# LEZIONE 3: ONDE SONORE PARTE II

**DAVIDE PAGANO**

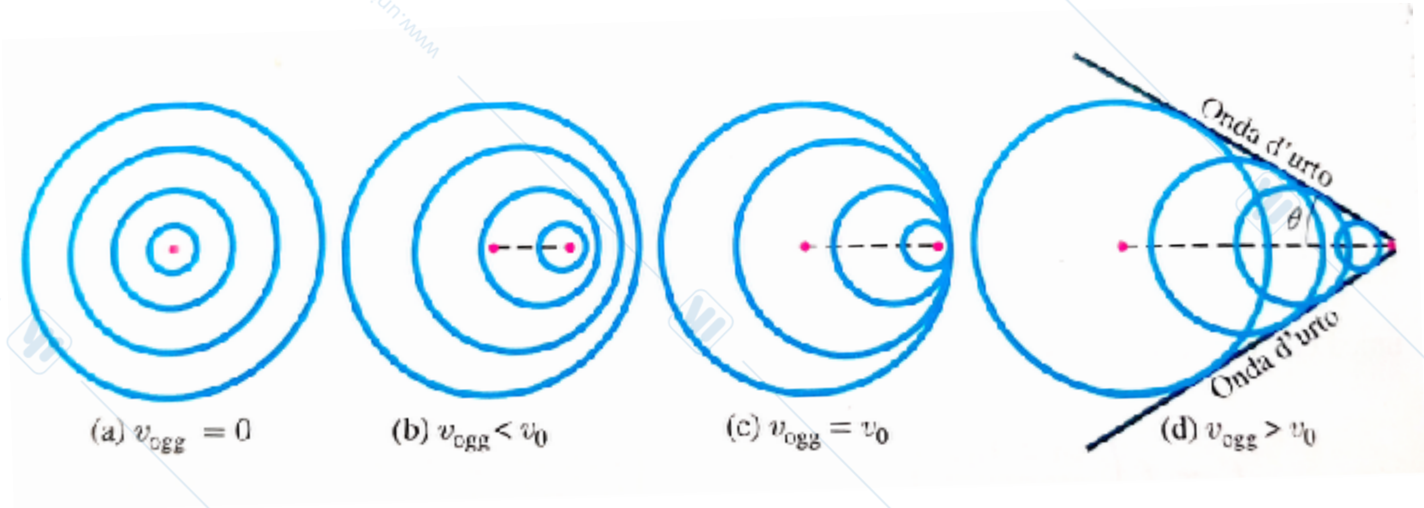
*UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA*

## FISICA SPERIMENTALE (OTTICA ONDE)

A.A. 2017/2018

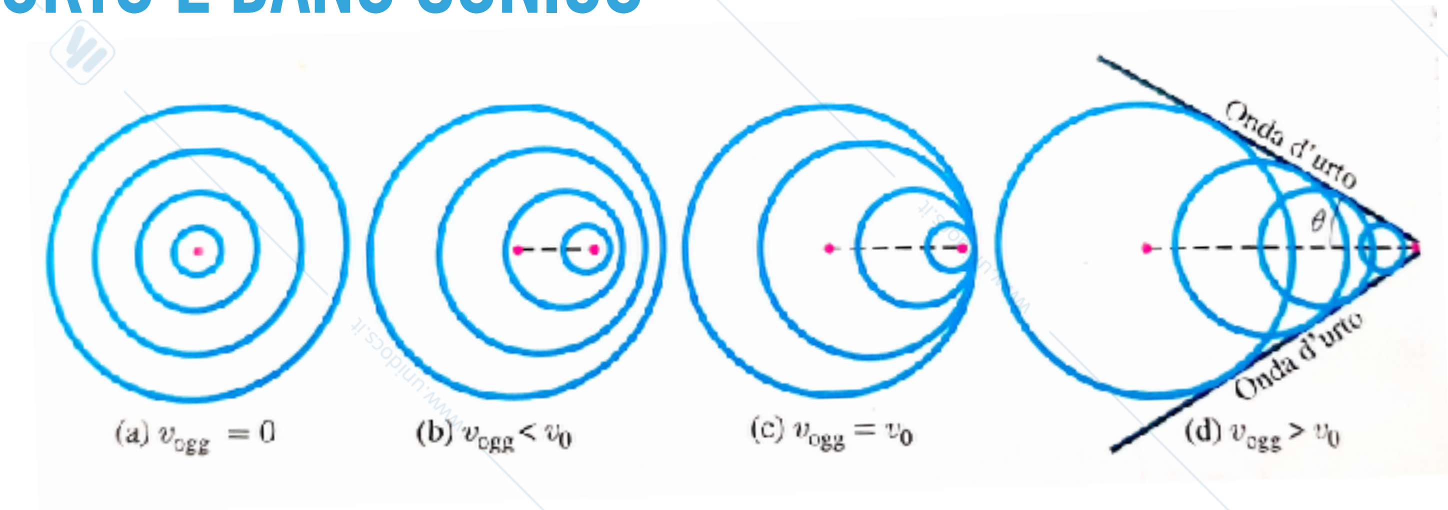
# ONDE D'URTO E BANG SONICO

- Se una sorgente di onde sonore si muove in un mezzo a velocità maggiore di quella del suono nel mezzo si assiste ad un fenomeno *drammatico*, detto **onda d'urto**




- La sorgente "sorpassa" le onde che produce

# ONDE D'URTO E BANG SONICO




- Se $v_{ogg} = v_0$ i fronti d'onda che emette si impilano davanti a essa
- Se invece $v_{ogg} > v_0$ i fronti d'onda si allineano lateralmente
- È analogo alle onde di prua prodotte da una barca

# ONDE D'URTO E BANG SONICO

- Le creste delle onde si sovrappongono formando un'unica grande cresta che va costituire l'onda d'urto
- È quindi il risultato dell'interferenza costruttiva di un gran numero di fronti d'onda e trasporta pertanto una grande quantità di energia
- Dietro questa grande cresta (alta pressione) vi è generalmente una regione di pressione molto bassa
- Molti credono che il bang sonico si produca solo nel momento in cui un'aereo infrange il muro del suono, ma in realtà **l'onda d'urto segue l'aereo per tutto il tempo in cui viaggia a velocità supersonica**

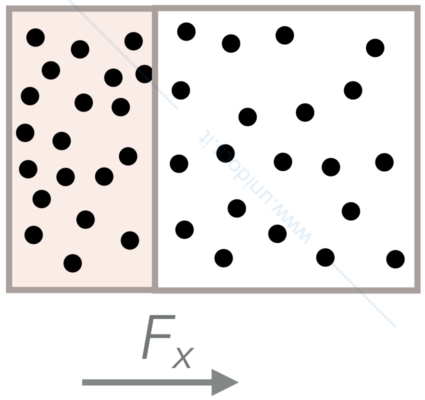
LEZIONE 3: ONDE SONORE

# POTENZA ED INTENSITÀ DELLE ONDE ACUSTICHE

# POTENZA DELLE ONDE ACUSTICHE

- Per il passaggio di un'onda acustica ogni elemento di fluido esercita una forza sugli elementi adiacenti

$$F_x = A\Delta p$$




- Per un'onda sinusoidale $F_x = A\Delta p_m \sin(kx - \omega t)$

- $P = \vec{F} \cdot \vec{u} = F_x u_x$ dove $u_x$ è la velocità dell'elemento di fluido

$\longrightarrow$ $P = A\Delta p_m u_m \sin^2(kx - \omega t)$ ma ricordando che $u_m = v\dfrac{\Delta p_m}{B}$

$$\longrightarrow P = \frac{Av(\Delta p_m)^2}{B}\sin^2(kx - \omega t)$$

# POTENZA DELLE ONDE ACUSTICHE

- La precedente rappresenta la *potenza istantanea*

- Considerando un intervallo di tempo lungo e ricordando che il valor medio di $sin^2(kx - \omega t)$ è 1/2, otteniamo la *potenza media*

$$\overline{P} = \frac{Av(\Delta p_m)^2}{2B} = \frac{A(\Delta p_m)^2}{2\rho_0 v}$$

- Per le onde meccaniche su corda tesa $\overline{P} = \frac{1}{2}\mu\omega^2 y_m^2 v$

- In entrambi i casi dipende dal **quadrato dell'ampiezza**

# INTENSITÀ DELLE ONDE ACUSTICHE

- L'*intensità* è definita come la potenza media per unità di superficie

$$I = \frac{\overline{P}}{A} = \frac{\Delta p_m^2}{2\rho_0 v}$$

- L'orecchio umano è incredibilmente sensibile e può rivelare intensità che variano su **12 ordini di grandezza**

