

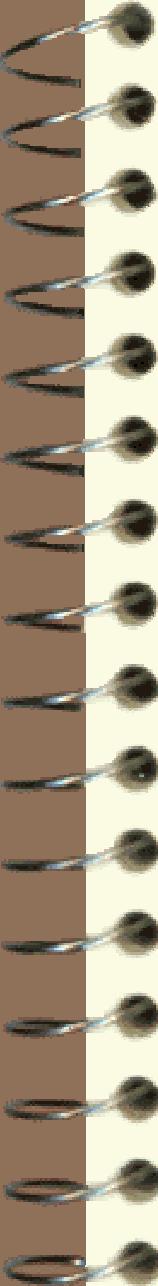


# La fisica e la musica

Scoprire i suoni

15/04/2005

Isidoro Ferrante



## Cos'è il suono?

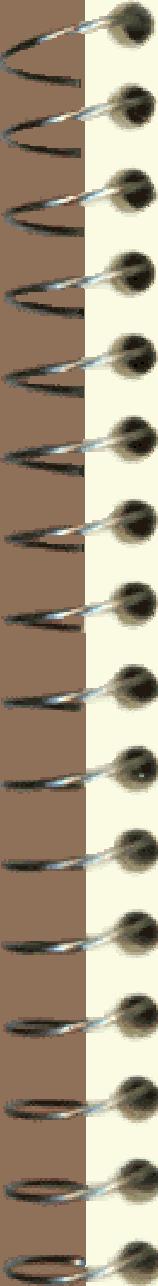
---

- Il suono è la vibrazione delle molecole dell'aria o di altri corpi solidi
- Ponendo in movimento le molecole in un punto, le vibrazioni si estendono rapidamente da una molecola all'altra, propagandosi sotto forma di *onde*



# Oggetti che vibrano

- 
- Per iniziare a parlare di suoni conviene cominciare ad avere familiarità con gli oggetti che vibrano....
    - ✓ Il pendolo
    - ✓ Un circuito elettrico
    - ✓ Una corda tesa
  - Il pendolo e il circuito elettrico vibrano in un solo "modo". La corda, invece, può vibrare in un numero infinito di modi!

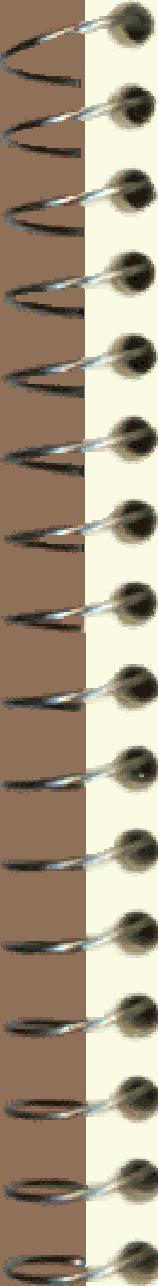


## Moto armonico semplice

---

- La più semplice oscillazione è il moto armonico semplice.
- Il pendolo, una massa attaccata ad una molla, un circuito LC oscillano con moto armonico semplice.
- Si ha un moto armonico semplice quando un oggetto è sottoposto ad una forza di richiamo proporzionale allo spostamento:

$$F = ma = -kx$$



# Cosa caratterizza il moto armonico?

---

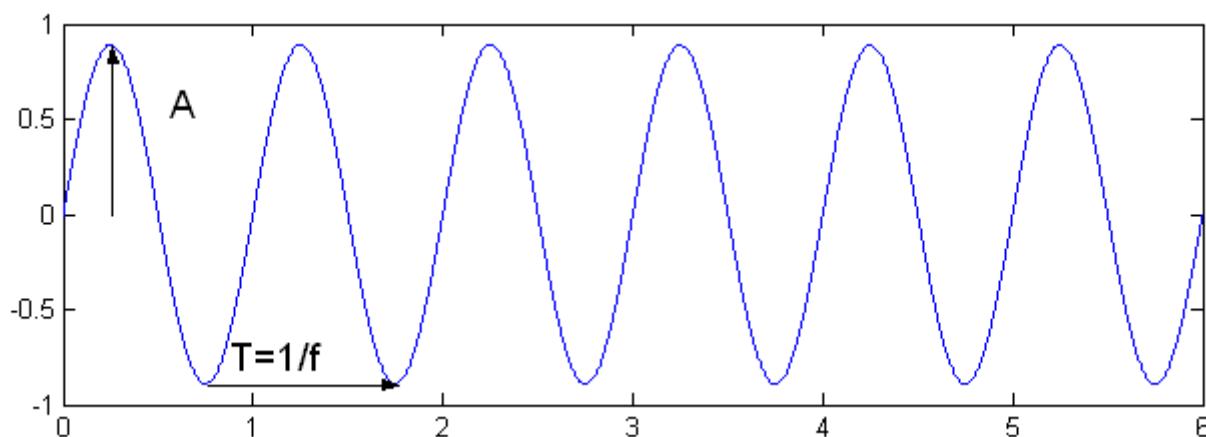
- Le oscillazioni armoniche semplici sono caratterizzate da tre quantità:
  - ✓ ampiezza: il massimo spostamento dell'oggetto che vibra.
  - ✓ frequenza: il numero di vibrazioni al secondo. Si misura in Hertz (Hz). L'inverso della frequenza è il periodo dell'oscillazione.
  - ✓ fase: l'istante in cui inizia la vibrazione.
    - Non ce ne interesseremo, perché non è importante ai nostri fini

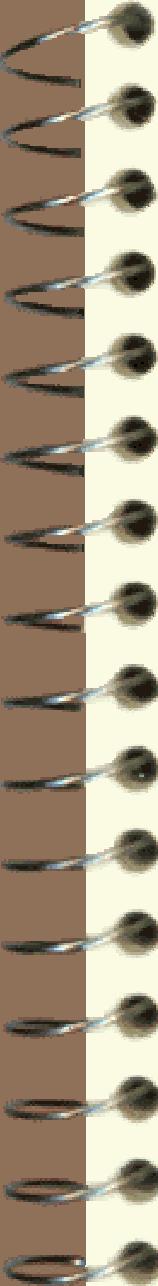
# Qualche formula...

→ Il moto armonico semplice è descritto dalla formula:

