

# LA NATURA DELLE ONDE

TRATTO DA:

I Problemi Della Fisica - Cutnell, Johnson, Young, Stadler – Zanichelli editore

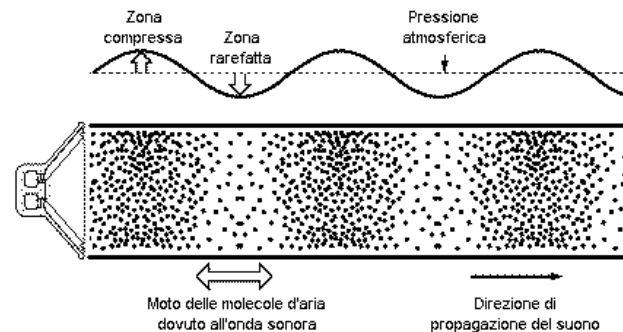
Fondamenti di fisica 1 – Halliday, Resnic, Walker – Zanichelli editore

Integrazioni e LO a cura del docente

# LA NATURA DELLE ONDE

---

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



# ONDA TRASVERSALE E ONDA LONGITUDINALE

---

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



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

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



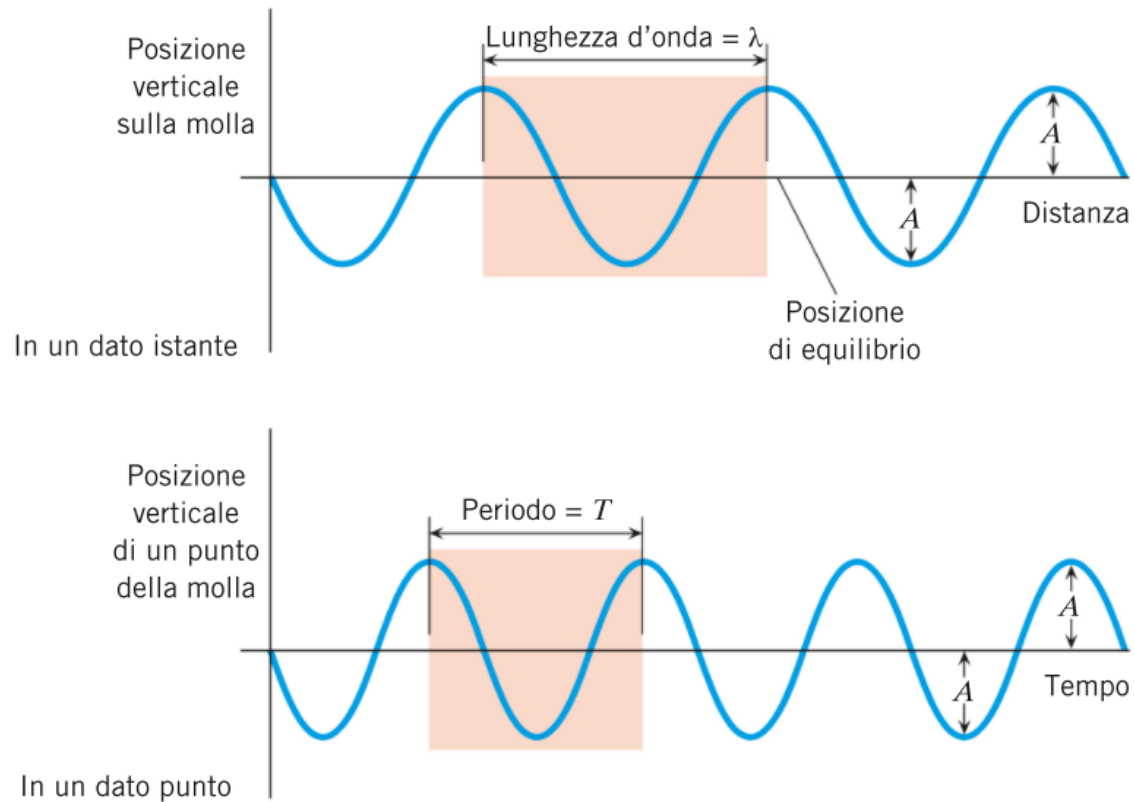
Le onde sonore e le onde sismiche primarie (tipo P) sono onde longitudinali.

# ONDA ARMONICA

---

Se muoviamo l'estremo della molla con moto periodico perpendicolare a essa, lungo la molla si propaga una perturbazione detta onda periodica. In particolare, se questo moto è armonico sulla molla si propaga un'onda armonica.

# CARATTERISTICHE DELL'ONDA

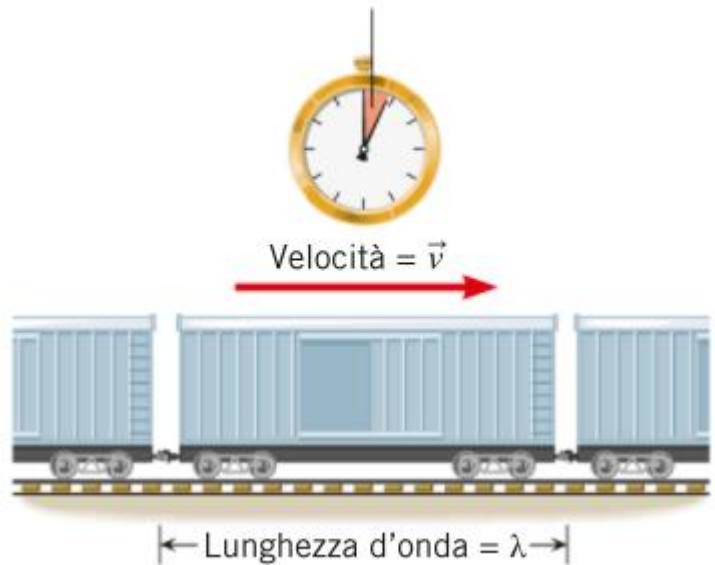


**Ampiezza  $A$ , cresta** (il punto più alto),  
**ventre** (il punto più basso), **lunghezza d'onda**  
 **$\lambda$ , ciclo, periodo  $T$  e frequenza  $f$ .**

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

# VELOCITA' DELL'ONDA

---



la velocità di propagazione di un'onda di lunghezza d'onda  $\lambda$  e periodo  $T$  è

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

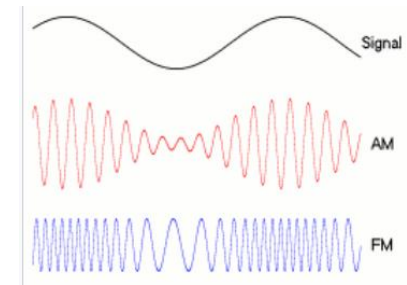
# ESEMPIO

---

## **ESEMPIO 1** La lunghezza d'onda delle onde radio

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

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



# ESERCIZI

---

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

► Qual è la frequenza di questa onda luminosa?

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

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



# LA VELOCITA' DI PROPAGAZIONE SULLA CORDA

---

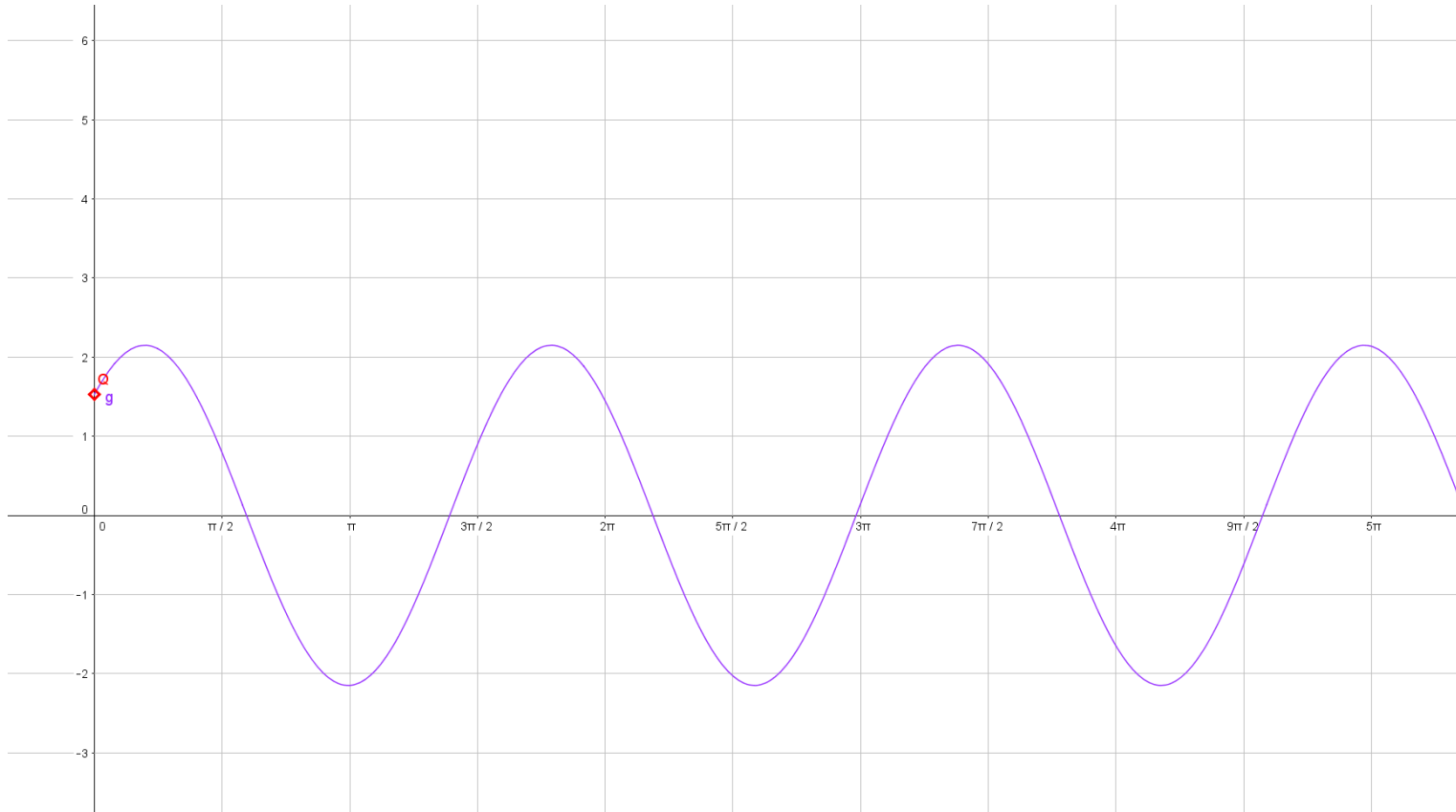
La velocità di propagazione di un'onda meccanica dipende dalle caratteristiche del mezzo in cui si propaga.