- È come poter utilizzare lo stesso strumento per misurare lo spessore di un capello ($O(10^{-4})\ m$) m e la distanza Terra-Luna ($O(10^{8})\ m$)

- Visto l'ampio intervallo di intensità cui siamo sensibili è conveniente introdurre il concetto di *livello sonoro*

# INTENSITÀ DELLE ONDE ACUSTICHE

- $L = log_{10}\frac{I}{I_0}$ ← intensità onda considerata

  $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$ **soglia di udibilità**

- L'unità di misura del livello sonoro è il *bel* (B)

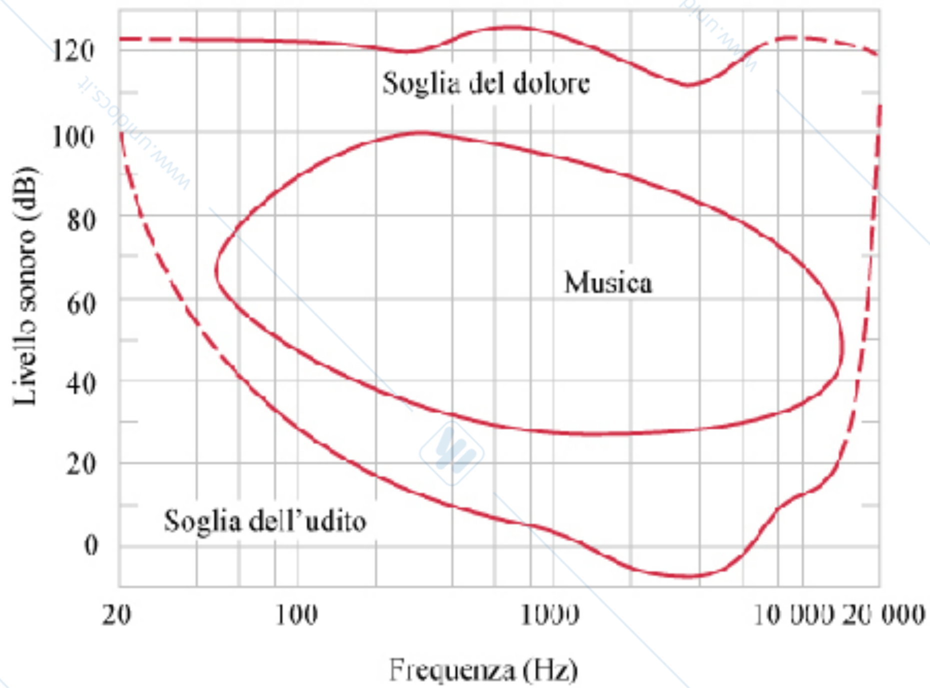
- È però molto più utilizzato il sottomultiplo *decibel* (dB): $10\ dB = 1\ B$

- Quindi $L = 10\ log_{10}\frac{I}{I_0}$ si misura in decibel

- Se l'intensità sonora viene moltiplicata per un fattore 10 il **livello sonoro aumenta di 10 dB**

# LIVELLI SONORI PER L'ORECCHIO UMANO

- L'orecchio umano non è ugualmente sensibile a tutte le frequenze




- La *soglia dell'udito* varia di ordini (!) di grandezza con la frequenza
- La *soglia del dolore* è molto meno dipendente dalla frequenza

# SENSIBILITÀ DELL'ORECCHIO UMANO

- Si può realmente apprezzare la sensibilità dell'orecchio umano mediante il seguente esempio

- Calcoliamo lo spostamento delle molecole d'aria prodotto dal passaggio di un'onda sonora di frequenza 1k Hz alla soglia dell'udito

- $I = \dfrac{\overline{P}}{A} = \dfrac{\Delta p_m^2}{2\rho_0 v}$ $\quad I = 10^{-12}\ W/m^2 \quad v = 343\ m/s \quad \rho_0 = 1,29\ kg/m^3$

- $$\Delta p_m = \sqrt{2\rho_0 v I} = \sqrt{2 \cdot 1,29\ kg/m^3 \cdot 343\ m/s \cdot 10^{-12}\ W/m^2} =$$

$$= 3,0 \times 10^{-5}\ Pa \approx \boxed{3 \times 10^{-10}\ atm}$$

# SENSIBILITÀ DELL'ORECCHIO UMANO

- Lo spostamento massimo di un elemento di fluido abbiamo trovato essere

$$s_m = \frac{\Delta \rho_m}{k\rho_0}$$

- Ovvero $s_m = \dfrac{\Delta \rho_m v}{2\pi \nu \rho_0}$

- $\Delta \rho_m = \Delta p_m \dfrac{\rho}{B} \longrightarrow s_m = \dfrac{\Delta p_m v}{2\pi \nu B}$

- Per l'aria $B = 0,142 \times 10^6\ Pa$

- $s_m = \dfrac{3,0 \times 10^{-5}\ Pa \cdot 343\ m/s}{2\pi \cdot 1000\ Hz \cdot 0,142 \times 10^6\ Pa} = \boxed{1,1 \times 10^{-11}\ m}$

**dell'ordine delle dimensioni atomiche**

# ALCUNI VALORI DI INTENSITÀ E LIVELLO SONORO

| *Suono* | *Intensità I* ($W/m^2$) | *Livello sonoro* (dB) |
|---|---|---|
| Soglia dell'udito | $1 \cdot 10^{-12}$ | 0 |
| Fruscio di foglie | $1 \cdot 10^{-11}$ | 10 |
| Bisbiglio (a 1 m) | $1 \cdot 10^{-10}$ | 20 |
| Rumore di fondo in città in assenza di traffico | $1 \cdot 10^{-9}$ | 30 |
| Rumore di fondo in ufficio | $1 \cdot 10^{-7}$ | 50 |
| Conversazione normale (a 1 m) | $1 \cdot 10^{-6}$ | 60 |
| Martello pneumatico (a 1 m) | $1 \cdot 10^{-3}$ | 90 |
| Gruppo rock | $1 \cdot 10^{-1}$ | 110 |
| Soglia del dolore | 1 | 120 |
| Motore di un jet (a 50 m) | 10 | 130 |
| Motore dello Space Shuttle (a 50 m) | $1 \cdot 10^{8}$ | 200 |

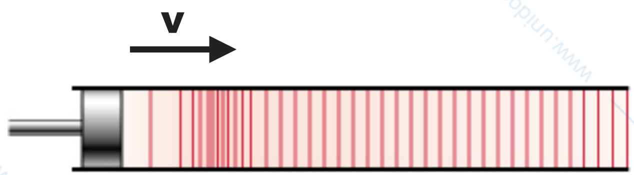
- Livelli sonori di 180 dB e oltre sono potenzialmente fatali
- Il suono più intenso mai registrato è stato quello dell'eruzione del vulcano Krakatoa del 1883, udito a oltre 3000 km di distanza

LEZIONE 3: ONDE SONORE

# RIFLESSIONE ONDE ACUSTICHE

# RIFLESSIONE DI ONDE ACUSTICHE

- Consideriamo un'onda longitudinale in un tubo



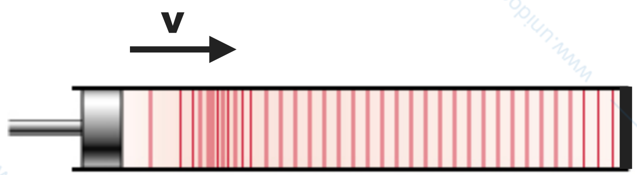

- Quando l'onda raggiunge l'estremità del tubo si osserva riflessione e la componente riflessa si propaga all'indietro nel tubo

- È analogo a quanto visto nel caso delle onde su corde

- Le caratteristiche di questo fenomeno di riflessione **dipendono dal fatto che l'estremità del tubo sia aperta o chiusa**

# RIFLESSIONE DI ONDE ACUSTICHE – ESTREMITÀ CHIUSA

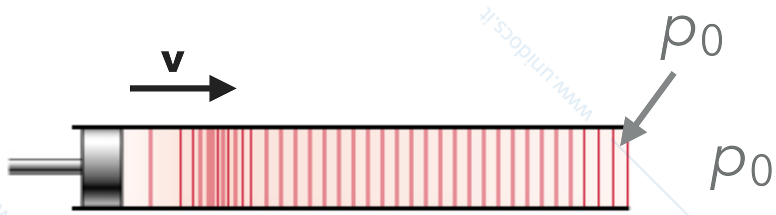
- Iniziamo con il caso dell'estremità chiusa




- L'onda, giunta all'estremità, può comprimere lo strato d'aria sulla parete fissa: l'estremo fisso deve essere un *antinodo* (o *ventre*)
- La riflessione che si osserva è analoga al caso di un'onda meccanica su una **corda con estremo libero**
- L'onda riflessa non subisce variazione di fase: per esempio una compressione viene riflessa come una compressione