✓  $A$  è l'ampiezza  $x = A \sin(2\pi f t)$

✓  $f$  è la frequenza. Il periodo  $T$  è uguale ad  $1/f$





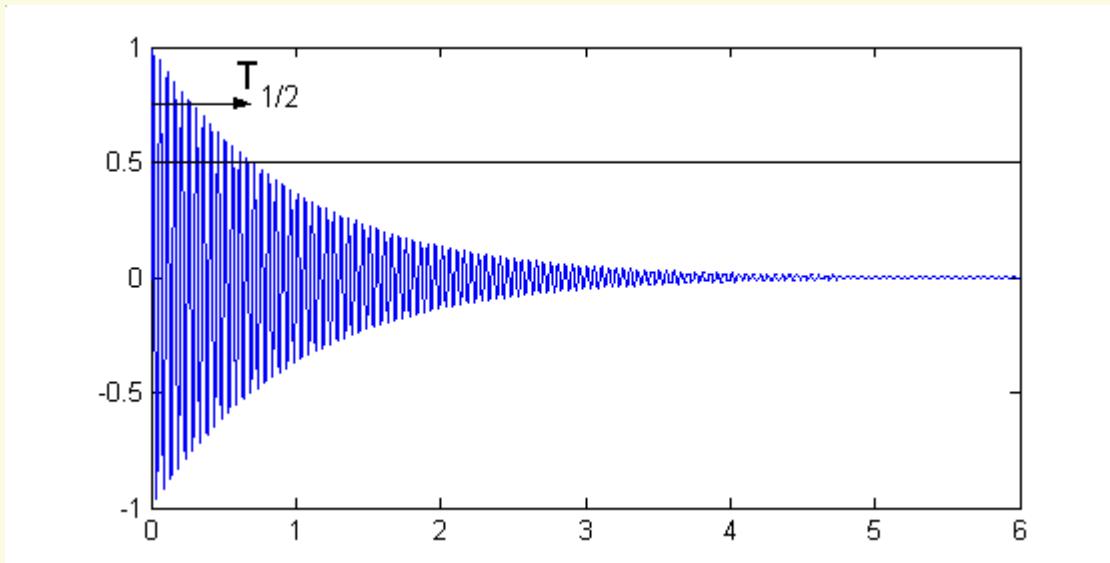
## Un passo avanti.....

- 
- Un oggetto posto in vibrazione se lasciato a sé stesso prima o poi si ferma.
    - ✓ Infatti le forze di attrito portano ad una continua conversione dell'energia meccanica dell'oscillatore in altre forme di energia
  - L'ampiezza delle oscillazioni non è quindi costante, a meno che non intervenga una forza a reintegrare l'energia perduta.
    - ✓ Il tempo impiegato a fermarsi si chiama tempo di smorzamento

## Facciamo un esempio.....

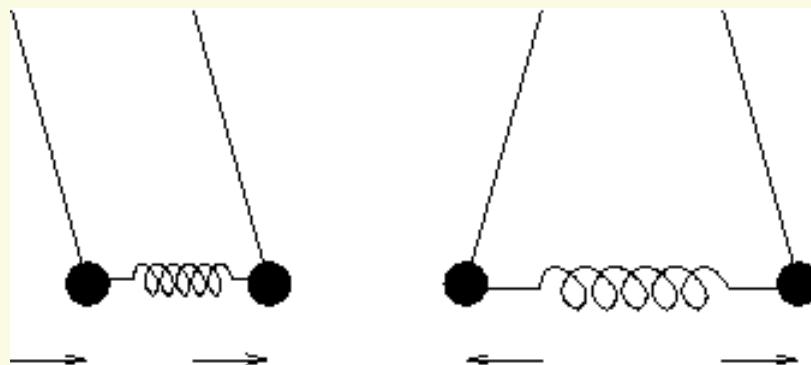
→ Esempio di moto armonico smorzato.

✓ Il tempo di dimezzamento  $T_{1/2}$  è il tempo che l'ampiezza impiega per dimezzarsi.



## Sistemi più complessi.....

- Se consideriamo un oggetto formato da due masse collegate scopriamo che queste possono vibrare in due modi diversi:
- Ogni modo vibra con una sua frequenza diversa....





## Ancora una generalizzazione....

- 
- Se ho un oggetto composto da TRE masse posso farlo vibrare in TRE modi diversi....
  - Alla fine, un oggetto esteso potrà vibrare in infiniti modi, ed ognuno avrà una frequenza diversa.
  - Il suono che giunge all'orecchio sarà quindi in generale la sovrapposizione di tante oscillazioni di frequenza diversa.



# Come funziona l'orecchio?

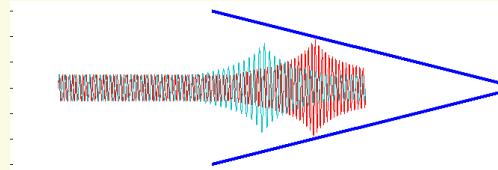
→ L'orecchio è composto essenzialmente da:

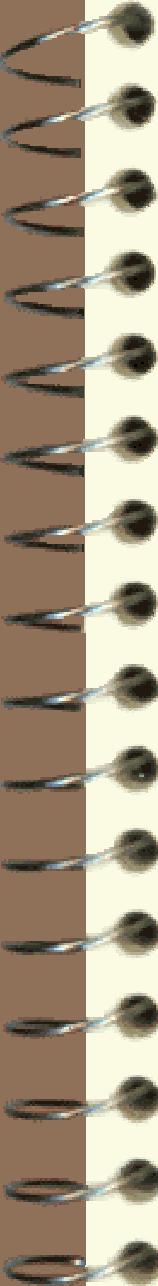
- ✓ Una membrana elastica (timpano) che vibra sotto l'azione delle onde sonore
- ✓ Una catena di ossicini che trasporta rigidamente le vibrazioni (martello, incudine e staffa)
- ✓ Un elemento sensibile detto coclea(chiocciola) che e' un tubo conico avvolto a spirale e ricoperto di terminazioni nervose



# La Cocllea

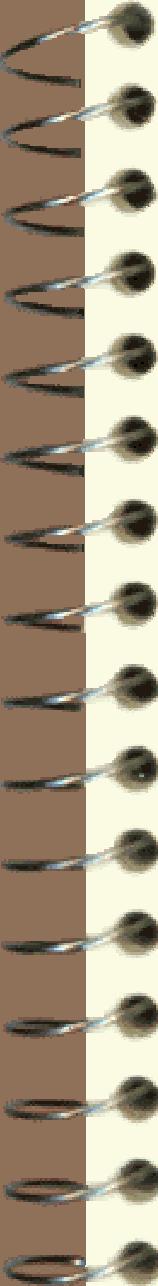
- La coclea è il cuore del nostro sistema uditivo.
  - ✓ Grazie alla sua forma particolare i suoni di frequenza diversa vengono concentrati in zone diverse della sua superficie, e quindi stimolano fibre nervose diverse.
- La coclea esegue una analisi in frequenza dei suoni che arrivano al nostro orecchio!
- L'orecchio umano è sensibile a vibrazioni di frequenza compresa tra un minimo di circa 20 Hz e un massimo di circa 20kHz.





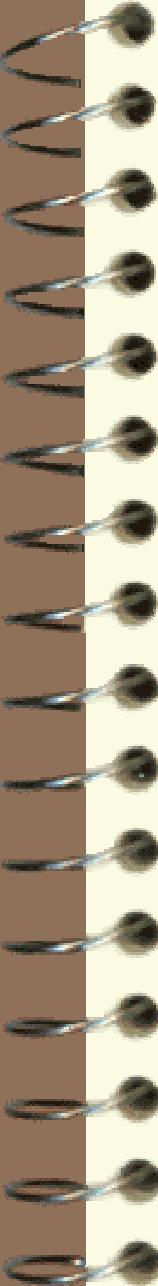
## Si delinea un percorso....

- 
- Oggi acquisterete familiarità con i moti armonici semplici, e con i sistemi con due modi di vibrazione.
  - Domani scoprirete che un oggetto meccanico e un circuito elettrico possono essere descritti dalle stesse leggi.
  - Venerdì vedrete oggetti più complessi, ed imparerete ad analizzare il loro moto e il suono che producono.