Se si considera una corda tesa e si imprime una forza trasversale (percuotendo la corda), si rileva che per oscillazioni di piccola ampiezza si ha un aumento della velocità all'aumentare della forza (F) impressa alla corda e una diminuzione della velocità di propagazione all'aumentare della massa (m) per unità di lunghezza (L).

$$v = \sqrt{\frac{F \cdot L}{m}}$$

# ASPETTI GONIOMETRICI DI UN'ONDA ARMONICA

---



Propagazione verso +x:

$$y = A \cdot \text{sen} \left( 2\pi f t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$$

Oppure:

$$y = A \cdot \text{sen} \left( 2\pi f \left( t - \frac{x}{v} \right) \right)$$

# ONDE SONORE LONGITUDINALI

---

Il suono viene prodotto da una sorgente sonora:

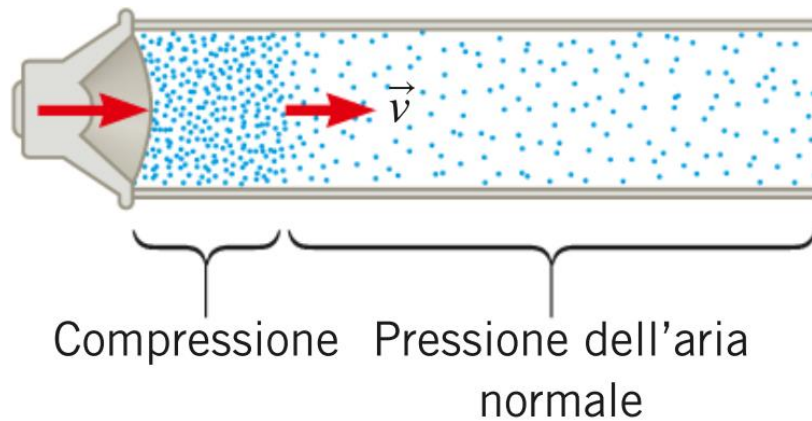
- ❖ Strumento musicale
- ❖ Corde vocali dell'uomo
- ❖ La membrana elastica di un altoparlante



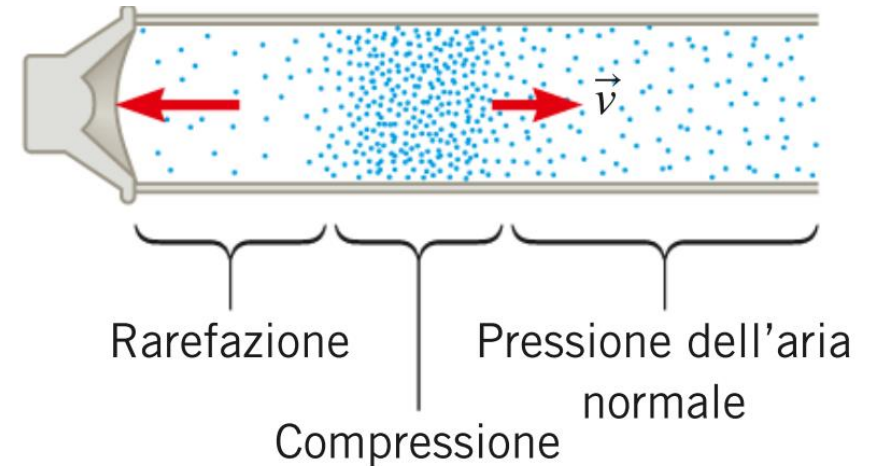
# COMPRESSIONE E RAREFAZIONE

Onda longitudinale. La propagazione avviene solo in presenza di un mezzo di trasporto materiale dell'energia.

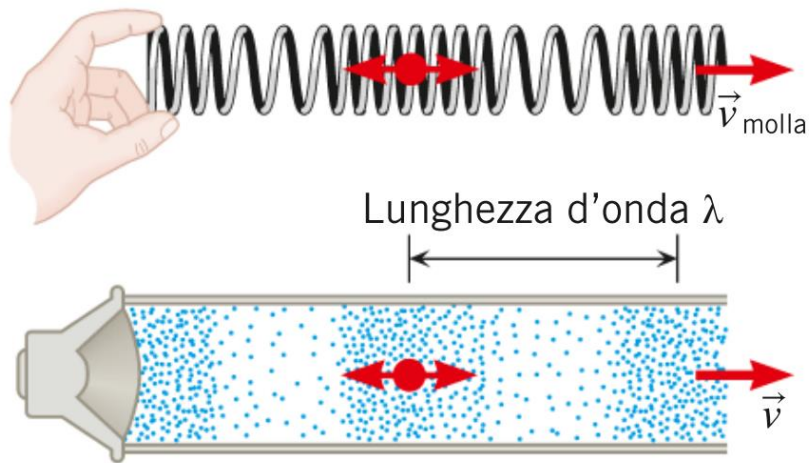
Comportamento di un  
altoparlante



B



# PERTURBAZIONE DELLA MATERIA SENZA SPOSTAMENTO



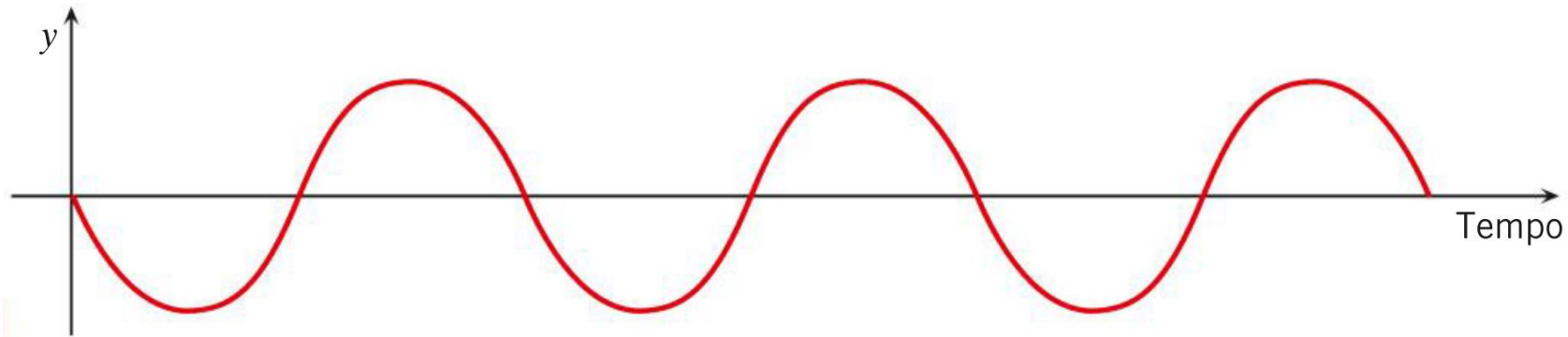
**Figura 11**

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

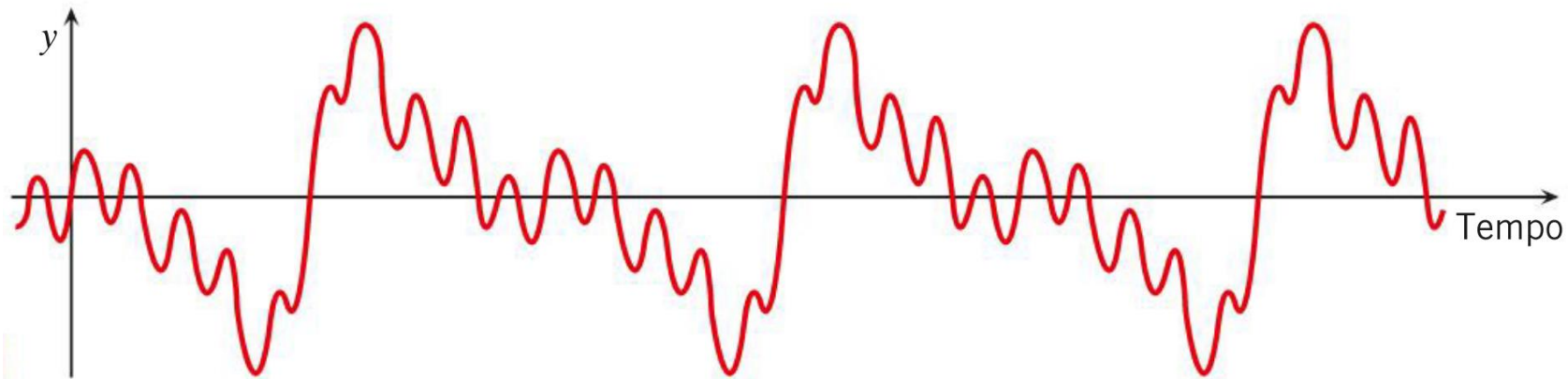
La lunghezza d'onda è la distanza che intercorre tra i punti medi di due compressioni o rarefazioni.

# SUONO PURO E SUONO COMPLESSO

---



Suono puro



Suono complesso  
con frequenza  
fondamentale

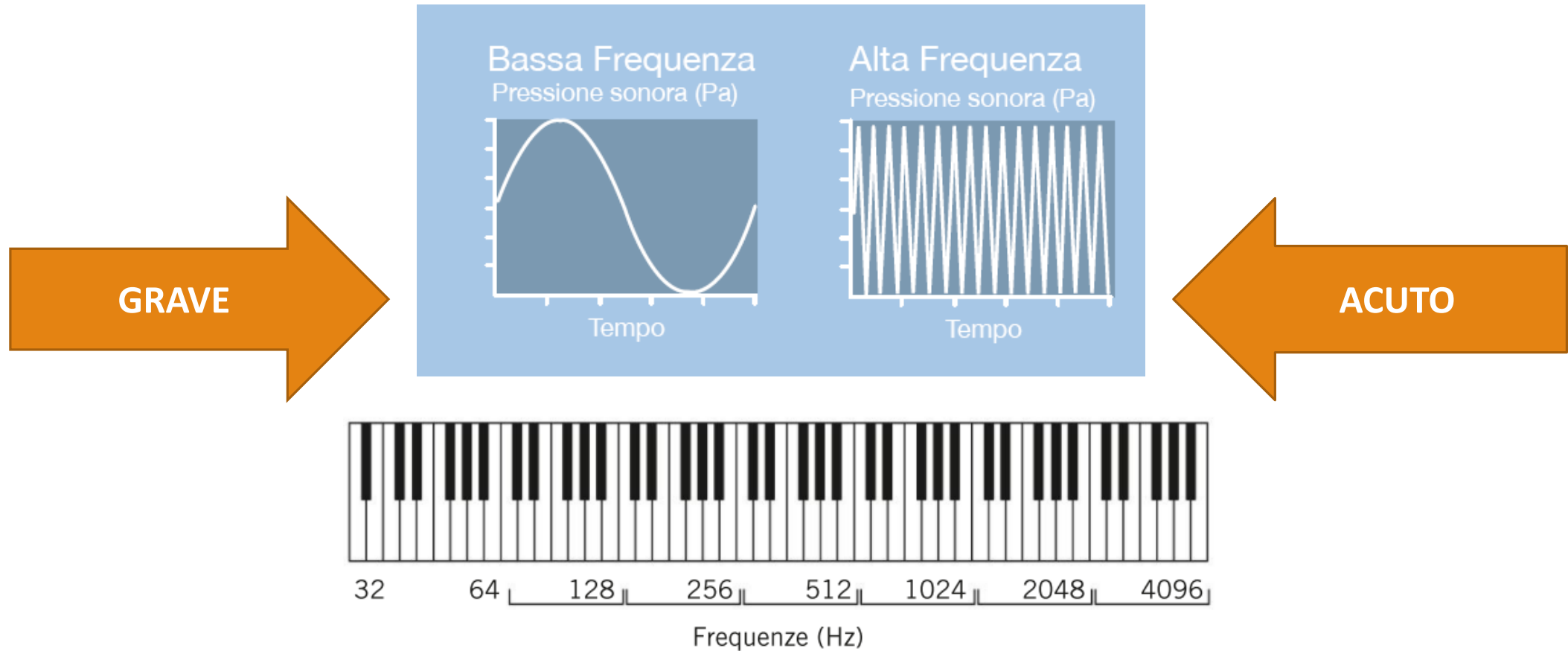
# FREQUENZE PERCEPIBILI DALL'UOMO

---

Una persona giovane riesce a sentire suoni che hanno frequenze comprese tra 20 Hz e 20 000 Hz. 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**.