# RIFLESSIONE DI ONDE ACUSTICHE - ESTREMITÀ APERTA)

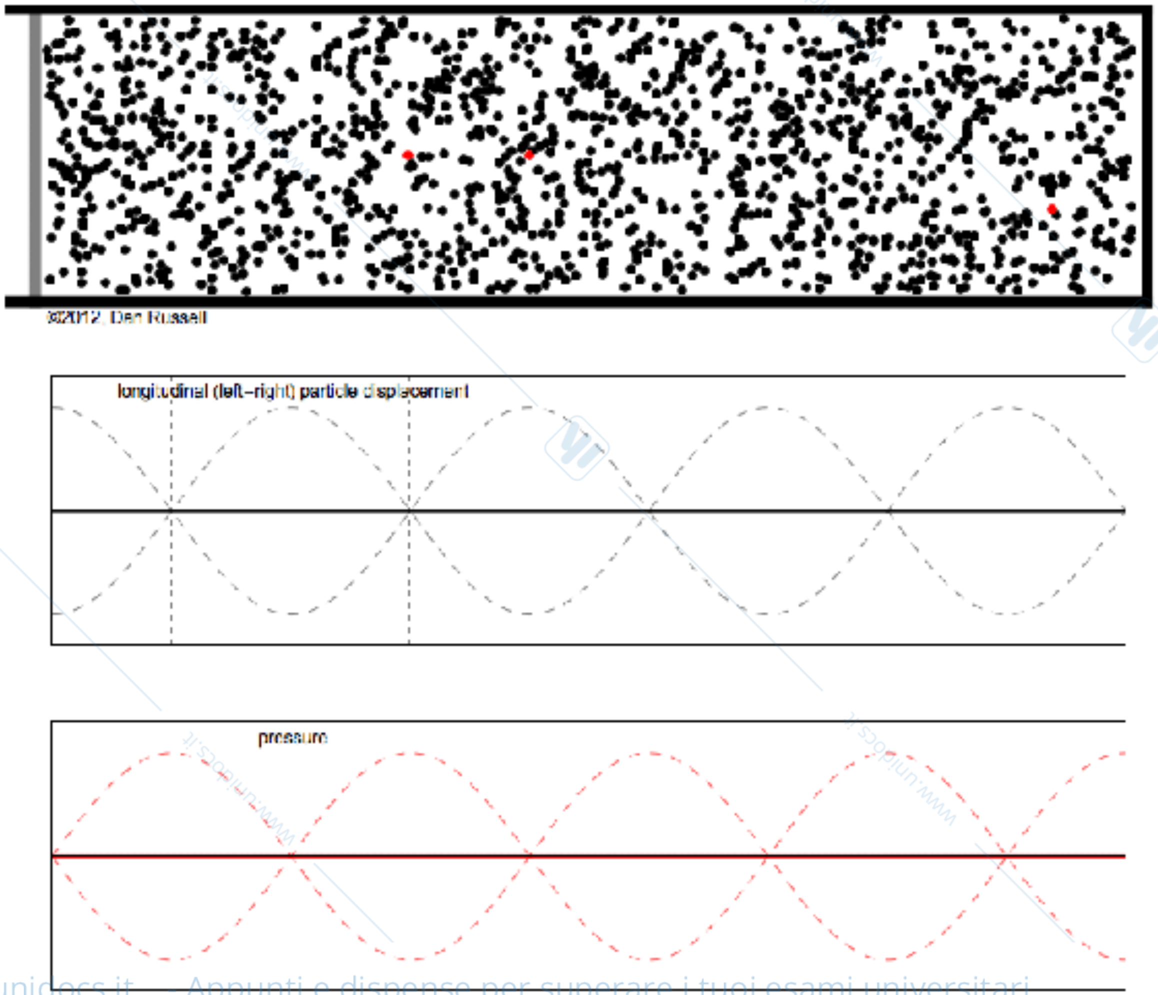
- Nel caso di un tubo con estremità aperta




- All'estremità aperta la pressione è sempre uguale alla pressione esterna e pertanto deve essere un <u>*nodo*</u>
- La riflessione che si osserva è analoga al caso di un'onda meccanica su una **corda con estremo fisso**
- L'onda riflessa è **sfasata di 180°**: per esempio una compressione all'estremo aperto genera rarefazione che viaggia all'indietro

# ONDE STAZIONARIE LONGITUDINALI

- Il fenomeno della riflessione può generare _onde stazionarie_



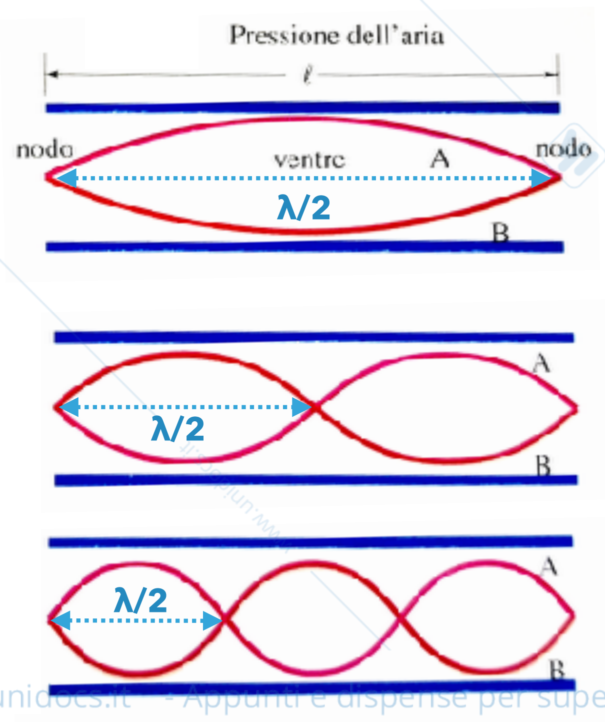
# ONDE STAZIONARIE LONGITUDINALI

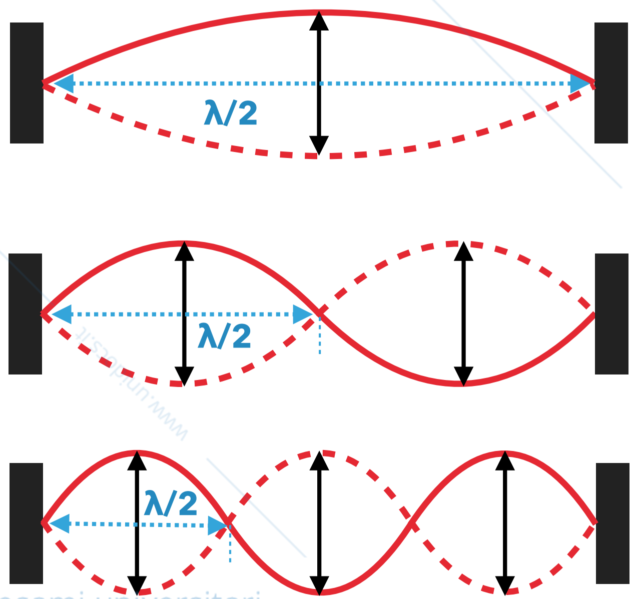
- Onde stazionarie si possono formare nell'aria contenuta in qualsiasi cavità, ma determinare le frequenze può essere molto complicato