## Onde in aria

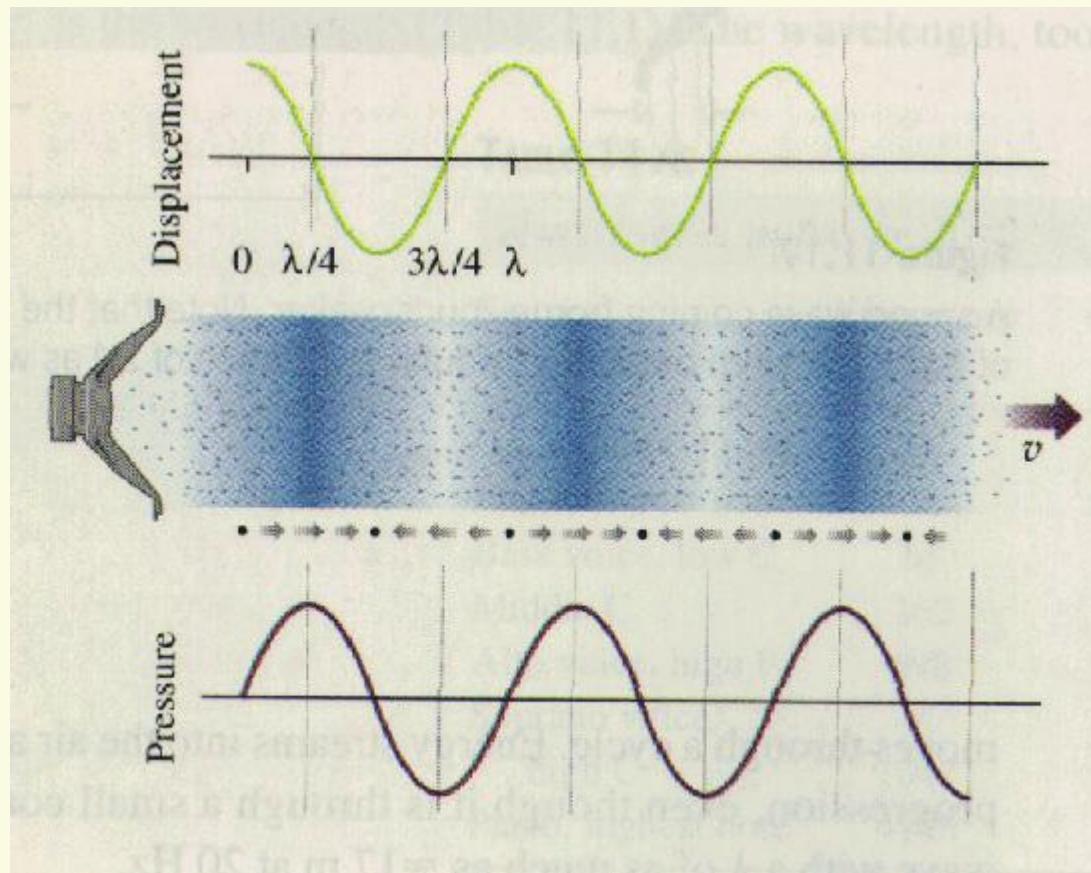
- 
- L'aria è un mezzo che ha una pressione e densità pressappoco uniforme.
    - ✓ Se in una zona creo una sovrapressione (ovvero una zona in cui la densità delle molecole è maggiore rispetto alla media), allora le molecole vicine risulteranno spinte ad espandersi nella zona adiacente.
    - ✓ Dopo un poco, la zona di sovrapressione si sarà svuotata creando una zona di depressione, che richiamerà le molecole vicine
    - ✓ Il risultato è una serie di oscillazioni, per cui le molecole vanno e vengono avanti ed indietro tra zone ad alta e bassa densità

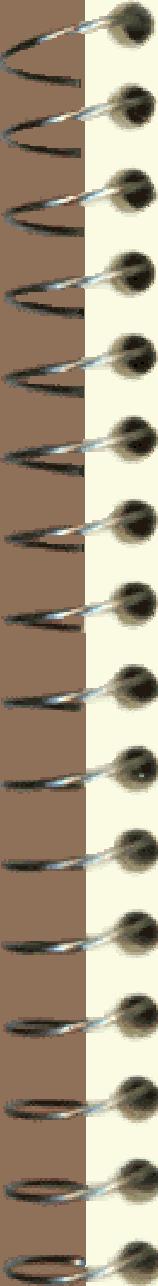


## Onde sonore

- 
- Nell'aria, a pressione e temperatura standard, le zone di sovrapressione e depressione si spostano con velocità circa uguale a 340 m/s.
  - La pressione e densità dell'aria raggiungono un massimo o un minimo nello stesso punto e nello stesso istante, dove però la velocità media delle molecole è zero, mentre dove la velocità è massima dove non vi sono depressioni o sovrapressioni:
    - ✓ Si dice, in linguaggio tecnico, che pressione e densità sono in fase, ma in controfase con la velocità.

# Schema della propagazione delle onde sonore

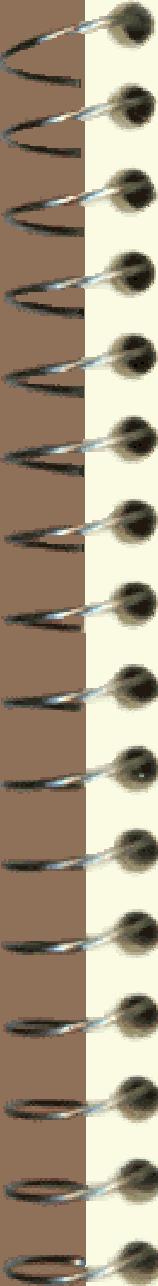




## Lunghezza d'onda

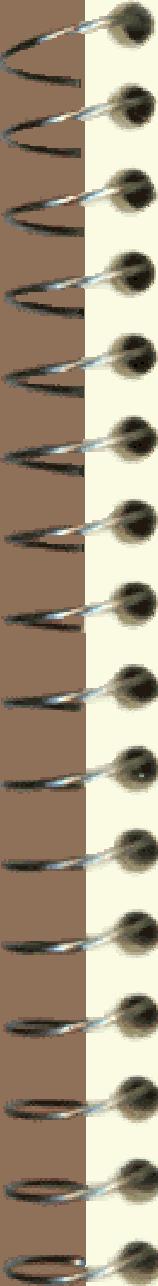
- 
- Supponiamo una oscillazione periodica, che raggiunge un massimo ad un certo istante.
  - Dopo un tempo  $T$ , il massimo si è spostato di una quantità  $T * c_s$ , e siccome l'onda è periodica nel punto originario ci sarà nuovamente un massimo.
  - La distanza tra due massimi è detta lunghezza d'onda, ed è collegata alla frequenza dalla relazione:

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



## Esempi....

- 
- Un'onda della frequenza di 1kHz ha una lunghezza di 34 cm
  - Un'onda della frequenza di 100 Hz ha una lunghezza di 3,4 metri
  - Un'onda della frequenza di 10kHz ha una lunghezza di 3,4 cm
  - *Le lunghezze d'onda sonore sono sempre dell'ordine di grandezza degli oggetti di uso quotidiano*



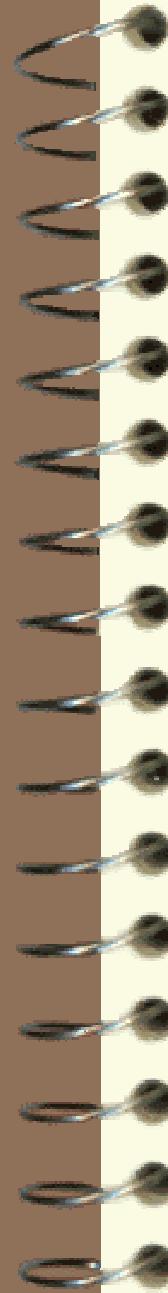
## Musica e rumore

---

→ Come facciamo a dire cosa è musica e cosa è rumore? Non è facile....