# ALTEZZA DEL SUONO

---

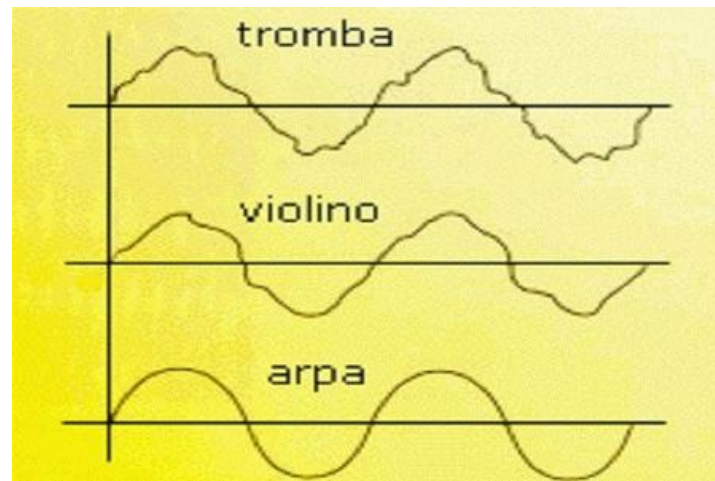




# IL TIMBRO

---

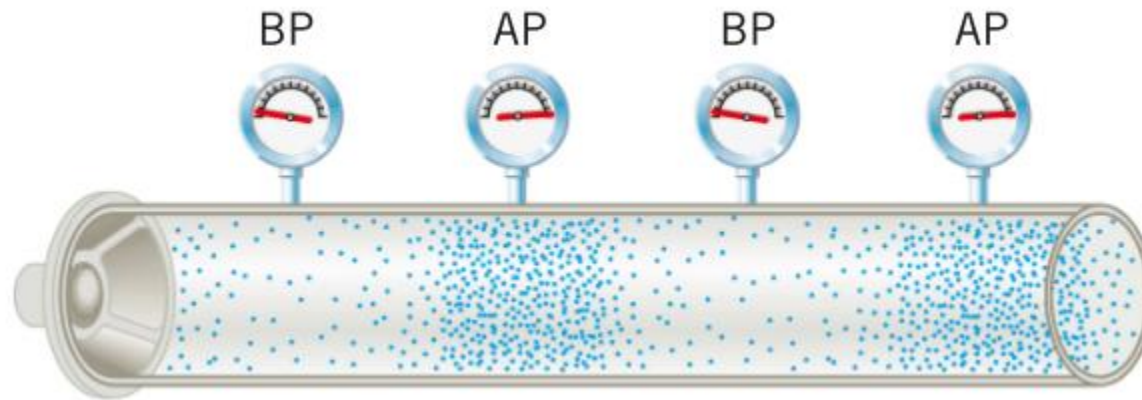
Il timbro dipende dalla particolare legge periodica con cui oscillano le particelle quando sono investite dall'onda sonora



# INTENSITÀ DEL SUONO

---

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.



# LA VELOCITÀ DEL SUONO

Velocità di propagazione del suono:

$v_g = \text{velocità nei gas}$

$v_l = \text{velocità nei liquidi}$

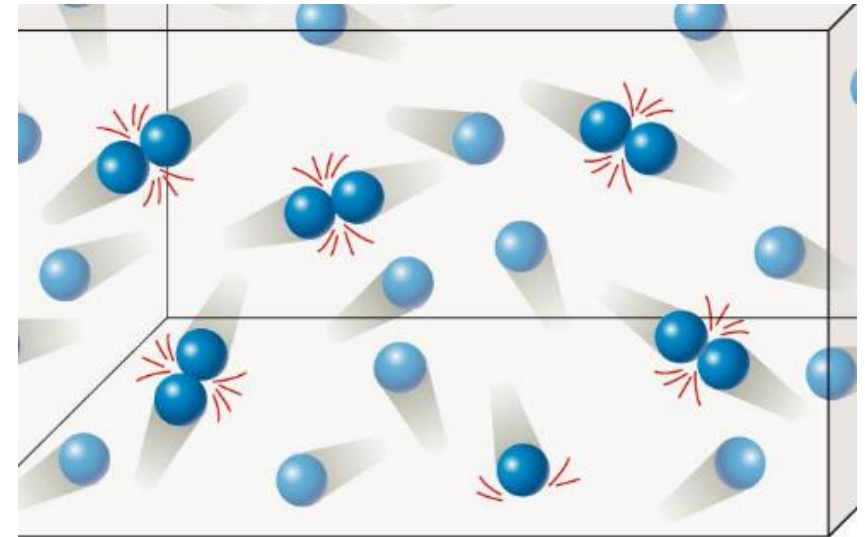
$v_s = \text{velocità nei solidi}$

$$v_g < v_l < v_s$$

Sostanza	Velocità (m/s)
<b>Gas</b>	
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
<b>Liquidi</b>	
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
<b>Solidi</b>	
Acciaio	5960
Piombo	5010
Rame	1960
Vetro (Pyrex)	5640

# LA VELOCITÀ DEL SUONO PER ECCESSO

La velocità del suono dipende dalla proprietà del mezzo. **In un gas**, le condensazioni e le rarefazioni di un'onda sonora si propagano da un punto all'altro solo quando le particelle che compongono la materia collidono tra esse. Dunque, in un gas, la velocità di propagazione corrisponde alla velocità quadratica media delle particelle del gas in cui si propaga e dipende dalla temperatura assoluta del gas e dalla massa di ogni particella.



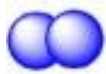
$$v_{\text{qm}} = \sqrt{3k \frac{T}{m}}$$

# LA VELOCITÀ DEL SUONO

---

La condensazione e la rarefazione di un gas perturbato da un'onda sonora si comportano come due **trasformazioni adiabatiche**, in quanto, date le distanze tra i due fenomeni non c'è scambio di calore tra la compressione che avviene a temperatura più elevata e la rarefazione che avviene a temperatura più bassa.

$$v_{\text{qm}} = \sqrt{\cancel{3}k \frac{T}{m}} \quad \longrightarrow \quad v = \sqrt{\gamma k \frac{T}{m}}$$



$$\gamma = \frac{7}{5}$$



$$\gamma = \frac{5}{3}$$

# LA POTENZA DEL SUONO

---

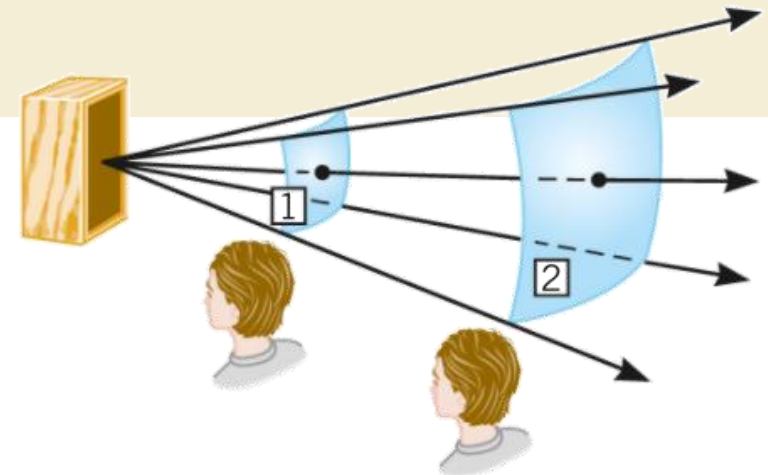
La **quantità di energia trasportata in un secondo** da un'onda è chiamata **potenza** dell'onda e nel Sistema Internazionale si misura in joule al secondo (J/s), cioè in watt (W).

# INTENSITÀ DI UN SUONO

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

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

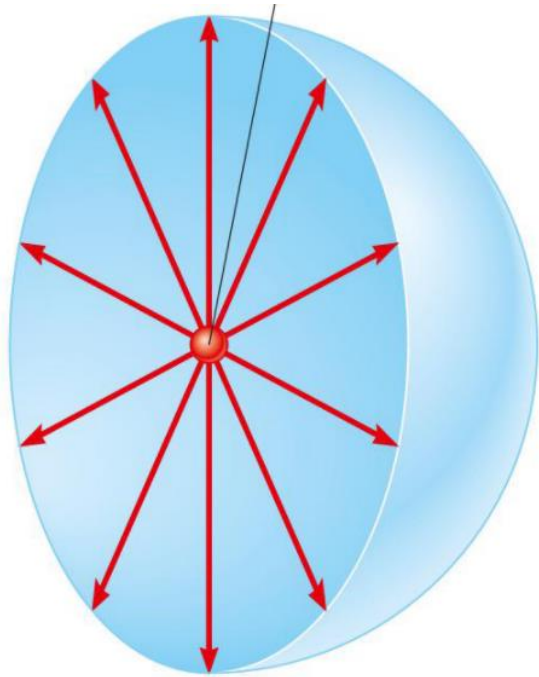
**Unità di misura:** watt al metro quadrato ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