- Un tubo di diametro costante presenta forti analogia con una corda tesa

**tubo aperto alle due estremità**

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

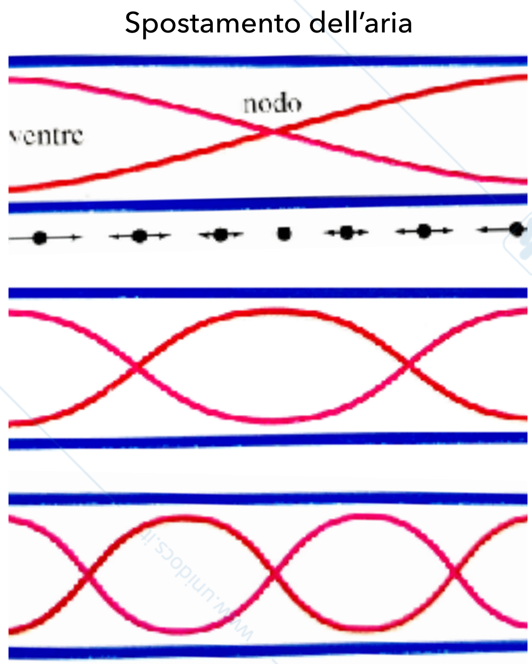


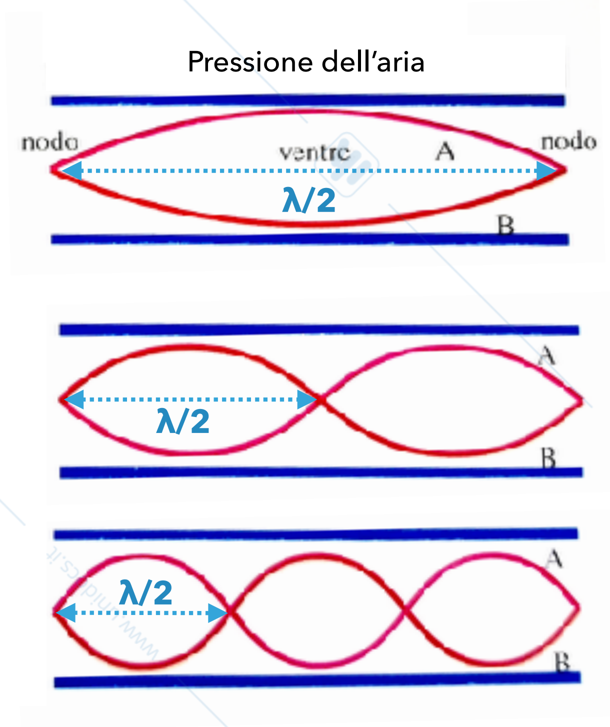



# ONDE STAZIONARIE LONGITUDINALI

- Come visto lo spostamento degli elementi del mezzo sono sfasati di π/2 rispetto alla variazione di pressione

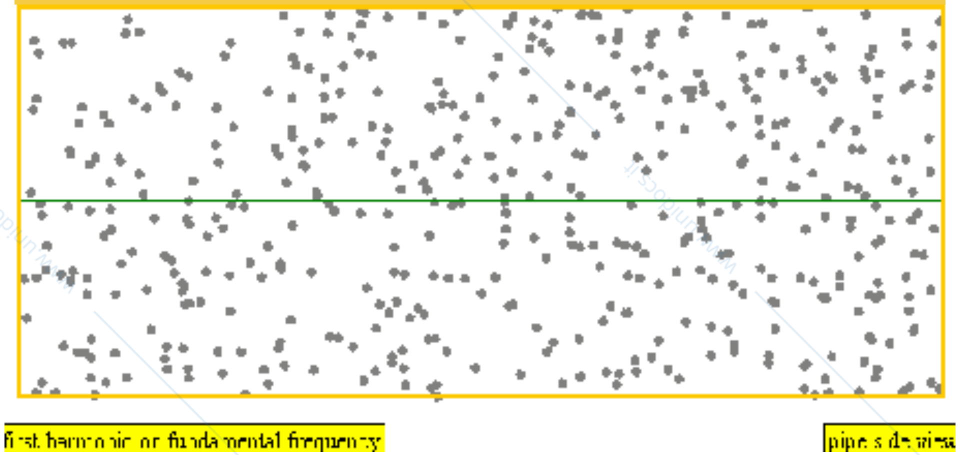
**tubo aperto alle due estremità**



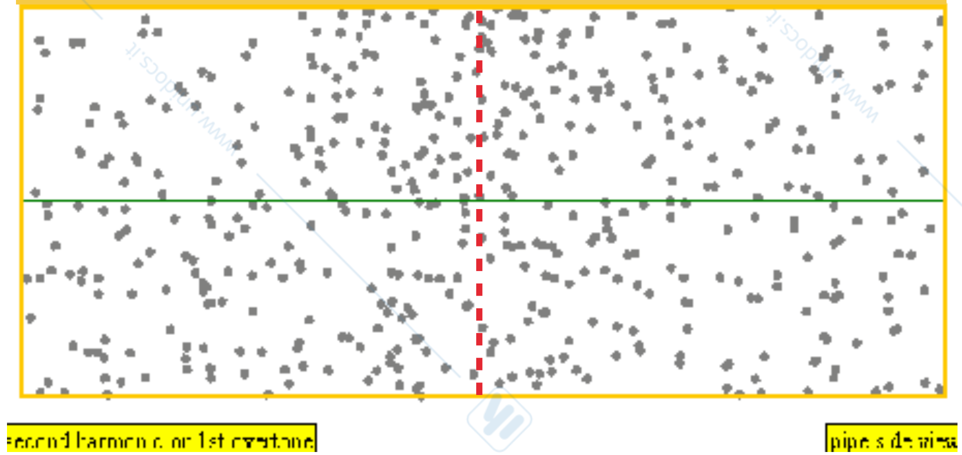
# ONDE STAZIONARIE LONGITUDINALI

## I modo



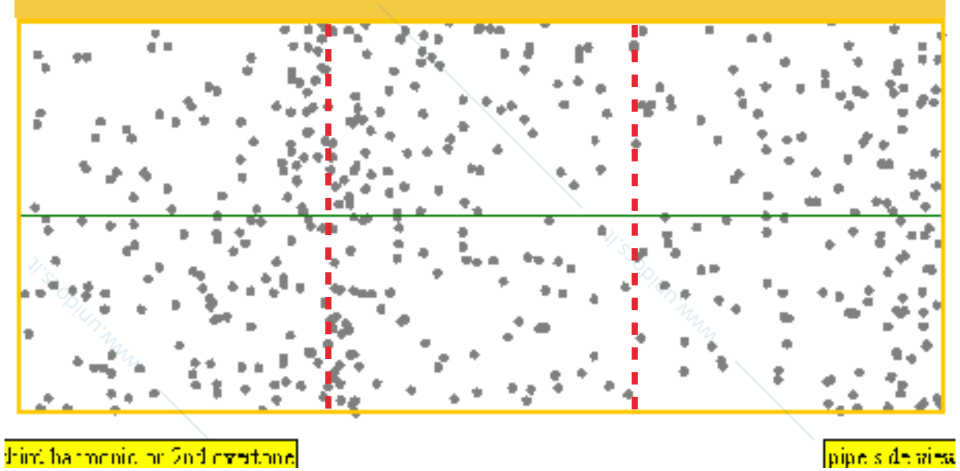
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Molecule1.gif

## II modo



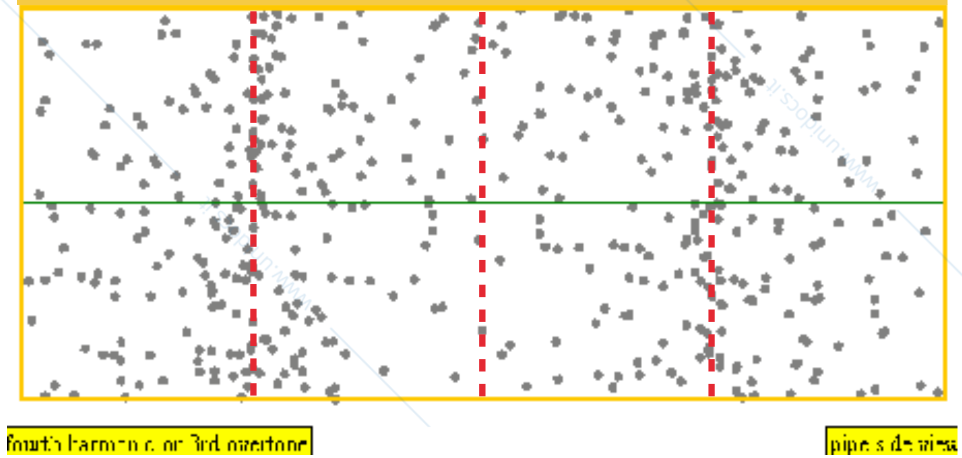
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Molecule2.gif