✓ Possiamo provare una prima classificazione provvisoria dicendo che la musica è regolare e organizzata, mentre il rumore è caotico e imprevedibile, ma...

Non affezionatevi troppo a questa definizione!!!!!!



# Spettro di una vibrazione

---

- Possiamo classificare i suoni in tre grosse categorie:
  - ✓ Moti armonici semplici (sinusoidali)
    - Caratterizzati da una sola frequenza di oscillazione
  - ✓ moti periodici non armonici
  - ✓ moti non periodici
- Le oscillazioni della seconda e terza categoria possono essere scomposte come somma di tante oscillazioni della prima categoria.
- L'insieme delle componenti è detto *spettro* del suono.



# Vibrazioni periodiche

---

- Una vibrazione periodica ha una frequenza ed un periodo ben definito, detta frequenza fondamentale.
- Può essere scomposta in infinite oscillazioni armoniche di frequenza multipla intera della fondamentale!
- Si parla allora di prima armonica (la fondamentale), seconda armonica (di frequenza doppia) terza armonica, etc.



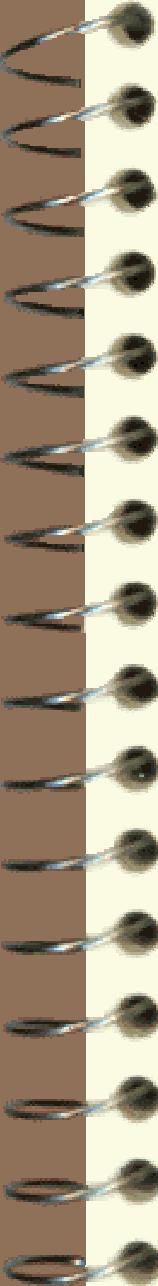
## Vibrazioni non periodiche

- 
- Anche le vibrazioni non periodiche possono essere scomposte come somma di oscillazioni armoniche, ma....
    - ✓ In linea di principio qualunque frequenza può far parte dello spettro
    - ✓ Le frequenze più importanti si chiamano parziali.



# Caratteri soggettivi del suono

- 
- Il suono musicale può essere descritto da alcune caratteristiche
    - ✓ La prima è il *volume*: un suono può essere forte o debole.
    - ✓ La seconda è l'*altezza*: un suono può essere grave o acuto
    - ✓ La terza , quella più indefinita, è il *timbro*: un suono può essere "caldo" o "freddo", "stridente" o morbido.....
  - Nessuna di queste quantità può essere misurata: si tratta di caratteristiche soggettive.



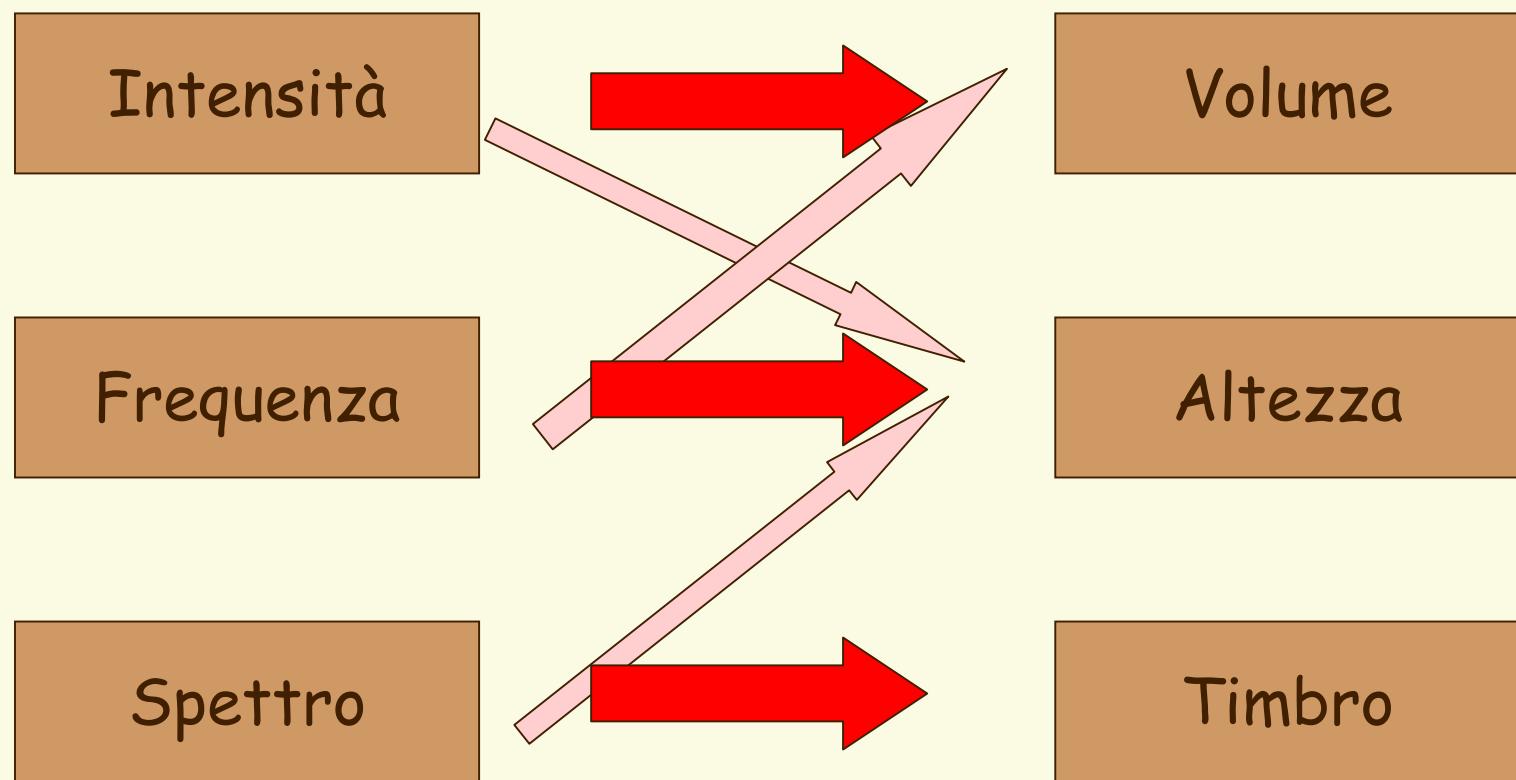
## Caratteri oggettivi del suono

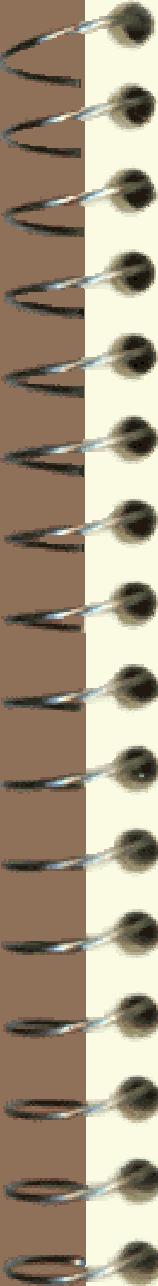
---

- Esistono delle quantità misurabili che corrispondono più o meno esattamente ai parametri soggettivi:
  - ✓ Il *volume* è correlato con l'*ampiezza*, ovvero l'*intensità* del suono
  - ✓ L'*altezza* è correlata con la frequenza
  - ✓ Il *timbro* è correlato con lo *spettro*, ovvero con la miscela di frequenze presenti nel suono.