# INTENSITÀ DI UN'ONDA SFERICA UNIFORME

---

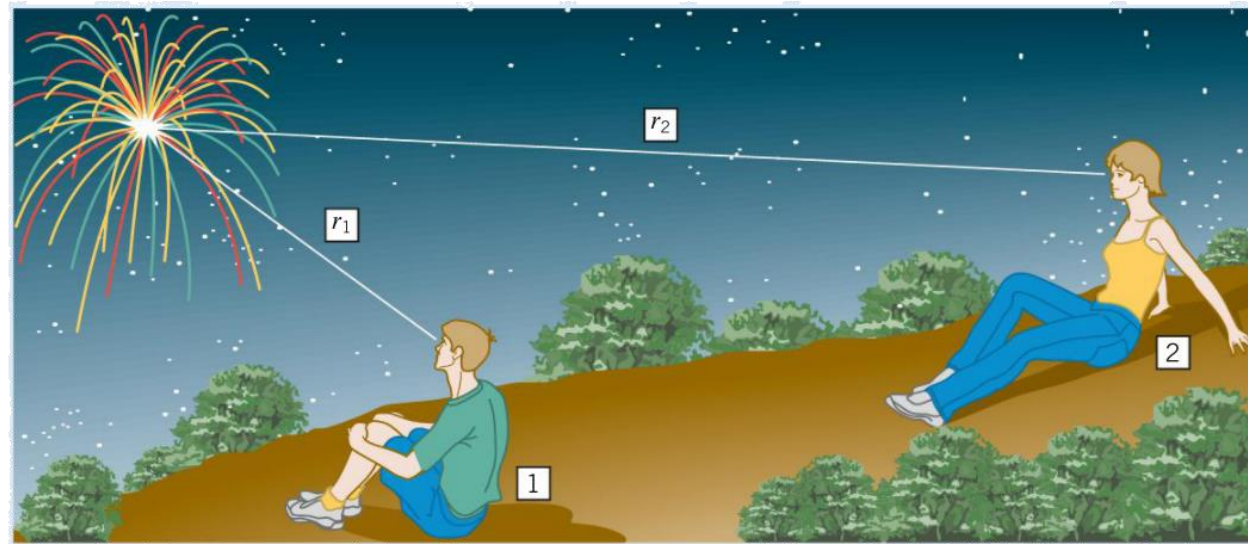
Se una sorgente emette onde sonore in modo uniforme in tutte le direzioni, l'intensità sonora è



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



# ESEMPIO



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

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

# PROBLEMA

---

Un uomo alto  $1,7\text{ m}$  si trova a  $4\text{ m}$  dalla parete esterna della sua abitazione. Sulla parete, a un'altezza di  $7\text{ m}$ , si attiva la sirena del sistema di allarme, raggiungendo l'uomo dopo  $22\text{ ms}$ .

Con quale velocità si è propagato il suono?

Sapendo che la sirena ha una potenza di  $50\text{ w}$  e trascurando le sue dimensioni, qual è l'intensità del suono che investe l'uomo? (GB)

# LIVELLO DI INTENSITÀ SONORA

---

Un suono con una frequenza di 1000 Hz, perché possa essere percepito dall'orecchio umano, deve rientrare nella soglia minima di udibilità

$$I_o = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

La soglia massima, detta soglia del dolore è di 10 W/m<sup>2</sup>.

Data la vastità dell'intervallo di udibilità e la non linearità della percezione dei suoni (la nostra percezione del volume di un suono dipende dall'intensità sonora secondo una relazione che non è lineare ma logaritmica e **definendo la misura di un rapporto come il suo logaritmo si ottiene una quantità additiva.**), il livello di intensità sonora è definito dalla relazione:

$$\beta = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_o}$$

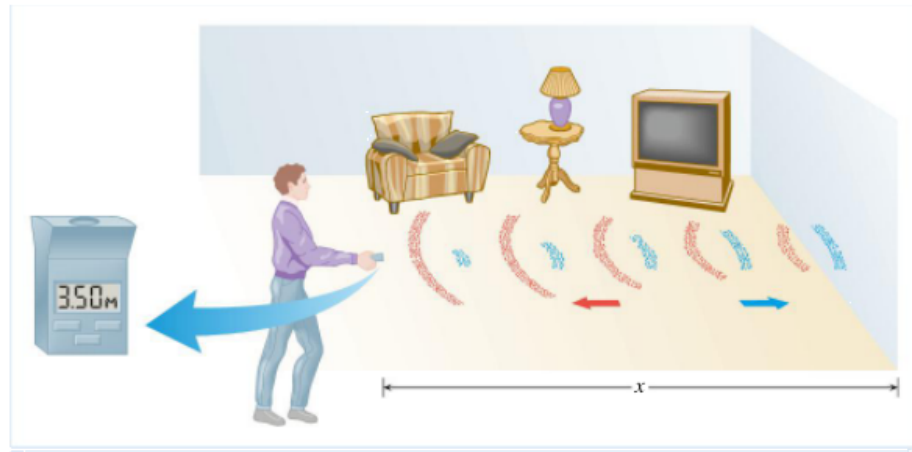
Nel Sistema Internazionale il livello di intensità sonora è espresso in decibel (dB=β).

# INTENSITÀ SONORE DI ALCUNI SUONI

---

	Intensità sonora (W/m <sup>2</sup> )	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 m)	$3,2 \cdot 10^{-6}$	65
Interno di un'automobile nel traffico	$1,0 \cdot 10^{-4}$	80
Rumore di un'automobile senza marmitta	$1,0 \cdot 10^{-2}$	100
Concerto rock dal vivo	1,0	120
Soglia del dolore	10	130

# LA FISICA DI UN MISURATORE DI DISTANZE A ULTRASUONI



La figura 19 mostra un *misuratore di lunghezze a ultrasuoni*, che viene utilizzato per misurare la distanza di un grosso oggetto, come ad esempio una parete. Per effettuare la misurazione, il dispositivo genera un impulso di ultrasuoni che viaggia verso la parete. Questo impulso colpisce la parete e, come un'eco, viene riflesso e torna indietro al misuratore, il quale rileva il tempo necessario per l'andata e per il ritorno dell'impulso. All'interno del misuratore, un microprocessore calcola la distanza dalla parete e ne visualizza il valore su un display digitale. Per effettuare il calcolo, il microprocessore utilizza un valore preimpostato per la velocità del suono. Supponiamo che, in un giorno in cui la temperatura dell'aria è 32 °C, il tempo di andata e ritorno dell'impulso di ultrasuoni sia  $t_{A-R} = 20,0$  ms.

- Determina la distanza tra il misuratore a ultrasuoni e la parete.

$$c_T = \frac{343 - 331}{20 - 0} \Rightarrow c_T = \frac{3}{5}$$

$$v = 331 + \frac{3}{5} \cdot 32$$

$$v \cong 350$$

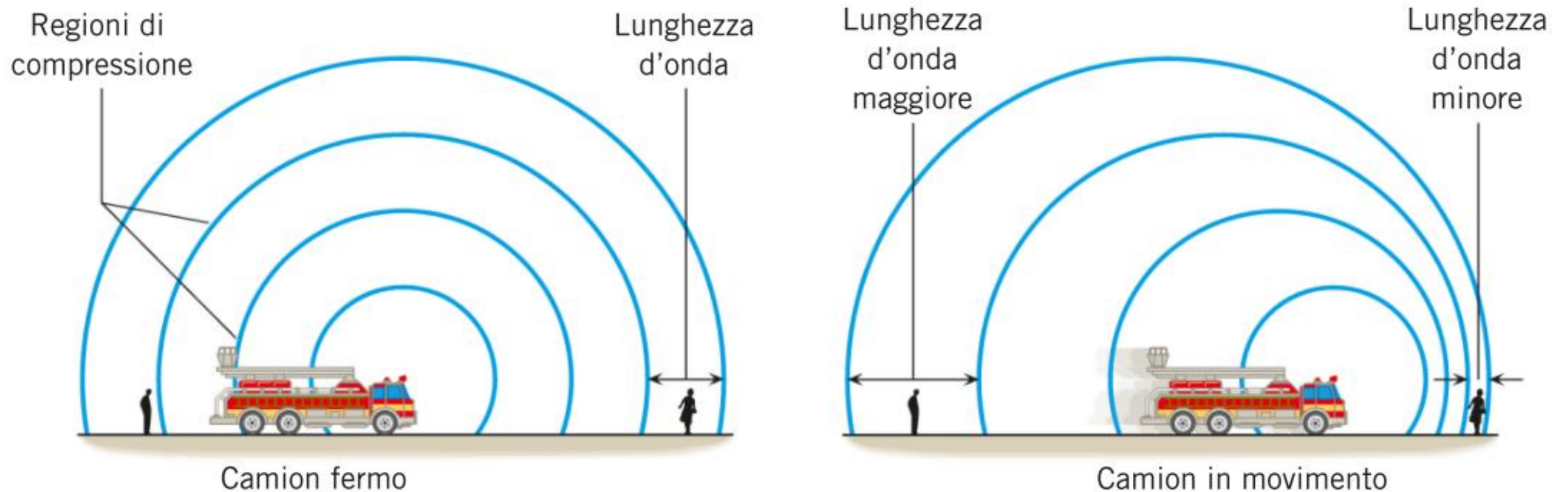
$$d = \frac{350 \cdot (0,02 \text{ s})}{2}$$

$$d = 3,5 \text{ m}$$

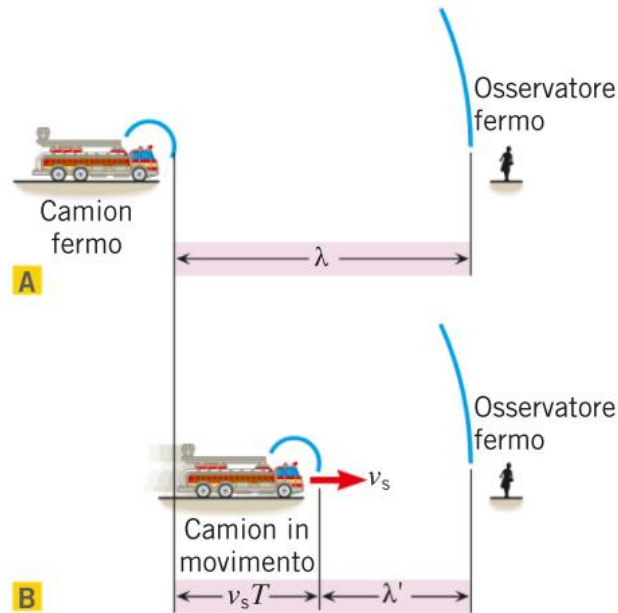
Sostanza	Velocità (m/s)
<b>Gas</b>	
Aria (a 0 °C)	331
Aria (a 20 °C)	343
Biossido di carbonio (a 0 °C)	259
Elio (a 0 °C)	965
Ossigeno (a 0 °C)	361
<b>Liquidi</b>	
Acqua dolce (a 20 °C)	1482
Acqua di mare (a 20 °C)	1522
Alcol etilico (a 20 °C)	1162
Cloroformio (a 20 °C)	1004
Mercurio (a 20 °C)	1450
<b>Solidi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

# 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 VS OSSERVATORE



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

*Sorgente in moto  
verso un osservatore fermo*

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

La frequenza del suono percepito dal ricevitore è maggiore della frequenza del suono emesso dalla sorgente.