## III modo



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/04/Molecule3.gif

## IV modo



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Molecule4.gif

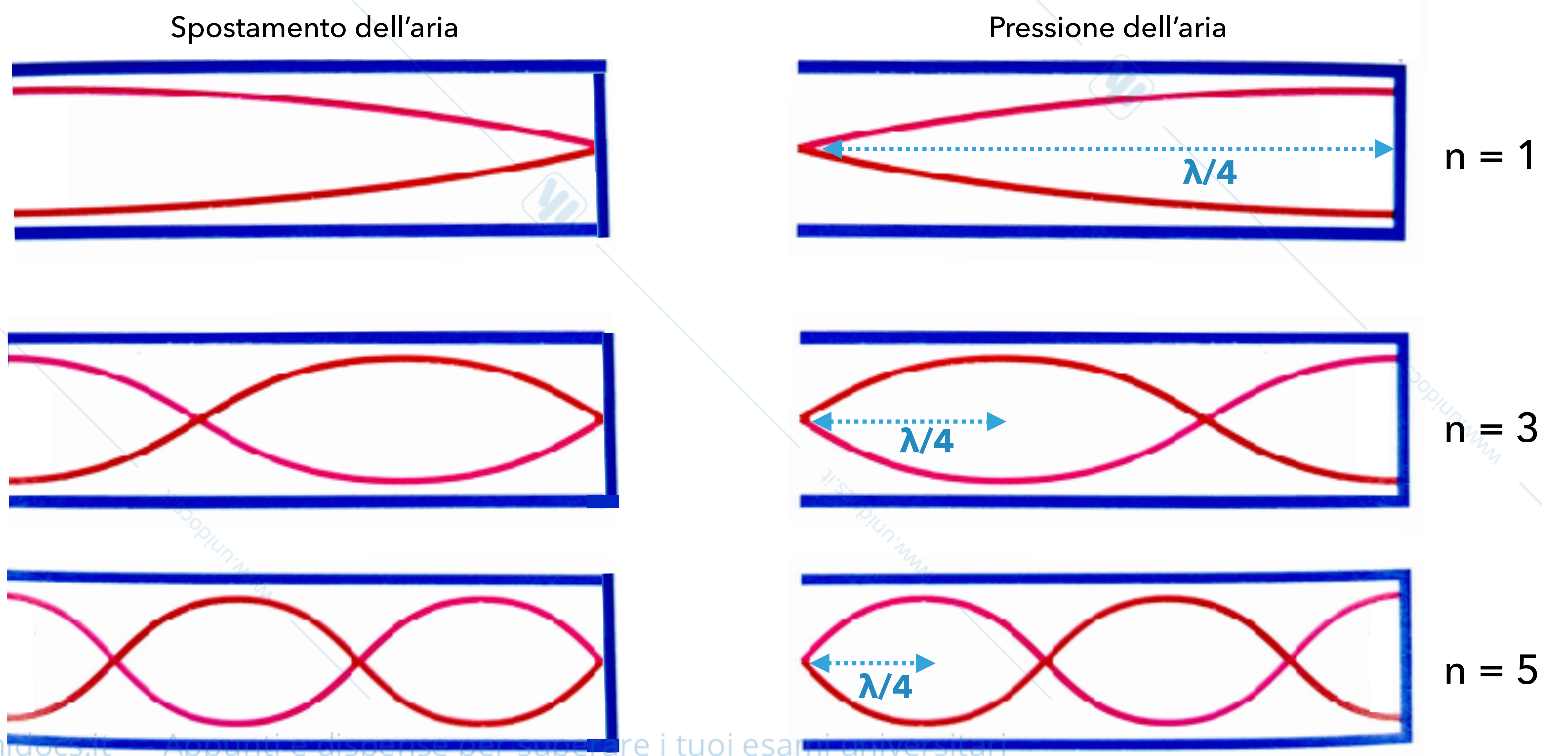
# ONDE STAZIONARIE LONGITUDINALI

- Per un tubo con un'estremità chiusa, abbiamo necessariamente un **nodo di spostamento** all'estremità chiusa

- Sono presenti **solo i modi (armoniche) dispari**

**tubo chiuso ad un'estremità**

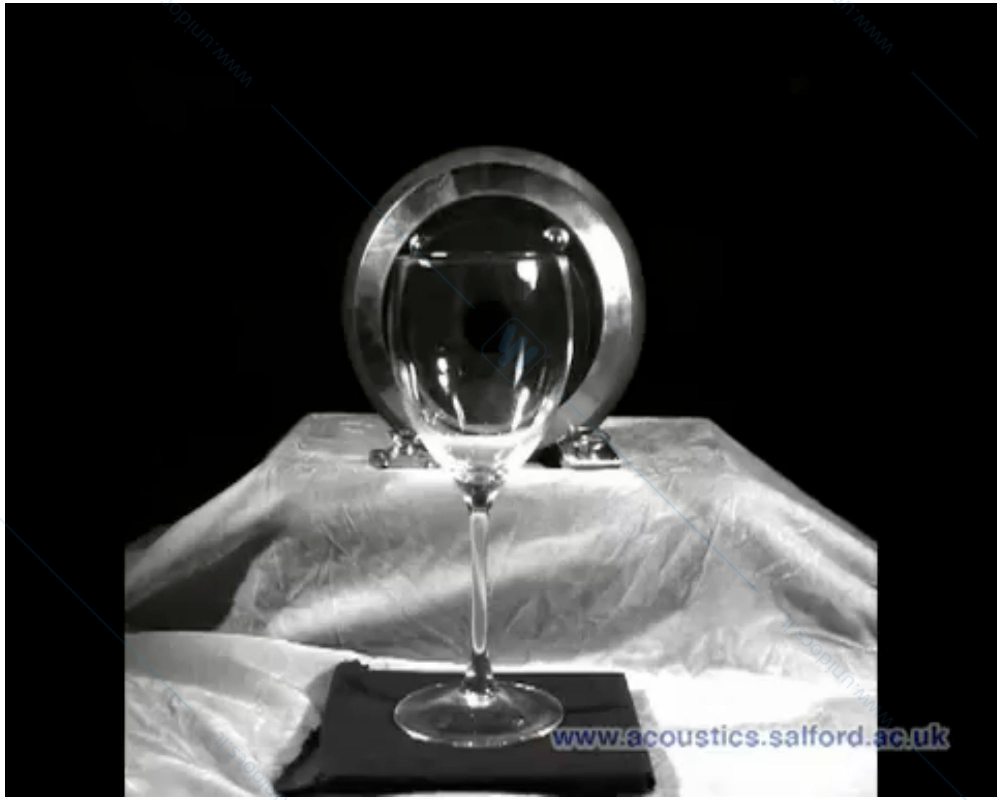
$$L = n\frac{\lambda_n}{4}$$



# ONDE STAZIONARIE LONGITUDINALI

- Nell onde acustiche in tubi i nodi e gli antinodi **non sono punti** ma sono **piani**

- In assenza di dissipazione si ha accumulo di energia (condizione di <u>*risonanza*</u>), pertanto le frequenze proprie corrispondenti a modi risonanti sono anche dette <u>*frequenze di risonanza*</u>




- Onde sonore possono a loro volta produrre oscillazioni risonanti in altri sistemi…

LEZIONE 3: ONDE SONORE

# GLI STRUMENTI MUSICALI

# PRODUZIONE DEL SUONO

- Le sorgenti sonore sono sempre oggetti vibranti
- Negli strumenti musicali la vibrazione può essere generata colpendo, pizzicando, soffiando, …
- In questo modo si producono **onde stazionarie** e la sorgente a contatto con l'aria genera onde sonore
- Un suono è caratterizzato da un'*altezza*: un suono alto è un suono **acuto**, mentre un suono basso è un sono **grave**
- È la frequenza che determina l'altezza di un suono: minore è la frequenza più bassa è l'altezza

# PRODUZIONE DEL SUONO

- In un sistema vibrante possiamo avere infinite frequenze proprie, come per esempio una corda tesa

- Se $\nu_1 < \nu_2 < \ldots$ sono le frequenze proprie di un sistema $\nu_1$ è detta **frequenza fondamentale** e il modo corrispondente è detto **armonica fondamentale** o **tono**

- Le altre frequenze sono dette **frequenze superiori** o **ipertoni**

- L'altezza di un suono dipende dalla **frequenza fondamentale del sistema vibrante**

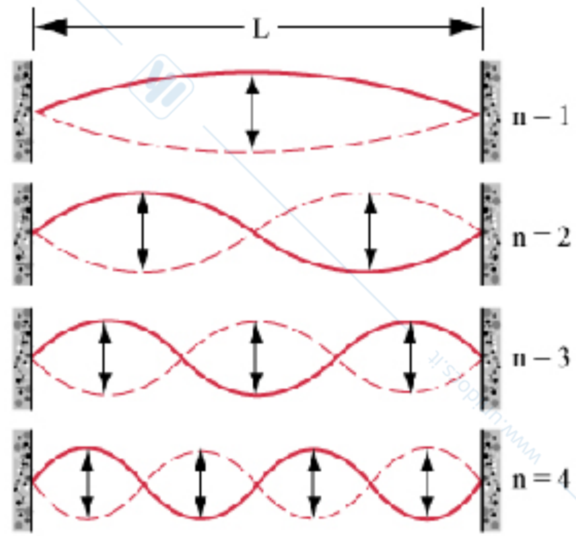
# PRODUZIONE DEL SUONO

- In alcuni sistemi le frequenze superiori sono multiple di quella fondamentale ed in questo caso si chiamano *armoniche superiori*

$$\nu_n = n\nu_1$$

- Per esempio se il sistema vibrante è una corda tesa con estremi fissi:

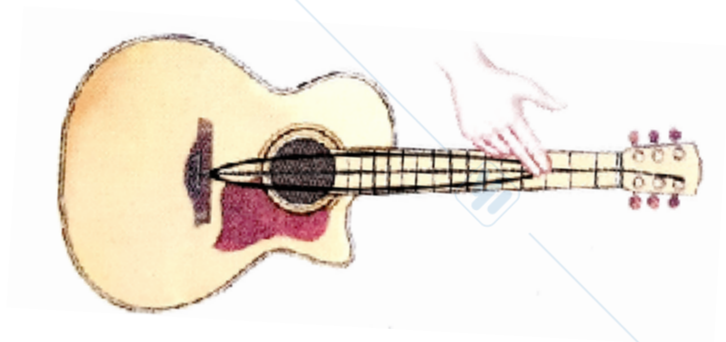
$$\nu_n = n\frac{v}{2L}$$




- Perché di dice "stonato come una campana"?