# Schema

---





## Volume e intensità

- 
- L'intensità è la massima pressione esercitata da un'onda sonora. Il suo quadrato è proporzionale all'energia trasportata dall'onda.
  - ✓ Il volume percepito ha un andamento pressoché logaritmico: ovvero, se passando da 1 a 2 sorgenti sonore percepisco un aumento di volume  $dV$ , per ottenere un aumento doppio simile devo utilizzare 4 sorgenti.
  - ✓ Mano mano che il volume aumenta, devo aggiungere sempre più sorgenti per ottenere un aumento sensibile!
  - ✓ Ovviamente non è facile decidere che un suono è "il doppio dell'altro" si tratta di sensazioni soggettive.



# I Decibel

- 
- Per ottenere una grandezza commensurabile ad un volume, si misurano le intensità in decibel:

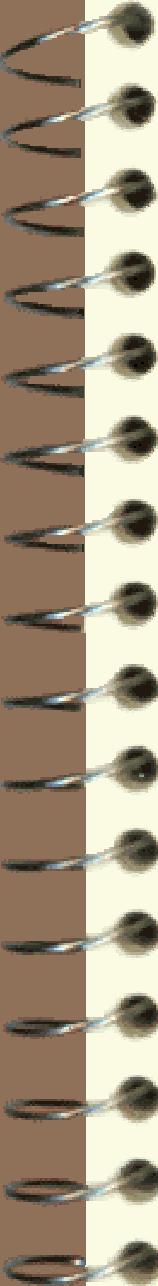
$$I = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\min}}$$

✓ P è la pressione massima dell'onda sonora,  $P_{\min}$  è la pressione corrispondente al minimo suono udibile:

$$P_{\min} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ atmosfere}$$

- Esempi:....

- ✓ Bisbiglio, circa 20 dB
- ✓ Voce, a 1 m, circa 65 dB
- ✓ fortissimo d'orchestra, circa 100 dB
- ✓ soglia del dolore circa 130 dB



# Frequenza ed altezza

- 
- L' altezza di un suono dipende dalla sua frequenza.
  - Purtroppo i suoni reali sono miscele di vibrazioni di frequenza diversa!
  - E allora?
    - ✓ Le oscillazioni armoniche sono i cosiddetti "toni puri": hanno una frequenza ben definita e non creano dubbi.
    - ✓ anche le oscillazioni periodiche non armoniche hanno una frequenza ben definita. Anche queste creano pochi problemi....
    - ✓ Le oscillazioni non armoniche non periodiche possono non avere una altezza definita se non c'è una frequenza che domina chiaramente sulle altre.....



## Esempi...

- 
- Il suono di "libero" del telefono ha una frequenza di circa 450 Hz
  - Il ronzio dovuto ai disturbi di rete ha spesso una frequenza intorno a 100 Hz.
  - Il telefono trasmette le frequenze fino a 5 kHz.
  - L'ultimo do del pianoforte ha una frequenza di 4192 Hz
  - Il ronzio di una zanzara è intorno ai 10 kHz.

# L'intervallo di ottava

→ Si verifica sperimentalmente che due note di frequenza doppia, quando suonate assieme o separatamente, vengono percepite dall'orecchio come la stessa nota: infatti nella scala musicale hanno lo stesso nome!

La 440 Hz 

La 880 Hz 

Do 330 Hz 

Do 660 Hz 

→ Due suoni qualsiasi, di frequenza doppia, appaiono all'orecchio come equidistanti: si dice che si trovano ad un intervallo di **OTTAVA**

## Altri intervalli; la consonanza

- Se due note hanno una frequenza nel rapporto di 3/2, allora l'orecchio le percepisce come consonanti, ovvero suonano bene insieme.
- In questo caso si parla di intervallo di QUINTA, e la distanza è la stessa che c'è tra il do e il sol.
- Quinta: 660 e 440 Hz   
- Il rapporto 4/3 corrisponde invece ad un intervallo di QUARTA, ed è uguale alla distanza che c'è tra il do e il fa:

Quarta: 330 e 440 Hz   

## La scala musicale

→ Cercando tutti i possibili intervalli di quarta e quinta a partire da una nota, si arriva alla famosa divisione della scala in 7 note, corrispondenti a 12 intervalli pressoché uguali.



→ Nel pianoforte, gli intervalli tra due tasti adiacenti sono davvero tutti uguali: in questo modo i rapporti tra do e sol e do e fa non sono esattamente 3/4, ma sono solo approssimati.



## Costruiamo la scala musicale

- 
- Supponiamo sia  $r$  il rapporto di frequenza tra due note che distano di un semitono.
  - Allora, se sommo 12 semitonni, ogni volta devo moltiplicare per  $r$ : ma alla fine ho ottenuto la stessa nota, ovvero un intervallo di ottava, che corrisponde al doppio della frequenza! quindi:  $r^{12}=2$
  - O anche, prendendo il logaritmo

$$12 \log(r) = \log(2)$$

$$\log(r) = \log(2)/12 = \log(\sqrt[12]{2})$$

$$r = \sqrt[12]{2} = 1,0595.....$$

## Costruiamo la scala musicale (2)

→ Una volta fissata la frequenza  $f$  per una nota, ad esempio il la (440 Hz), è possibile ricavare la frequenza delle altre note:

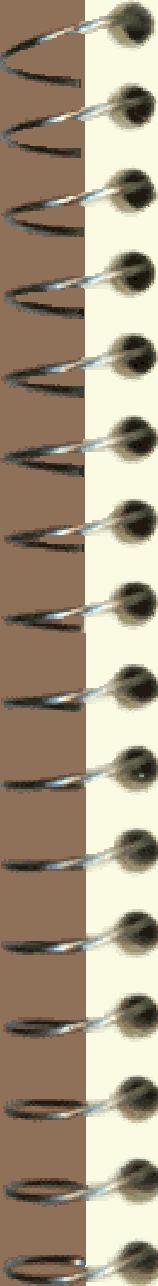
nota	semitoni	frequenza
do	0	$f_{do}$
re	$0+2=2$	$f_{re} = r^2 f_{do}$
mi	$2+2=4$	$f_{mi} = r^2 f_{re} = r^4 f_{do}$
fa	$4+1=5$	$f_{fa} = r f_{mi} = r^5 f_{do}$
sol	$5+2=7$	$f_{sol} = r^2 f_{fa} = r^7 f_{do}$
la	$7+2=9$	$f_{la} = r^2 f_{sol} = r^9 f_{do}$
si	$9+2=11$	$f_{si} = r^2 f_{la} = r^{11} f_{do}$
do	$11+1=12$	$f_{do} = r f_{si} = r^{12} f_{do} = 2 f_{do}$



## Il nostro apparato....

---

- Un microfono
- Un computer con scheda audio
- Un programma analizzatore dei suoni