# SORGENTE SI ALLONTANA DALL'OSSERVATORE

---



*Sorgente che si allontana  
da un osservatore fermo*

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

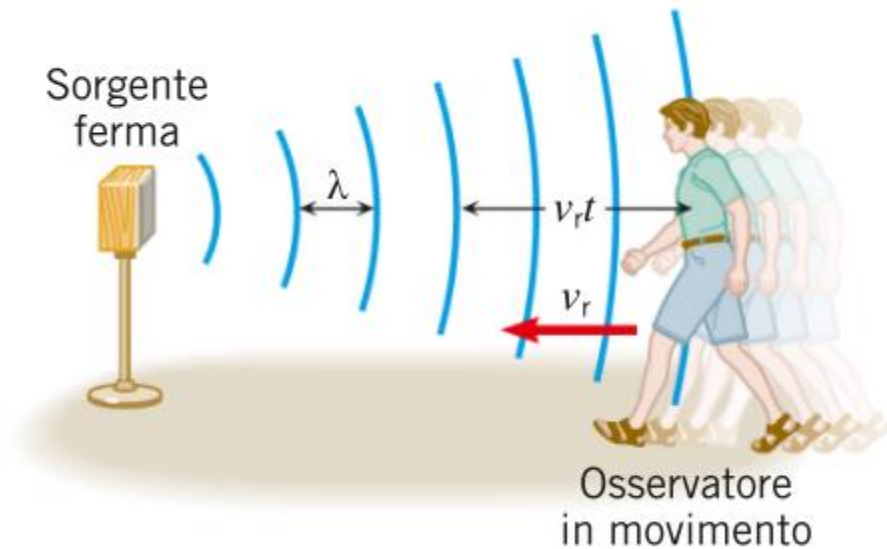
$$f_r = f_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}}$$

La frequenza del suono percepito dal ricevitore è minore della frequenza del suono emesso dalla sorgente.



# SORGENTE FERMA

---



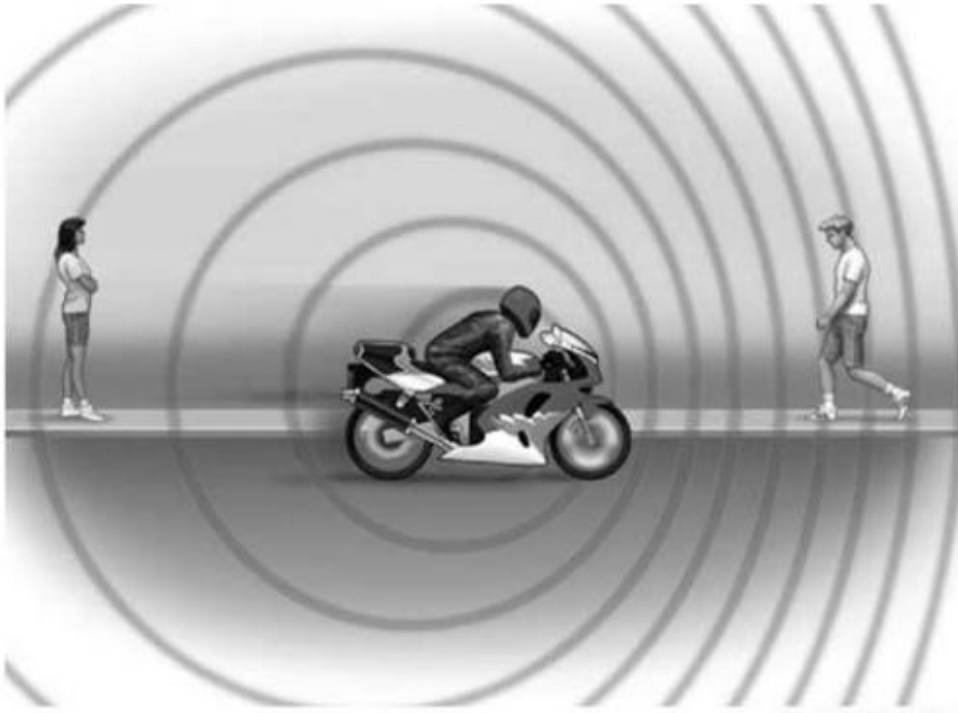
$$f_r = f_s + \frac{v_r}{\lambda} = f_s \left( 1 + \frac{v_r}{f_s \lambda} \right)$$

*Osservatore che si avvicina  
a una sorgente ferma*

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

# CASO GENERALE

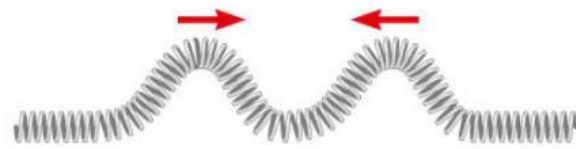
---



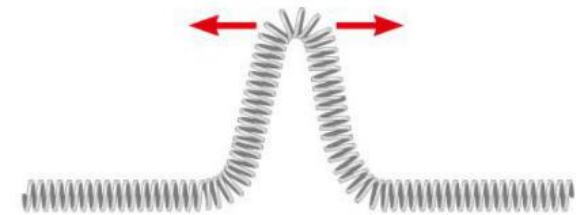
*Osservatore e sorgente  
in moto relativo*

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

# IL PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE



**A** Inizio della sovrapposizione



**B** Sovrapposizione totale

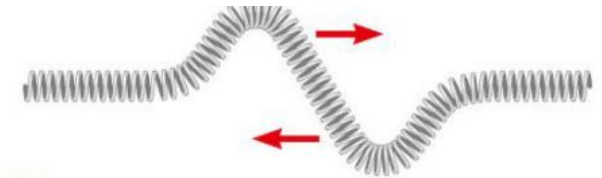


**C** Gli impulsi si allontanano

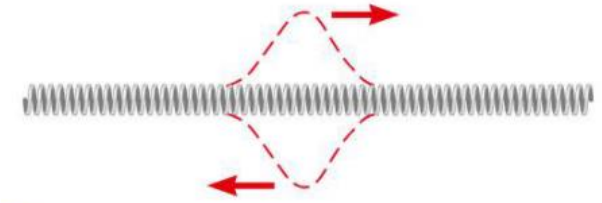
Interferenza distruttiva

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

Interferenza costruttiva



**A** Inizio della sovrapposizione



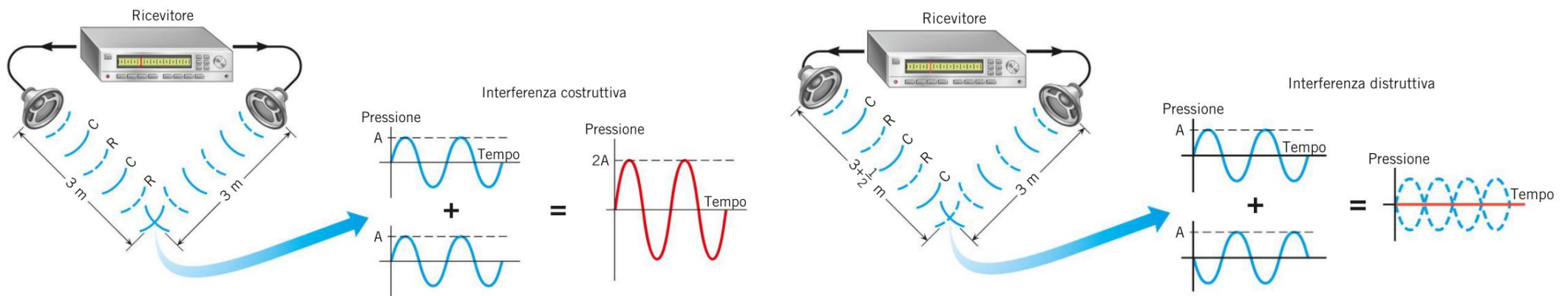
**B** Sovrapposizione totale



**C** Gli impulsi si allontanano

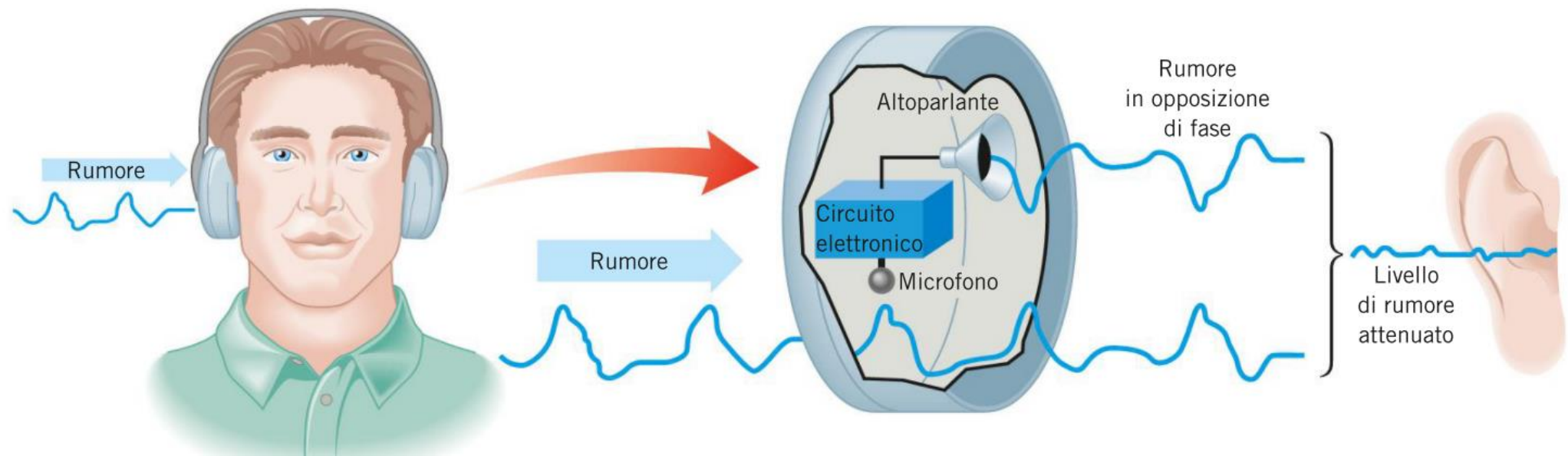
# INTERFERENZA

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



# LE CUFFIE ATTIVE

## USO INTELLIGENTE DELL'INTERFERENZA DISTRUTTIVA



# CONDIZIONI DI INTERFERENZA

---

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

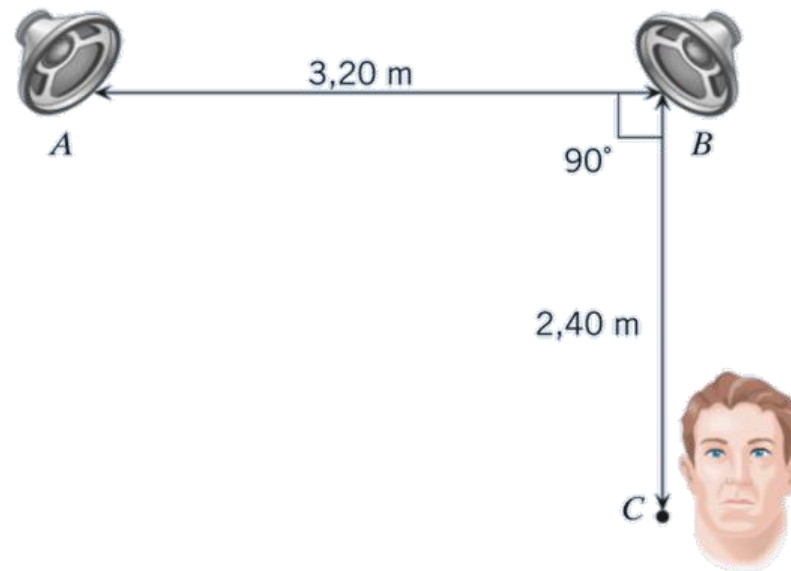
Quando due sorgenti sonore sono in fase, una differenza di cammino rispetto al punto di sovrapposizione pari a mezza lunghezza d'onda o a un numero intero di lunghezze d'onda più mezza lunghezza d'onda ( $1/2, 1 + 1/2, 2 + 1/2, 3 + 1/2, \dots$ ) produce un fenomeno di **interferenza distruttiva**.