# PRODUZIONE DEL SUONO

- In strumenti musicali come la chitarra o il violino, suoni di altezza diversa vengono prodotti modificando la lunghezza delle corde



- Inoltre, sebbene la lunghezza di tutte le corde sia la stessa, queste producono suoni di altezza diversa perché hanno diverso $\mu$ e $F$

- Gli strumenti a corda non produrrebbero suoni sufficientemente intensi se fossero solo le corde a produrre le onde sonore

# PRODUZIONE DEL SUONO

- Pertanto fanno uso di un amplificatore meccanico noto come *tavola armonica* (pianoforte) o *cassa armonica* (chitarra e violino)

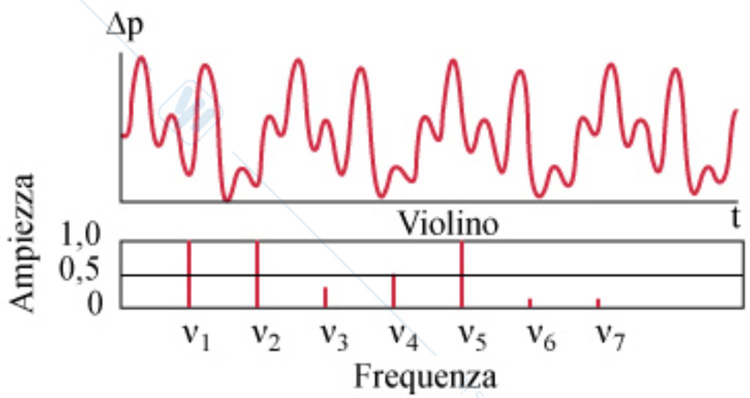
- Quando le corde vibrano mettono in vibrazione anche la tavola o la cassa armonica, che avendo una superficie di contatto con l'aria molto maggiore possono produrre onde sonore molto più intense

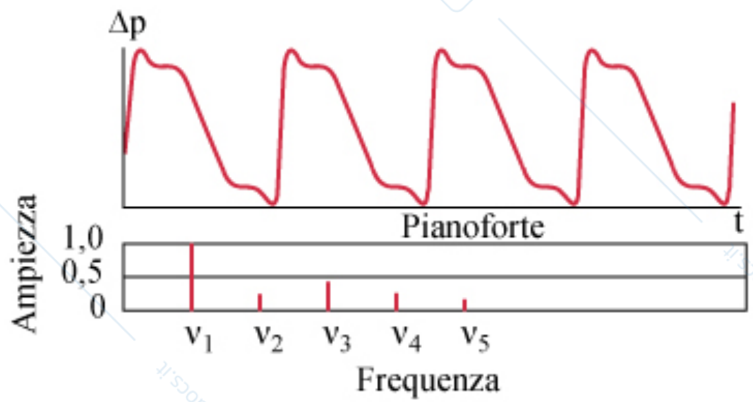
- Quando ascoltiamo un suono ne riconosciamo: l'intensità, altezza ma anche un terzo aspetto, ovvero il *timbro*

- Come l'altezza e l'intensità anche il timbro è correlato ad una quantità misurabile: **numero e ampiezza di armoniche superiori**

# PRODUZIONE DEL SUONO

- Consideriamo per esempio il caso di uno strumento a corda
- Quando per esempio si pizzica o percuote una corda non si osserva solo l'armonica fondamentale, ma una **sovrapposizione di diversi modi stazionari** di diversa frequenza ed ampiezza

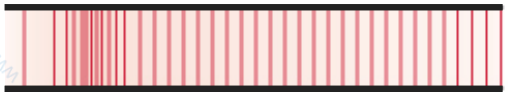



- Il numero e l'ampiezza delle armoniche superiori determinano il timbro e le caratteristiche sonore dei vari strumenti

# PRODUZIONE DEL SUONO

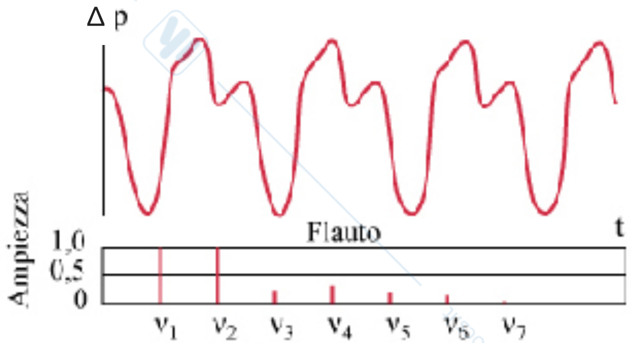
- Nel caso si strumenti a fiato, invece, il contributo delle armoniche superiori **dipende dal tipo di canna**



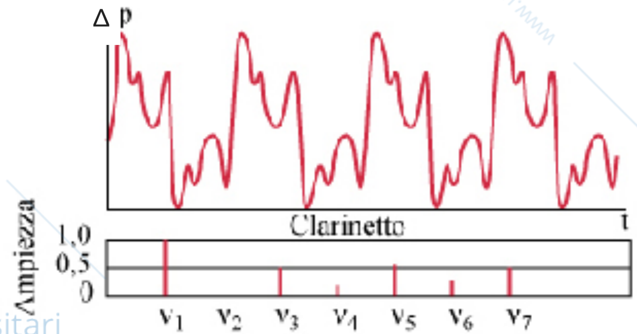
$$\nu_n = n\frac{v}{2L} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

$$\nu_n = n\frac{v}{4L} \qquad n = 1, 3, 5, \ldots$$

- Il **flauto** è assimilabile ad una canna d'organo aperta ad entrambe le estremità