# Il microfono

---

- Il microfono è un normale microfono da computer
- lo spinotto (jack) presenta tre contatti.
  - ✓ Il primo (il corpo) è collegato con la scatola metallica del computer, e serve da contatto di terra.
  - ✓ Il secondo (la punta) porta un segnale proporzionale alla pressione atmosferica in corrispondenza del microfono
  - ✓ Infine il terzo (l'anello) serve come terminale di alimentazione.
  - ✓ Il microfono funziona bene solo tra circa 50Hz e 10kHz



## La scheda audio

---

- Una normale scheda audio consente di convertire in segnale del computer in un insieme di numeri binari.
- Per effettuare questa operazione, il segnale viene misurato 44100, oppure 22050, oppure 11025 volte al secondo. La frequenza di campionamento di 44100 Hz produce la qualità migliore.
- Ogni misura viene trasformata in un numero binario composto da 16 cifre (bit)



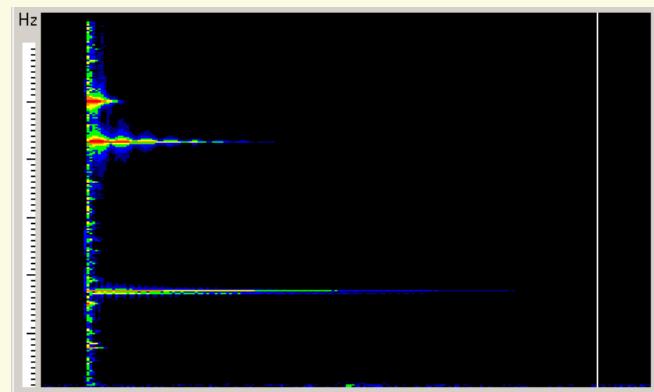
# Il programma di analisi

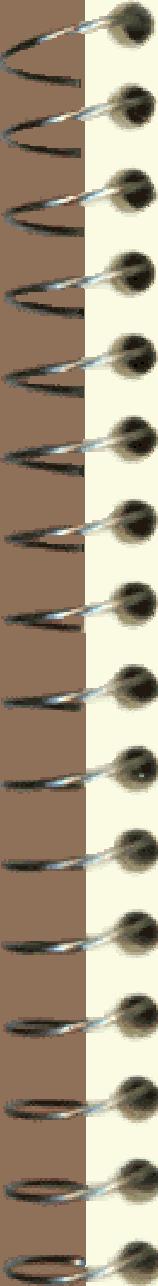
---

- Utilizzeremo un programmi di analisi gratuito e semplici da usare:
- gram
- Permette di visualizzare lo spettro del suono raccolto da un microfono, o quello registrato su un file.

# Lo spettrogramma

- Lo spettrogramma è un metodo molto utile in quanto mostra l'evoluzione temporale dello spettro di un suono.
  - ✓ In un certo senso funziona come la coclea, in quanto permette di capire istante per istante quali frequenze sono contenute nel suono.
  - ✓ Il programma calcola lo spettro, e poi traccia un puntino il cui colore corrisponde all'intensità della frequenza corrispondente.





# Classificazione degli strumenti musicali

---

- A corda (cordofoni): chitarra, violino, pianoforte, mandolino....
- A fiato (aerofoni): flauto, clarinetto, sassofono....
- Membranofoni: tamburo, timpano, bongo....
- Idiofoni: xilofono, marimba....
- All'interno di ogni gruppo esistono delle sottoclassificazioni

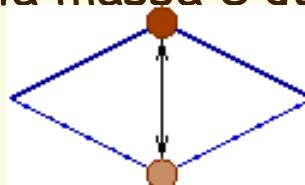


## La corda vibrante

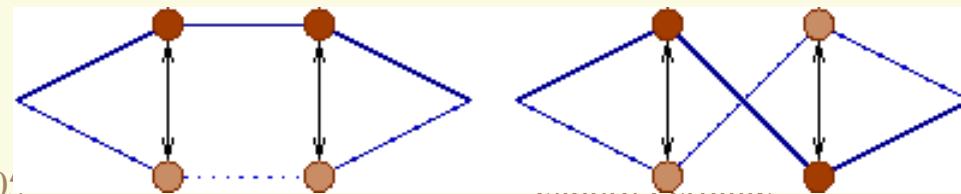
- 
- La corda vibrante è l'esempio più semplice di vibratore adoperato negli strumenti musicali.
    - ✓ Per semplicità, si considera una corda di lunghezza  $L$  e diametro trascurabile bloccata agli estremi.
    - ✓ La corda viene tesa con una forza  $T$  (si misura in newton).
    - ✓ La massa della corda è proporzionale alla sua lunghezza:
$$m = \rho L$$
    - ✓ La quantità  $\rho$  è detta *densità lineare*, e per una corda omogenea è uguale alla massa di un metro di corda.

# I modi di oscillazione

- Schematizziamo una corda come una massa tesa tra due molle
  - ✓ La massa oscilla in su e giù con la sua frequenza, data da quanto è grande la massa e quanto sono tese le molle.....



- Supponiamo di avere due masse: allora abbiamo due modi in cui possono oscillare: o tutte e due su e giù, oppure una su ed una giù....



# Proseguiamo in questa generalizzazione

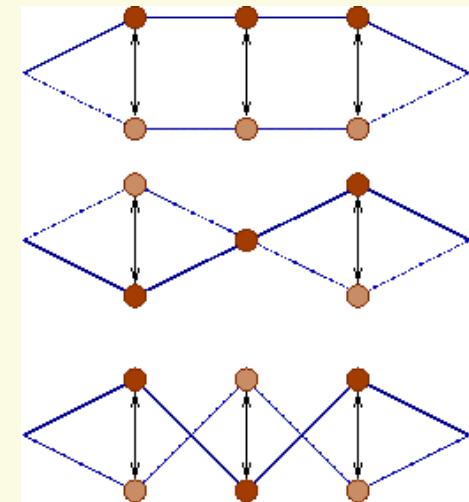
→ con tre masse, posso avere tre situazioni:

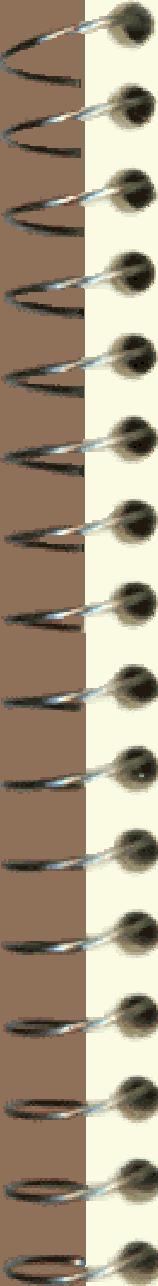
✓ Tutte su e giù contemporaneamente....

✓ una su, una giù e quella al centro ferma

✓ quelle estreme su e quella centrale giù

→ Possiamo continuare all'infinito, aggiungendo masse.... Alla fine otteniamo che una corda, pensata come un insieme infinito di masse, ha un numero infinito (numerabile!) di modi di oscillare, ognuno con la sua frequenza.