# COSA PERCEPISCE L'ASCOLTATORE

---

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

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



# RISOLVIAMO...

---

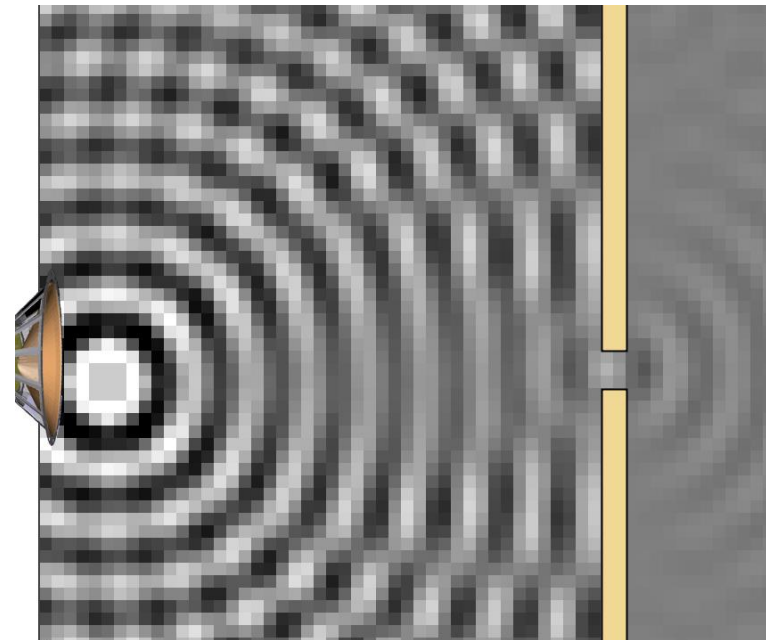
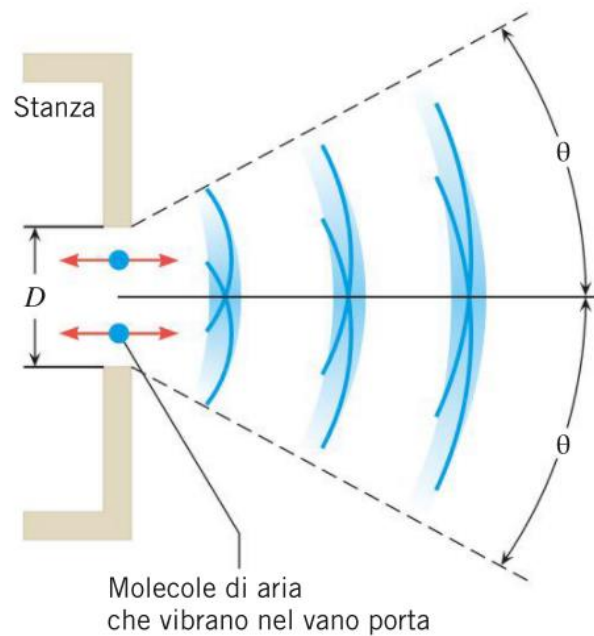
Due altoparlanti posti lungo una parete a una distanza di 4,30 m emettono un suono di frequenza 221 Hz. Gli altoparlanti sono in fase tra loro. Una persona è posta di fronte a un altoparlante a 2,80 m di distanza. L'ascoltatore sente un'interferenza costruttiva o distruttiva?



# DIFFRAZIONE

---

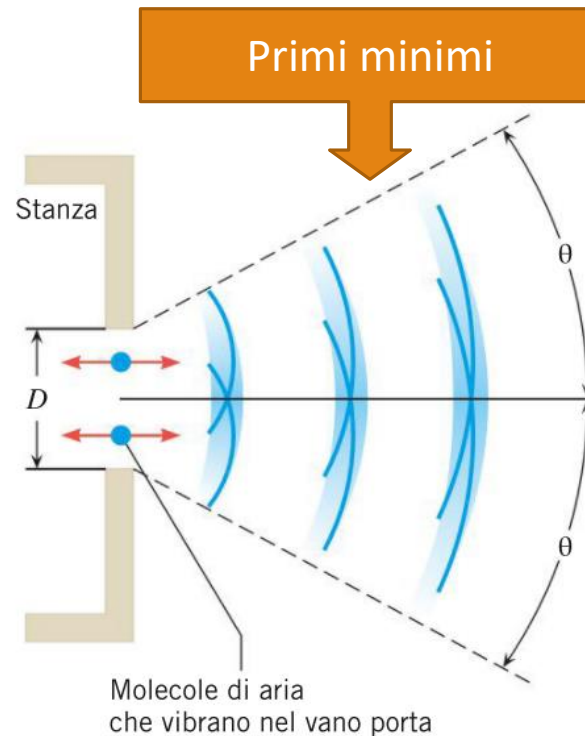
La deviazione dalla direzione di propagazione di un'onda attorno a un ostacolo o ai bordi di un'apertura è chiamata diffrazione. Questo fenomeno riguarda tutti i tipi di onde.



# I PRIMI MINIMI

Nella figura l'angolo  $\theta$  indica la posizione dei primi punti laterali in cui l'intensità va a zero, detti primi minimi.

Solo il massimo centrale è abbastanza intenso, mentre gli altri massimi laterali sono sempre meno intensi man mano che ci si allontana dalla direzione centrale.



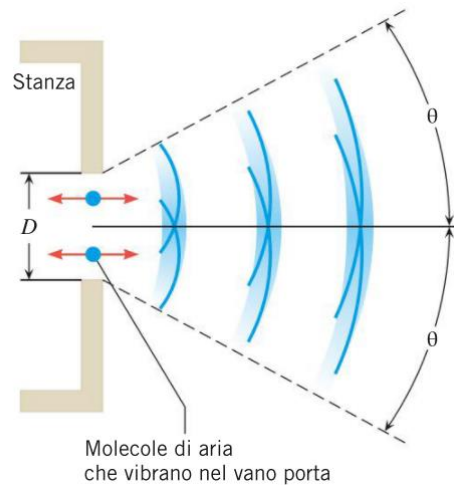
$\theta$  rispetto a una singola fenditura di larghezza  $D$ :

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{D}$$

# I PRIMI MINIMI

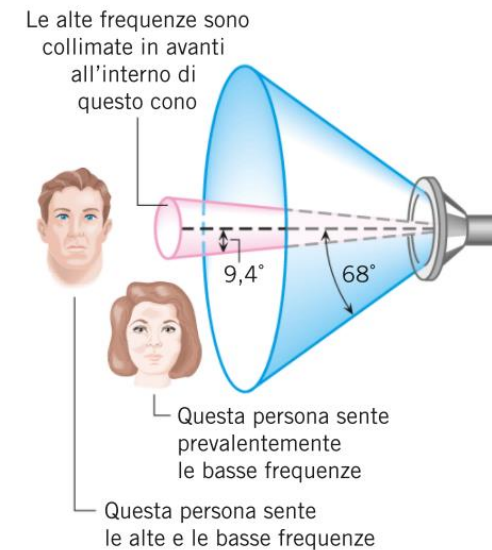
$\theta$  rispetto a una singola fenditura di larghezza  $D$ :

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{D}$$



$\theta$  per un'apertura circolare di diametro  $d$ :

$$\text{sen } \theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

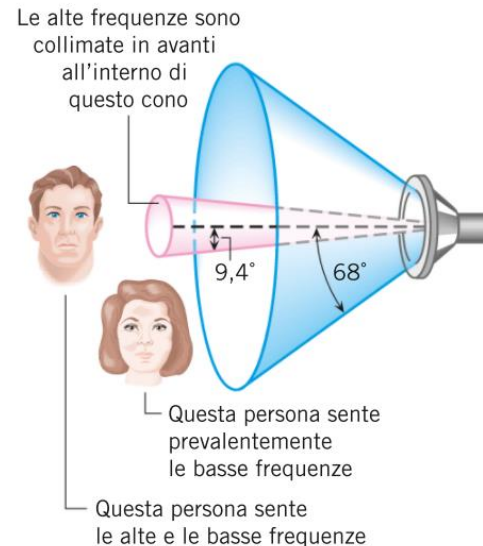


# COSTRUZIONE DEI DIFFUSORI ACUSTICI

Per un altoparlante di diametro  $d$ , si verifica che ...

Frequenze più alte  $f \Rightarrow \lambda$  più piccole  $\Rightarrow \theta$  meno ampi

Se il rapporto  $\lambda / d$  è piccolo, allora l'angolo  $\theta$  è piccolo e c'è poca diffrazione



Altoparlanti con diametro diverso per garantire la buona diffusione del suono

Suoni acuti  
(frequenza alta)

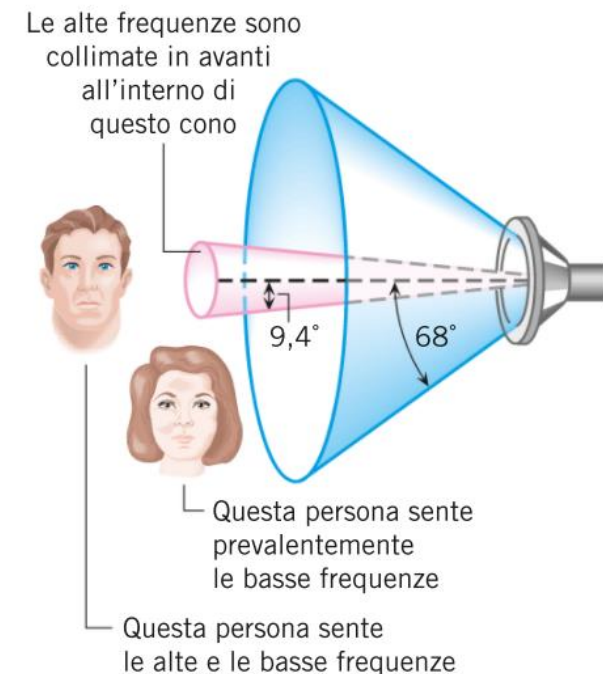
Suoni gravi  
(frequenza bassa)



# LA FISICA DI UN DIFFUSORE DI SUONO

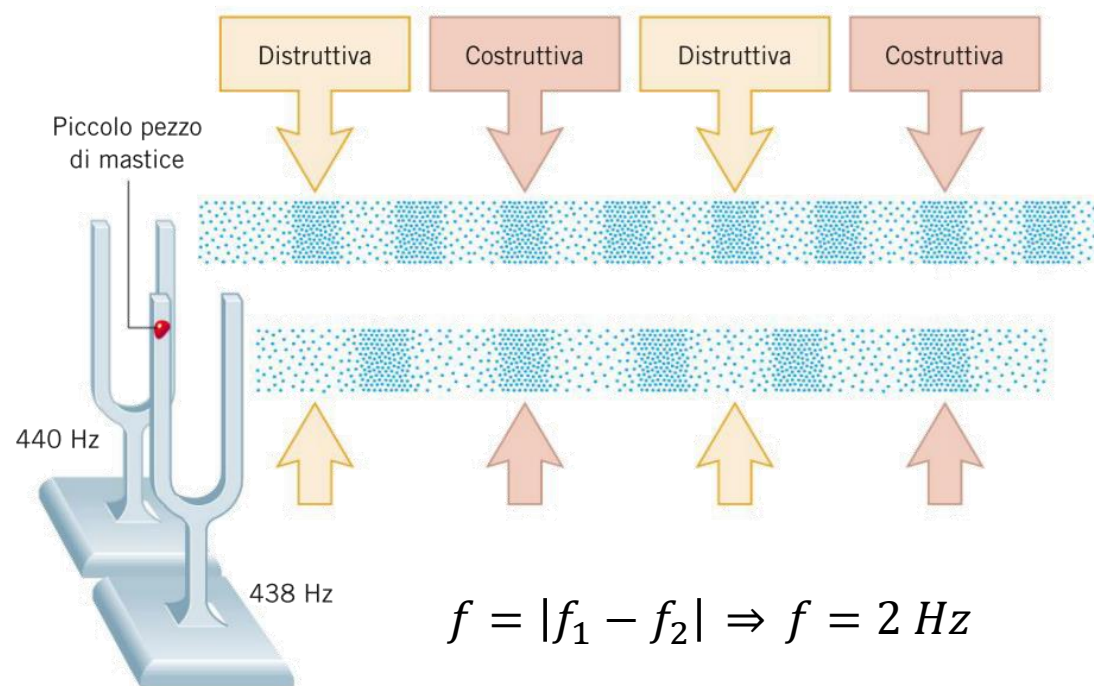
Un suono a 1500 Hz e un suono a 8500 Hz sono emessi da una cassa acustica tramite un altoparlante la cui apertura circolare ha diametro  $d = 0,30$  m. Assumi che la velocità del suono sia 343 m/s.

- Calcola l'angolo di diffrazione per ciascun suono.



# BATTIMENTI

Due suoni con lo stesso timbro e frequenze molto vicine provocano una periodica variazione dell'intensità del suono risultante. Tali variazioni sono note come **battimenti**.



Il numero di volte in cui l'intensità del suono passa da forte a debole in un secondo è chiamato frequenza dei battimenti.

# LA FREQUENZA DEI BATTIMENTI

---

Forma d'onda risultante tra due suoni:

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



Formule di  
prostaferesi

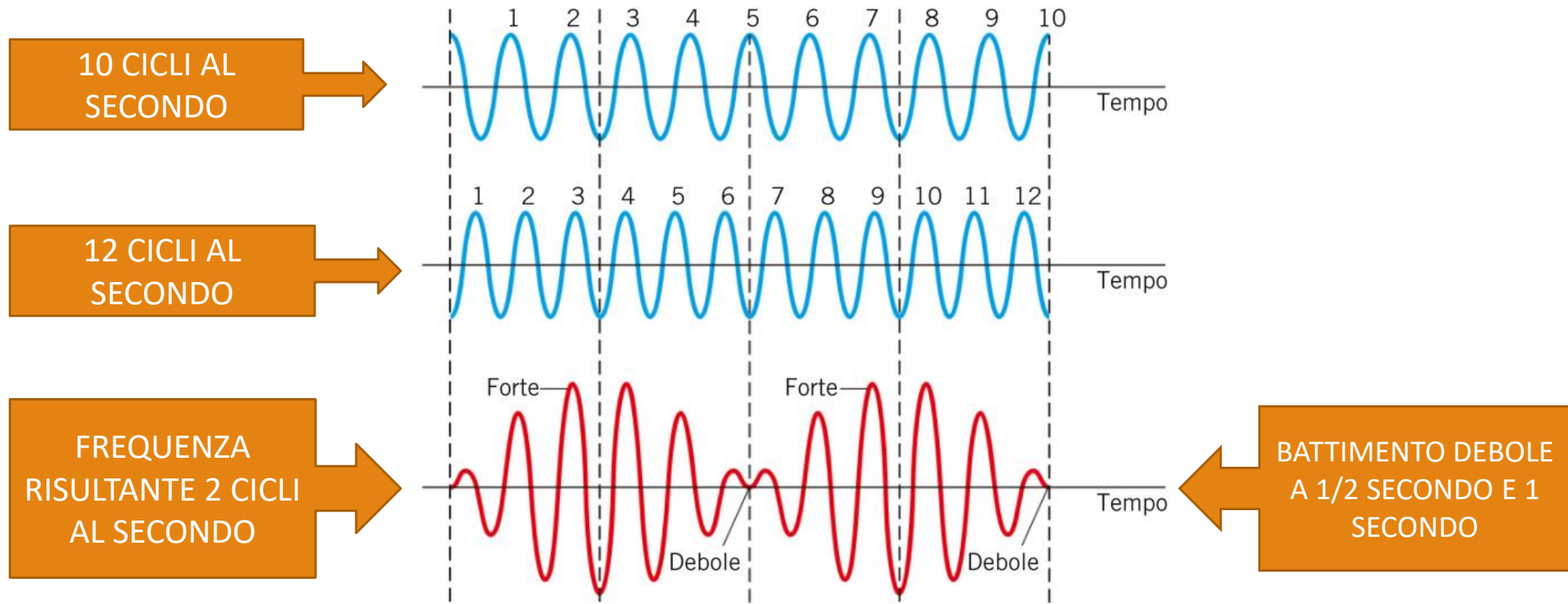
La frequenza  $(f_1 + f_2)/2$  è la media aritmetica delle frequenze delle due onde;

l'ampiezza dipende dal tempo secondo la legge:

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

Poiché il volume del suono è nullo quando questo termine si annulla, e ciò avviene due volte ogni ciclo, la frequenza dei battimenti è uguale alla differenza tra le frequenze dei due suoni.

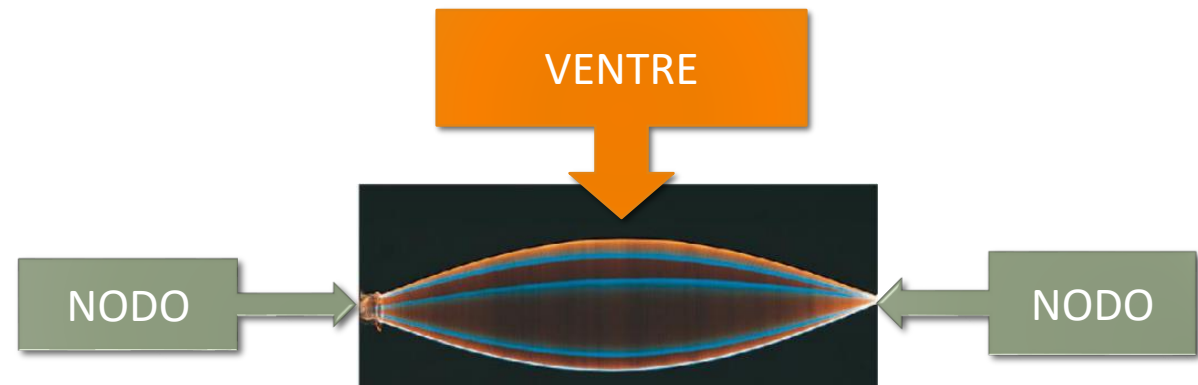
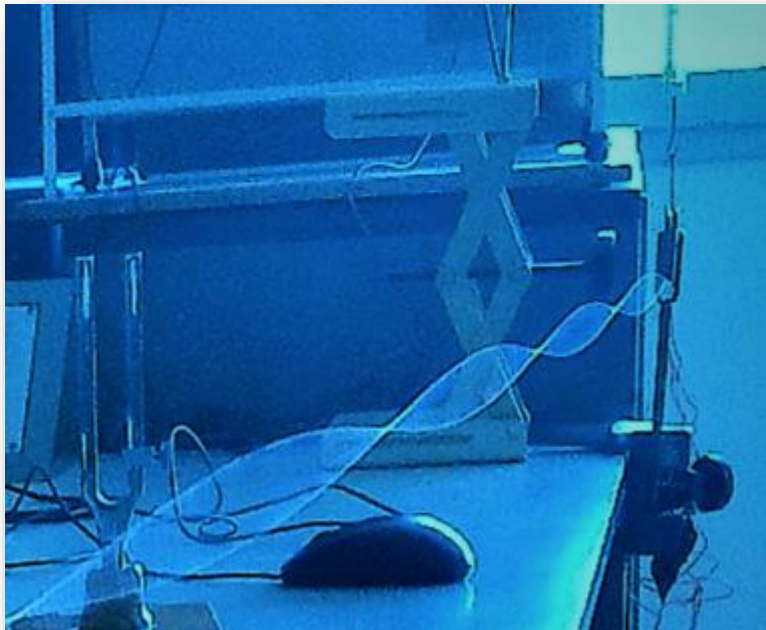
# ESEMPIO DI BATTIMENTO





# ONDA STAZIONARIA TRASVERSALE

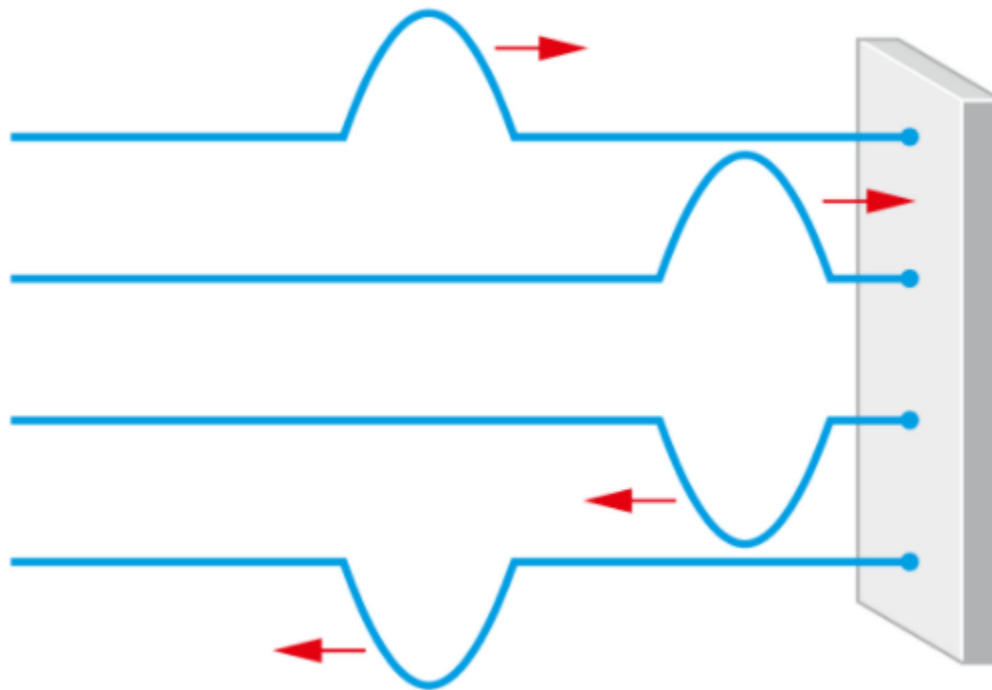
un'onda stazionaria è un'onda che non si propaga, ma rimane sempre nella stessa zona di spazio.