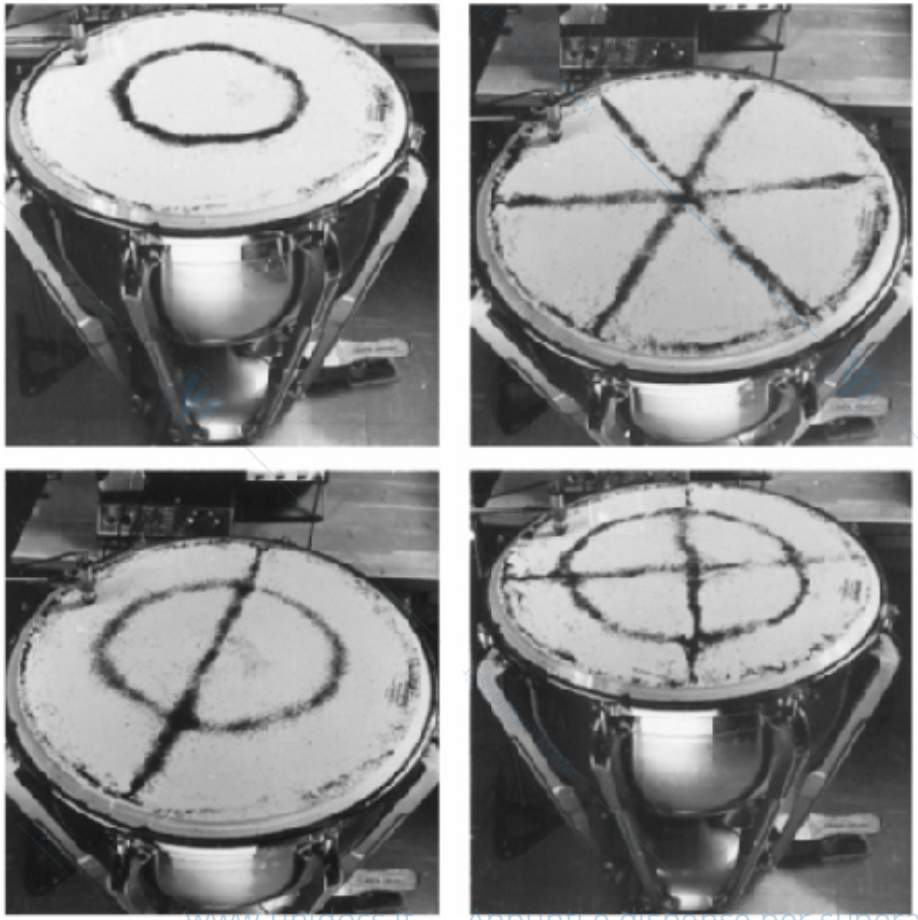


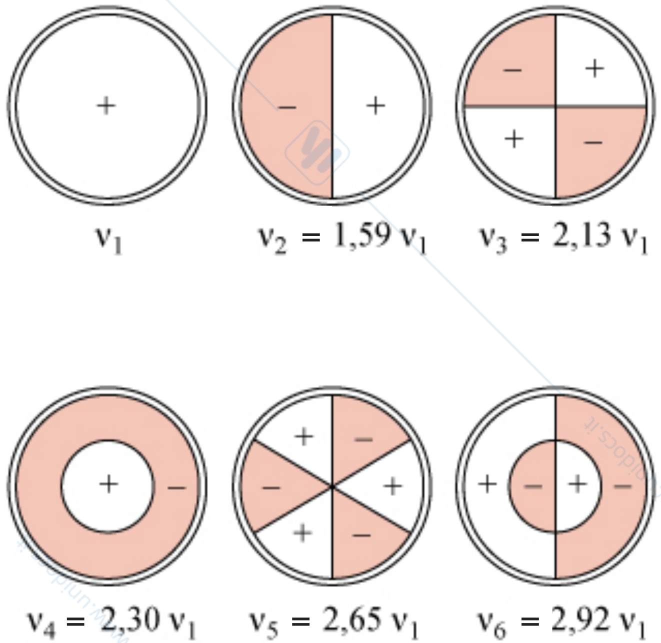

- Il **clarinetto** (*strumento ad ancia*) è assimilabile ad una canna d'organo chiusa ad un'estremità



# PRODUZIONE DEL SUONO

- Il tamburo è il classico esempio di un sistema vibrante per il quale i gli **ipertoni non sono armonici**





LEZIONE 3: ONDE SONORE

# BATTIMENTI

# BATTIMENTI

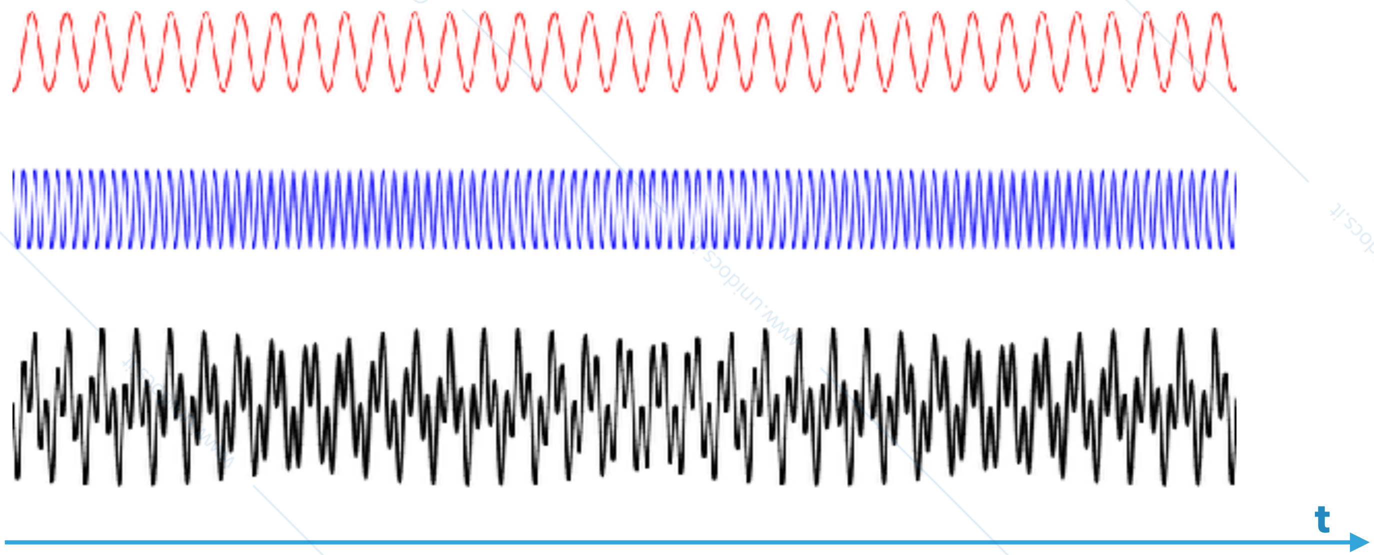
- Con le onde stazionarie abbiamo visto come due onde con la stessa frequenza diano luogo a massimi e minimi di intensità

**interferenza spaziale**

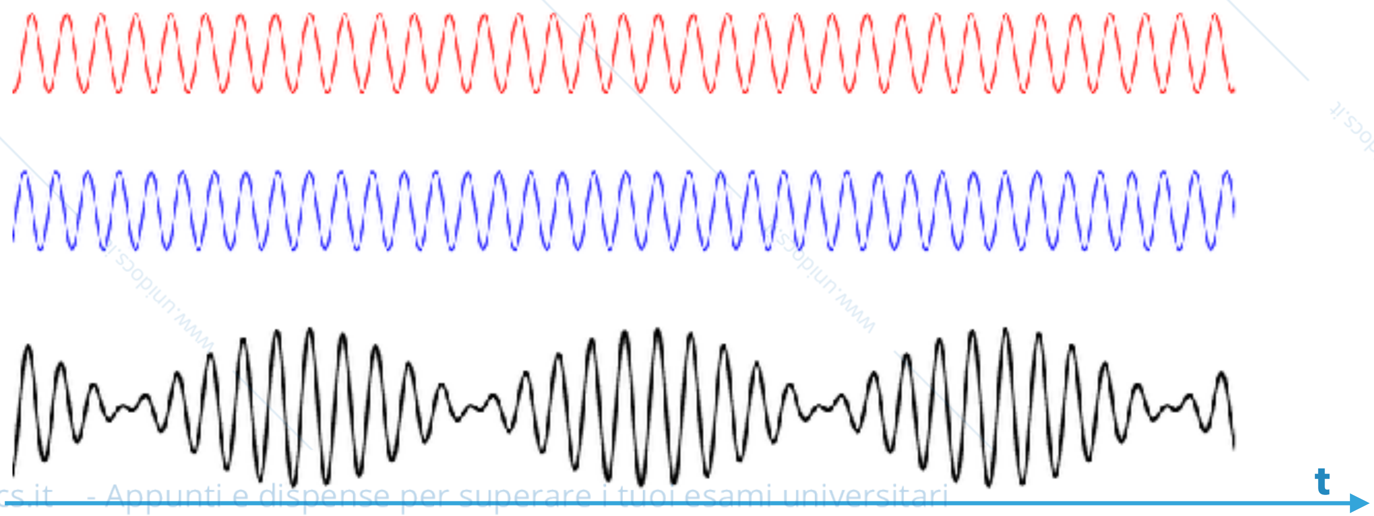
- Fissato un punto nello spazio possiamo studiare un altro tipo di interferenza: l'**interferenza temporale**

- Consideriamo la sovrapposizione in un punto dello spazio di due onde acustiche con **diverse frequenze** (assumendo per semplicità che abbiano la stessa ampiezza)

# BATTIMENTI




- Se la differenza di frequenza tra le due onde è piccola



# BATTIMENTI

- Fissata la posizione possiamo scrivere per le due onde

$$\Delta p_1(t) = \Delta p_m sin(\omega_1 t) \qquad \Delta p_2(t) = \Delta p_m sin(\omega_2 t)$$

- Per il principio di sovrapposizione

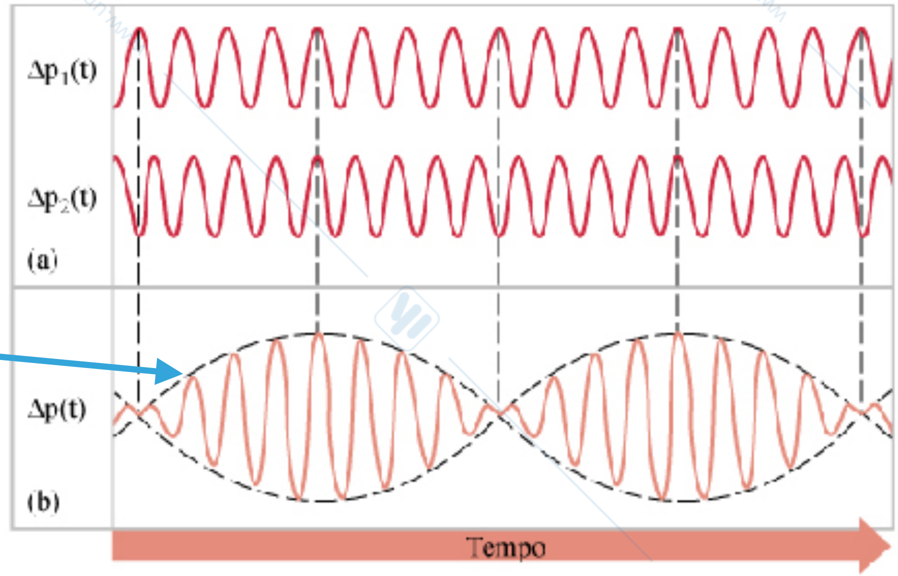
$$\Delta p(t) = \Delta p_1(t) + \Delta p_2(t) = \Delta p_m [sin(\omega_1 t) + sin(\omega_2 t)]$$