## I modi della corda

---

- I diversi modi in cui può oscillare una corda sono descritti dalla funzione seno:

$$y = A \sin\left(n \frac{\pi x}{L}\right)$$

- ✓ Il numero  $n$  identifica ciascuno dei modi.  $n=1$  vuol dire che abbiamo una semisinusoide,  $n=2$  che ne abbiamo due, e così via
- Ogni volta che aumenta il numero di semisinusoidi, aumenta la frequenza: il modo  $n$  oscilla con una frequenza data da:

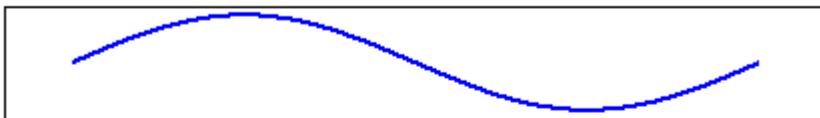
$$f = n \sqrt{\frac{T}{\rho}} \frac{1}{2L}$$

# Meglio un disegno.....

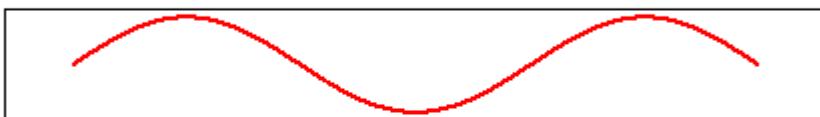
→ Ecco un disegno dei primi modi della corda



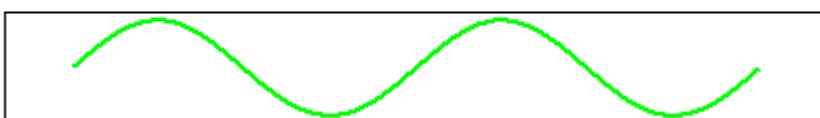
$$n=1 \quad f_1=f$$



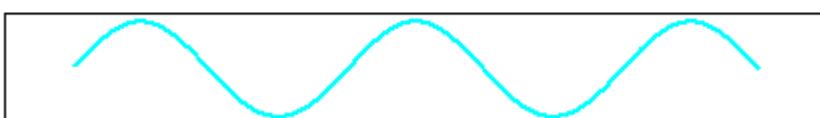
$$n=2 \quad f_2=2f$$



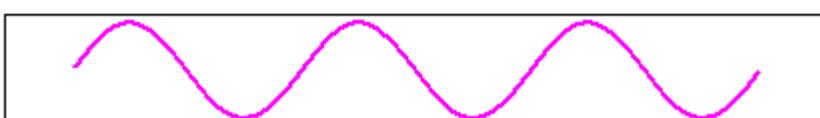
$$n=3 \quad f_3=3f$$



$$n=4 \quad f_4=4f$$



$$n=5 \quad f_5=5f$$



$$n=6 \quad f_6=6f$$



E meglio ancora una animazione....

---

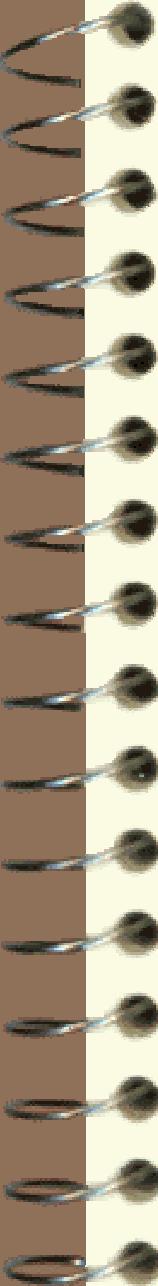
→ Questa è una applet java molto interessante...



## In sintesi...

- 
- Quando si pizzica una corda, la si pone in vibrazione in infiniti modi diversi.
  - Ognuno di questi modi ha una frequenza che è multipla di una frequenza detta fondamentale: quindi il moto della corda è **periodico**
  - La frequenza fondamentale corrisponde alla nota percepita dall'orecchio: aumenta con la radice quadrata della tensione, e diminuisce con la radice quadrata della densità lineare e con l'inverso della lunghezza:

$$f_{fond} = f_1 = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \frac{1}{2L}$$



## La funzione della cassa armonica

---

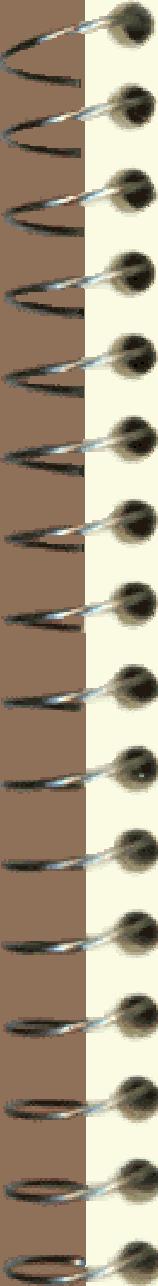
- La corda da sola smuove pochissima aria.
- Per aumentare l'energia sonora emessa, si accoppia ad una lastra leggera, o ad una scatola, in grado di spostare una maggiore quantità di aria....
- Ma non è tutto: la scatola vibra anche lei, rafforzando alcune delle armoniche e attenuandone delle altre: in questo modo contribuisce a determinare il timbro dello strumento!



## Pizzicare o sfregare?

---

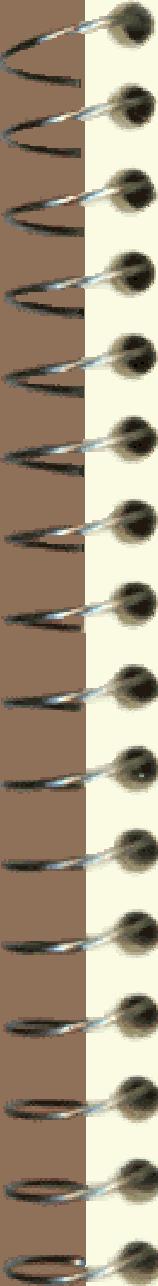
- In alcuni strumenti (chitarra, mandolino, clavicembalo) la corda viene pizzicata o percossa (pianoforte).
- Si ha allora un suono che si smorza lentamente, a volte dopo tanto tempo, altre volte rapidamente.
- Per ottenere suoni continui, di ampiezza costante, bisogna fornire continuamente energia alla corda: il metodo adoperato negli archi è quello di sfregarla.....



## Come funziona lo sfregamento?

---

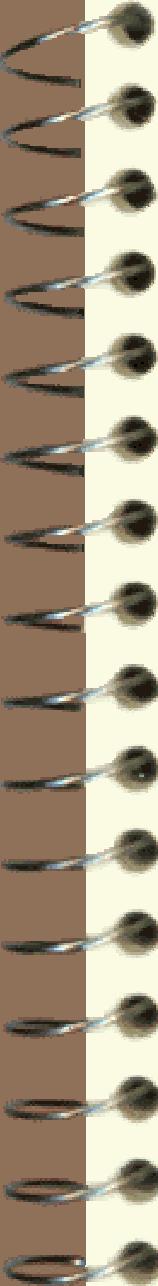
- Per capire come funziona lo sfregamento, pensate ad un palloncino su cui sfregate un dito....
- il palloncino si tende, finché cede di un tratto; poi si tende nuovamente finché non cede di nuovo, e così via.
- allo stesso modo funziona l'archetto del violino.