Le regioni della corda si muovono con una tale velocità da apparire fuori fuoco nelle foto sono chiamate **modi normali** delle onde stazionarie trasversali.

# ORIGINE DELL'ONDA STAZIONARIA TRASVERSALE

---

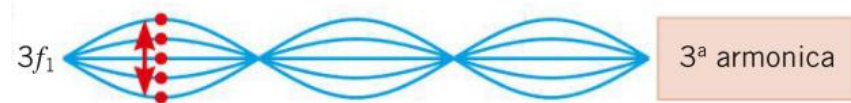
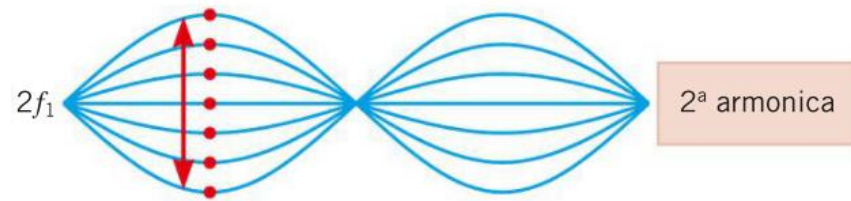
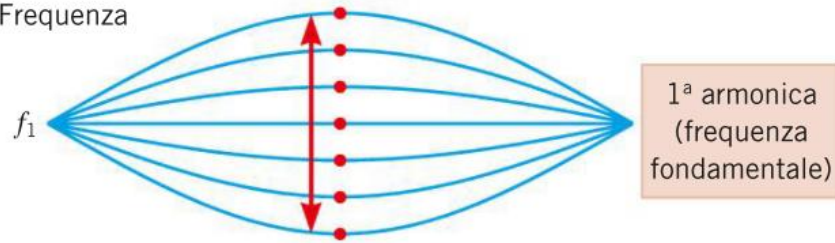


Il principio di azione e reazione provoca la riflessione dell'onda incidente.

# ARMONICHE

---

Frequenza

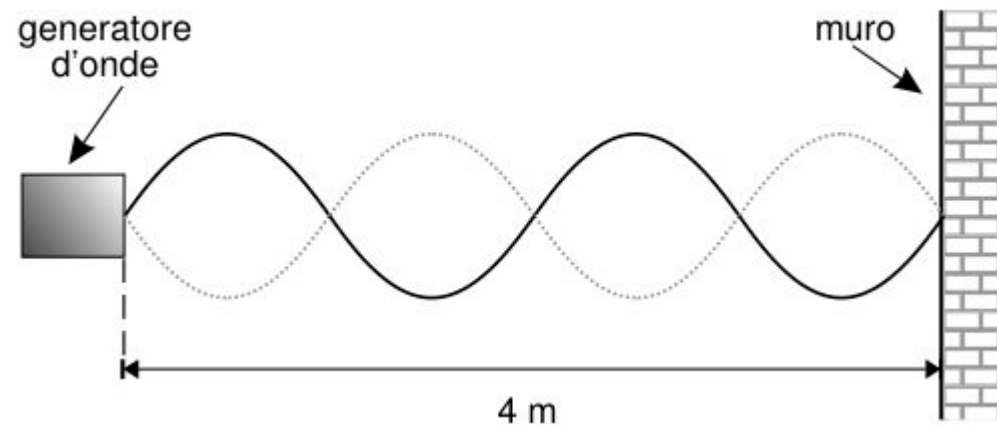


Detta  $f_1$  la frequenza fondamentale  $2f_1$  si dice seconda armonica e così via ...

# CONDIZIONI PER FAVORIRE L'ONDA STAZIONARIA

---

Un'onda stazionaria si forma se sussistono particolari condizioni di frequenza, ovvero se si percuote con la giusta frequenza una corda vincolata a due estremi. Se non si riesce a far vibrare la corda con la frequenza corretta, i cicli nuovi e quelli precedenti tendono a cancellarsi a vicenda quando si sovrappongono e non si formano le onde stazionarie.



# CALCOLO DELLA FREQUENZA NATURALE

---

Il periodo  $T$  è il tempo necessario per

compiere l'intero ciclo  $T = \frac{1}{f_1}$

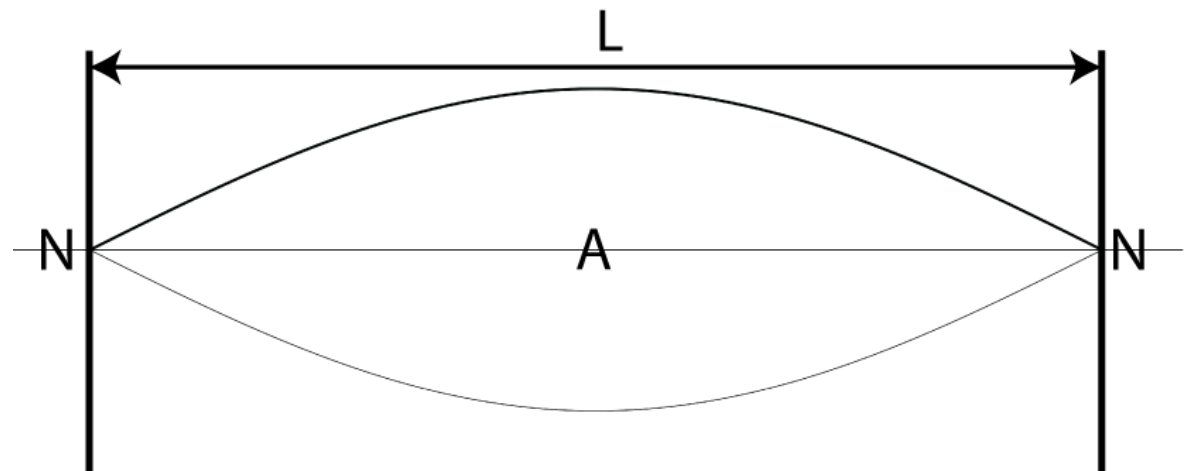
Se l'energia si propaga alla velocità  $v$ , il tempo per descrivere  $2L$  (andata e

ritorno sulla corda) è dato da  $t = \frac{2L}{v}$

Pertanto la frequenza per garantire

l'onda stazionaria è data da  $T=t$

$f_1$  la frequenza fondamentale

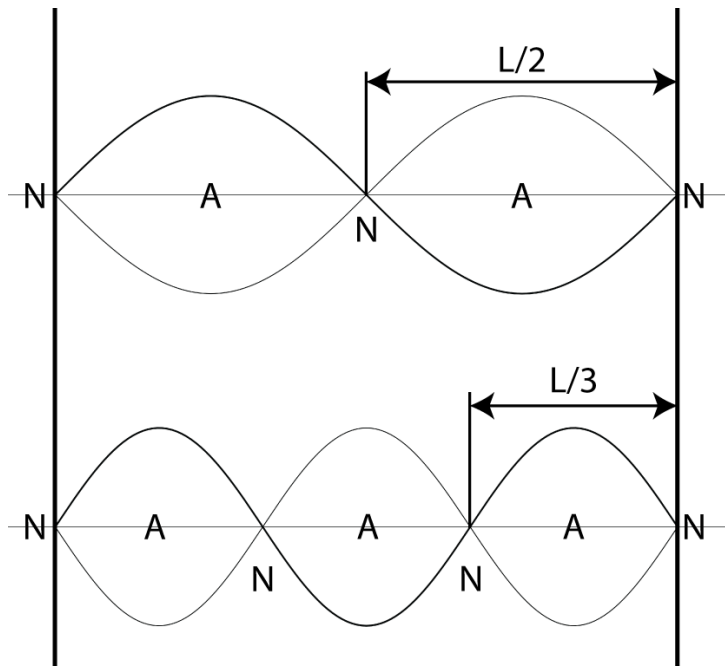


$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

# LE ALTRE FREQUENZE

---

la serie di frequenze che danno luogo alla formazione di onde stazionarie in una corda fissata a entrambi i suoi estremi è data dalla relazione generale:



*Corda fissata  
a entrambi gli estremi*

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

Con  $n$  numero  
naturale

# ESERCIZIO

---

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

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

# PROBLEM SOLVING

---

1. Un'onda trasversale si propaga con una velocità di 300 m/s su una corda orizzontale.

▶ Se la tensione della corda viene aumentata di quattro volte, quale diventa la velocità di propagazione dell'onda?

2. La velocità del suono in un contenitore pieno di idrogeno a 201 K è 1220 m/s. Tratta l'idrogeno come un gas ideale biatomico.

▶ Qual è la velocità del suono se la temperatura è portata a 405 K?

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

▶ Qual è la tua velocità?



# PROBLEM SOLVING

---

4. Un suono esce alla velocità di 343 m/s da una porta larga 77 cm.

► Trova l'angolo di diffrazione  $\theta$  quando la frequenza del suono è 5,0 Hz e  $5,0 \cdot 10^2$  Hz.

5. I due altoparlanti in figura stanno vibrando in fase mentre un ascoltatore si trova nel punto P.

► In P si registra un'interferenza costruttiva o distruttiva quando le onde sonore prodotte dagli altoparlanti hanno rispettivamente le frequenze di 1466 Hz e 977 Hz? Giustifica la risposta con calcoli opportuni.

6. Una corda lunga 0,28 m è fissata a entrambi gli estremi. La corda viene pizzicata e su di essa si forma un'onda stazionaria che vibra alla frequenza della seconda armonica. Le onde si muovono sulla corda a una velocità di 140 m/s.

► Qual è la frequenza della seconda armonica?