- Ricordando che $sin(A) + sin(B) = 2cos\left(\frac{A-B}{2}\right) sin\left(\frac{A+B}{2}\right)$

$$\longrightarrow \quad \Delta p(t) = \left[2\Delta p_m cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right)\right] sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right)$$

# BATTIMENTI

- Definendo $\overline{\omega} = \dfrac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ e $\omega_{amp} = \dfrac{|\omega_1 - \omega_2|}{2}$




- L'equazione precedente diventa

$$\Delta p(t) = \boxed{\left[2\Delta p_m \cos\left(\omega_{amp} t\right)\right]} \sin\left(\overline{\omega} t\right)$$

- Se $|\omega_1 - \omega_2| \ll 1$ l'ampiezza compie oscillazioni molto lente

- In queste condizioni l'orecchio umano percepisce un tono di frequenza $\overline{\nu} = \dfrac{\overline{\omega}}{2\pi}$ e intensità variabile: il fenomeno dei <u>*battimenti*</u>

# BATTIMENTI

- I massimi di intensità, i battimenti, si hanno quando $cos(\omega_{amp}t) = \pm 1$
- Ognuno di questi due valori viene assunto dal coseno in un ciclo e quindi il numero di battimenti al secondo $\omega_{bat}$ deve essere $2\omega_{amp}$

$$\omega_{bat} = 2\omega_{amp} = |\omega_1 - \omega_2|$$

- Ma $\omega_{amp} = 2\pi\nu_{amp}$ si ottiene che il numero di battimenti per unità di tempo è pari a $|\nu_1 - \nu_2|$
- L'orecchio umano è in grado di distinguere battimenti fino a ~15 Hz
- Il fenomeno dei battimenti è alla base dell'accordatura (ad orecchio) di molti strumenti musicali

# LA SINCRONIZZAZIONE DEL SUONO...

- Nel 1877 Rayleigh osservò un effetto sorprendete utilizzando due canne d'organo con frequenze fondamentali leggermente diverse

A
- Risuonano normalmente alle loro frequenze fondamentali

B
- Risultano **quasi inudibili** e le loro **frequenze si sono sincronizzate ad un valore comune**

- Possiamo intuitivamente spiegare l'effetto considerando le canne (nel caso B) come oscillatori accoppiati

A

B

# LA SINCRONIZZAZIONE DEI METRONOMI

https://www.youtube.com/watch?v=Aaxw4zbULMs

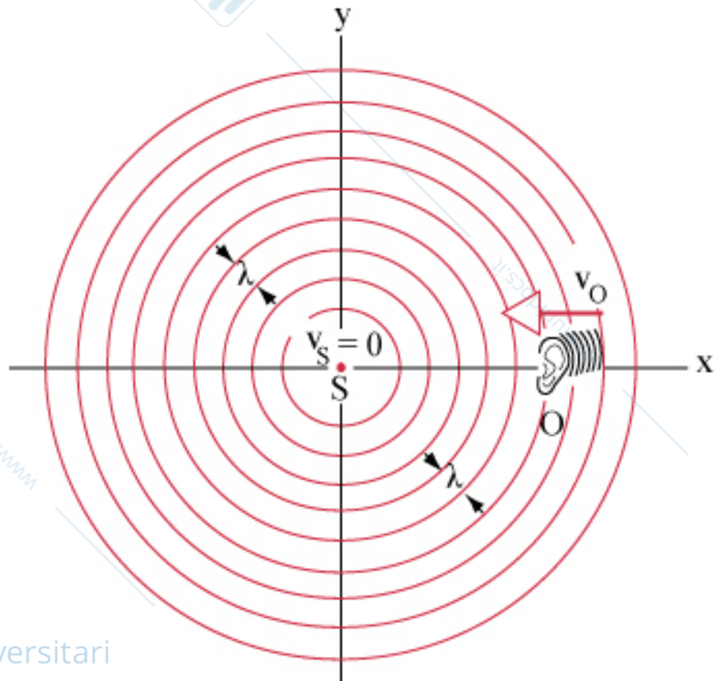
# EFFETTO DOPPLER

- È la variazione della frequenza percepita da un'osservatore quando è in moto relativo rispetto alla sorgente

- Consideriamo il caso di una **sorgente S ferma** (rispetto al mezzo di propagazione) ed un **osservatore O in moto** con velocità $\mathbf{v}_O$

- Se $\mathbf{v}_O = 0$ in un intervallo di tempo $t$ l'osservatore riceve $vt/\lambda$ fronti d'onda

- Se $\mathbf{v}_O > 0$ e O si avvicina a S, riceve ulteriori $v_O t/\lambda$ fronti d'onda



# EFFETTO DOPPLER

- Quindi la frequenza effettiva rivelata dall'osservatore è

$$\nu' = \frac{vt/\lambda + v_O t/\lambda}{t} = \frac{v + v_O}{\lambda} = \frac{v + v_O}{v/\nu}$$

$$\longrightarrow \quad \nu' = \nu\left(1 + \frac{v_O}{v}\right)$$

- Analogamente se l'osservatore si allontana dalla sorgente si ottiene

$$\nu' = \nu\left(1 - \frac{v_O}{v}\right)$$

- La frequenza nel sistema di riferimento della sorgente **non cambia**

# EFFETTO DOPPLER

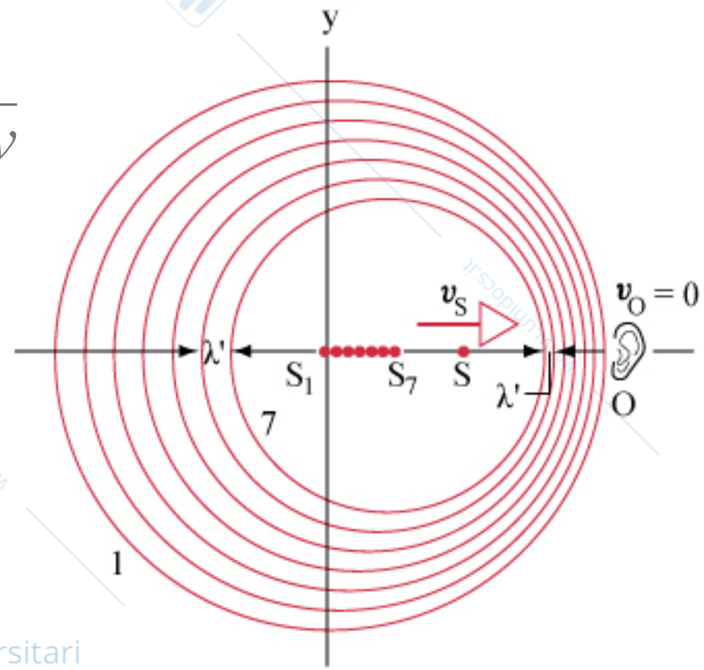
- Consideriamo adesso il caso in cui **S si muove** con velocità $\mathbf{v}_S$ (rispetto al mezzo di propagazione) e **O è fermo**

- Siccome S segue il moto dei fronti questi risultano, all'osservatore, più vicini di quanto non sarebbero se S fosse ferma

$$\lambda' = v/\nu - v_S/\nu \longrightarrow \nu' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{(v - v_S)/\nu}$$

- Se la sorgente si allontana da O

$$\nu' = \frac{v}{(v + v_S)/\nu}$$



# EFFETTO DOPPLER

- Infine se sia S che O sono in moto relativo rispetto al mezzo di propagazione

$$\nu' = \nu \frac{v \pm v_O}{v \mp v_S}$$

- L'effetto Doppler vale per tutte le onde (anche elettromagnetiche) ma i risultati precedenti valgono **solo** per le onde meccaniche

- L'effetto Doppler ha numerose applicazioni: radar astronomici, autovelox, flussimetri Eco-Doppler, etc…



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari