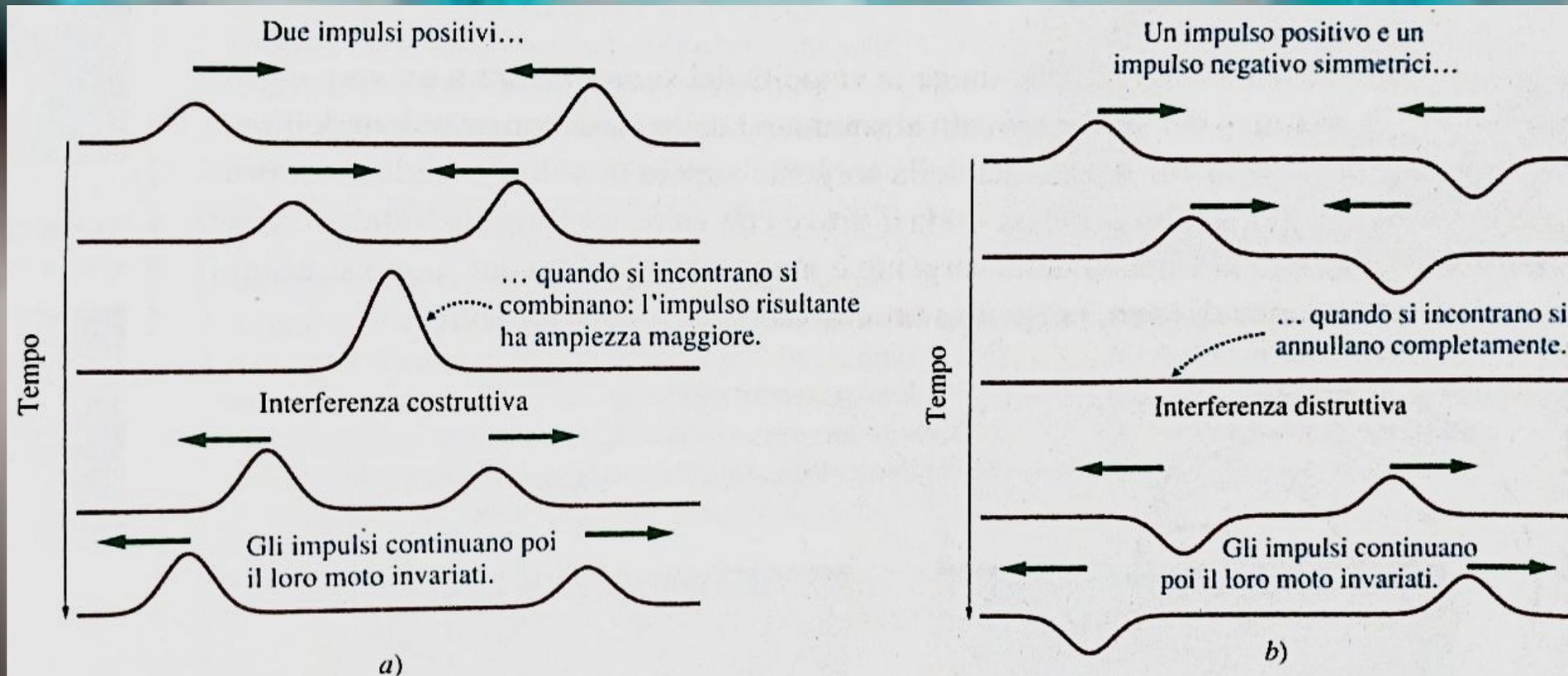
La combinazione di due o più onde che formano un'onda risultante viene detta **sovrapposizione**. Quando le onde sono di piccola ampiezza, si sovrappongono nel modo più semplice: si sommano. Per capire come si sviluppa la sovrapposizione al variare del tempo, pensiamo ad una corda lungo la quale viaggiano due impulsi nella stessa direzione, ma in verso opposto. Quando gli impulsi arrivano nello stesso punto, si sommano.



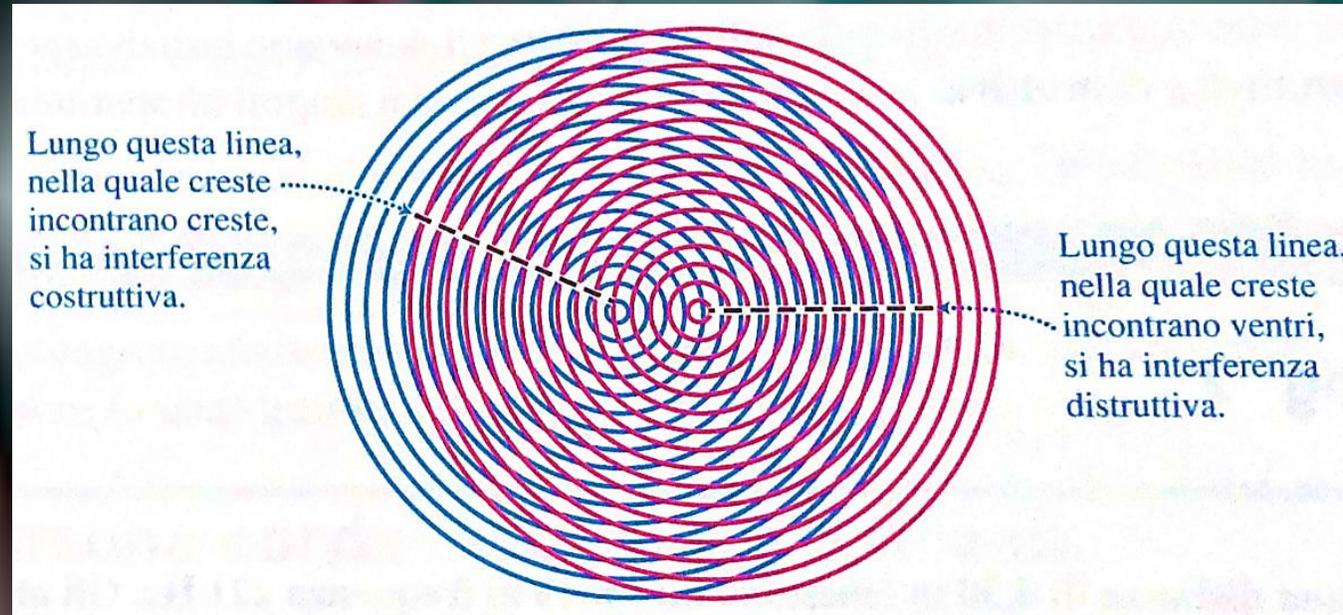
Interferenza di onde

Quando gli impulsi d'onda si combinano, l'impulso risultante ha un'ampiezza uguale alla somma delle ampiezza dei singoli impulsi. Questa situazione è detta **interferenza costruttiva**.

Se invece si combinano due impulsi, l'impulso positivo di un'onda si somma a quella negativa dell'altra e determina un impulso risultante uguale a 0: cioè gli impulsi momentaneamente si annullano l'un l'altro. Questa situazione è detta **interferenza distruttiva**.



Quando le onde si combinano, formano delle **figure di interferenza**, costituite da alcune zone di interferenza costruttiva e altre di interferenza distruttiva.

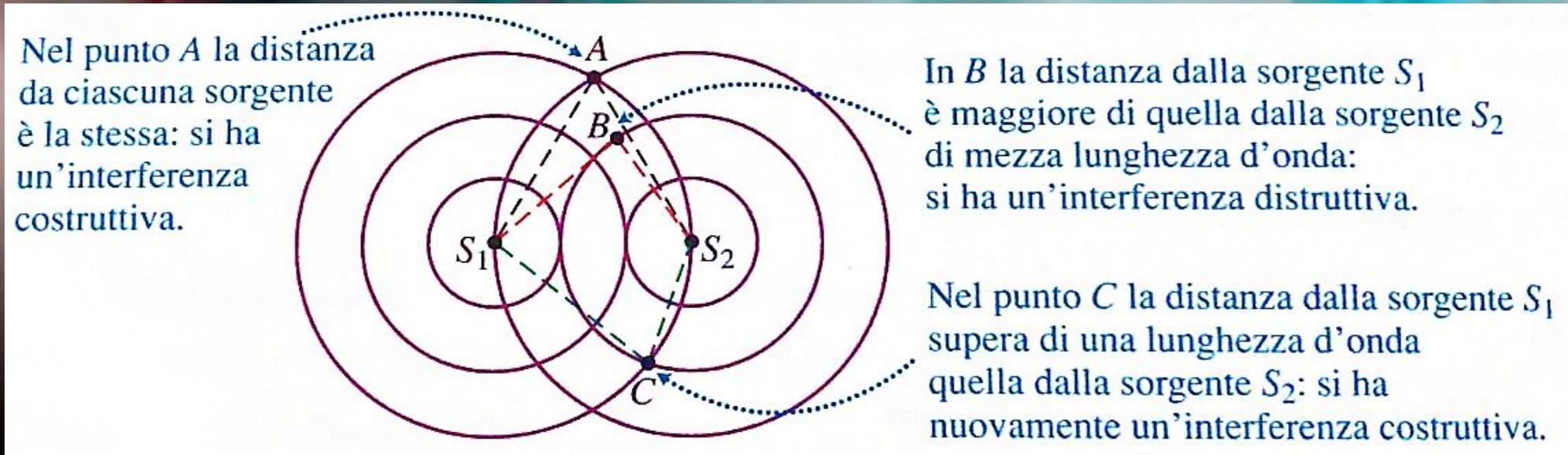


Per comprendere come si forma una figura di questo tipo, consideriamo un sistema costituito da due sorgenti identiche, che emettono onde formate da creste alternate a ventri. Sorgenti sincronizzate in questo mondo sono dette **in fase**.

In generale possiamo affermare che si ha interferenza costruttiva o distruttiva di onde provenienti da sorgenti in fase:

- si ha **interferenza costruttiva** nei punti in cui la differenza di cammino dalle due sorgenti è $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda \dots$ cioè è un *multiplo intero della lunghezza d'onda*.
- si ha **interferenza distruttiva** nei punti in cui la differenza di cammino dalle due sorgenti è $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2 \dots$ cioè un *multiplo dispari di mezza lunghezza d'onda*.

Se le due sorgenti sono **in opposizione di fase**, le condizioni per l'interferenza costruttiva e distruttiva si scambiano.





Lavoro svolto da:

Chiara Russo

Martina Genovese

Francesco Rocco

Fantino Ferrentino