## I tubi sonori

---

- Gli strumenti a fiato sfruttano le oscillazioni di una colonna d'aria.
- Che l'aria sia un mezzo elastico si sa, basta gonfiare una bicicletta per rendersene conto.
- Se stappiamo una bottiglia di colpo, otteniamo un suono



# Onda in un tubo chiuso

---

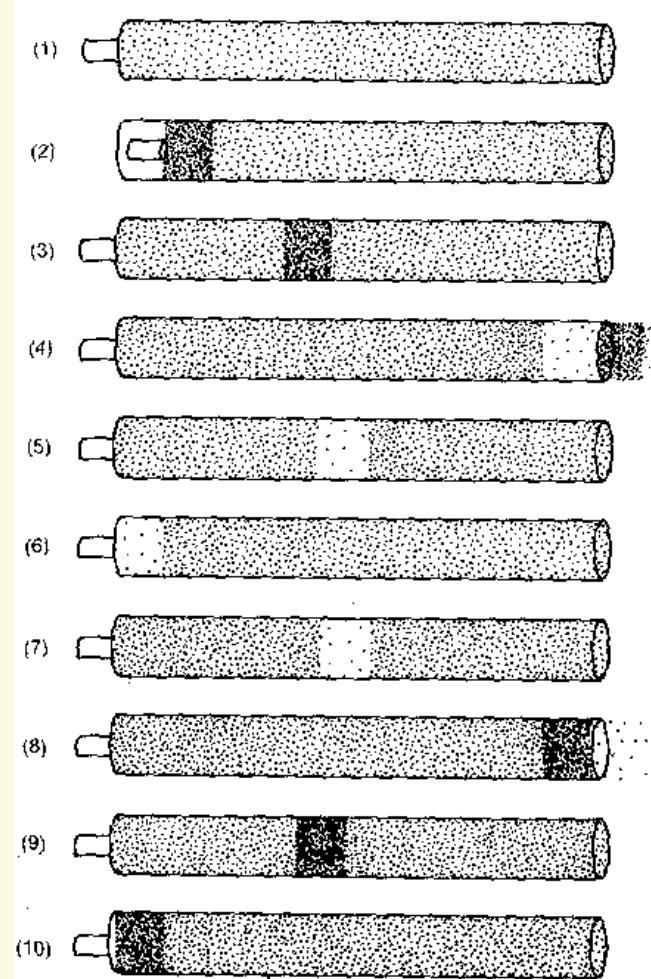
- Supponiamo di avere una zona di sovrapressione che si propaga in un tubo, fino a raggiungere una estremità chiusa
  - ✓ Allora all'estremità le molecole non potranno più spostarsi, e quindi la pressione si accumulerà fino a spingere le molecole all'indietro.
- Pertanto all'estremità chiusa di un tubo:
  - ✓ la pressione ha un massimo o un minimo.
  - ✓ la velocità delle molecole è nulla
  - ✓ la sovrapressione o depressione torna indietro
- L'estremità chiusa di un tubo riflette le onde lasciandole invariate!



# Onda in un tubo aperto

- 
- Supponiamo stavolta che la sovrapressione raggiunga una estremità aperta
    - ✓ Stavolta le molecole in eccesso si distribuiranno all'esterno in un enorme volume: la pressione cadrà bruscamente al valore atmosferico. Inoltre le molecole spinte dalla sovrapressione sfuggiranno dal tubo senza problemi
  - Pertanto all'estremità aperta di un tubo:
    - ✓ La sovrapressione o depressione vale zero
    - ✓ La velocità è massima
    - ✓ Lo svuotamento improvviso causa una depressione che viaggia in verso opposto
  - Le onde vengono riflesse con inversione!

Una figura è sempre meglio.....

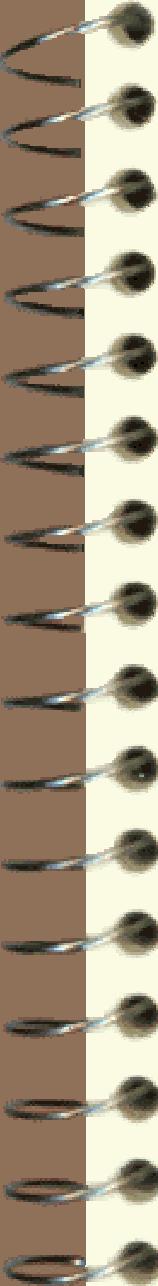


15/04/2005



## Onde in un tubo chiuso in entrambi i lati

- In un tubo chiuso in entrambi i lati, le onde andranno su e giù in continuazione.
- Dopo aver percorso due volte la lunghezza del tubo, torneranno allo stesso punto con la stessa velocità dopo un tempo  $T=2L/c_s$
- Quindi il suono all'interno di un tubo chiuso è periodico con frequenza  $F=c_s/2L$ !
- Lo spettro sarà formato dalla fondamentale e da tutte le armoniche di frequenza multipla della fondamentale!



# Onde in un tubo aperto in entrambi i lati

---

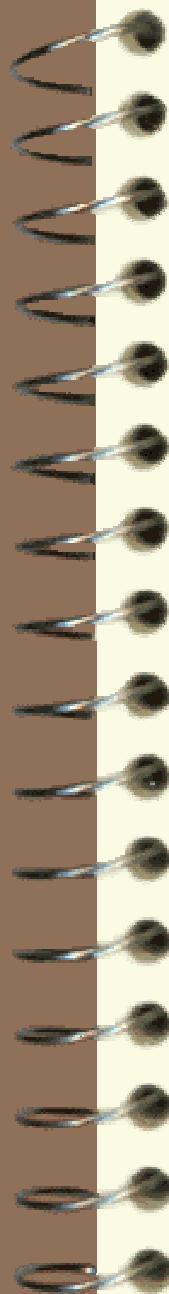
- Come nel tubo chiuso, ogni estremità riflette l'onda, ma invertendone il segno.
- Dopo due riflessioni ai due estremi, però l'onda ritorna del segno che aveva all'andata:
- anche stavolta il suono è periodico di periodo  $T=2L/cs$
- anche stavolta la frequenza fondamentale sarà  $f=cs/2L$



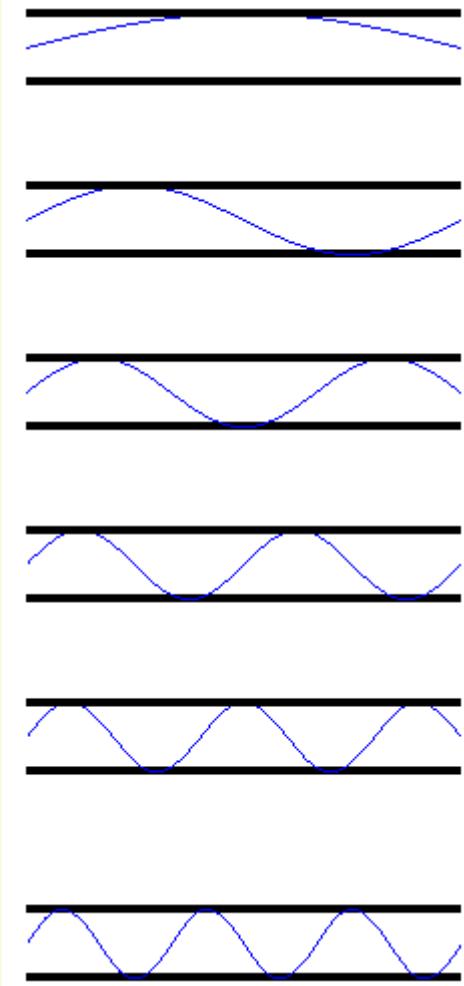
## Onde in un tubo aperto da un lato solo

---

- Stavolta, la una riflessione cambia segno, l'altra no!
- Dopo due riflessioni, non ritrovo la stessa onda, ma trovo l'onda cambiata di segno!
- Quindi devo aspettare altre due riflessioni per ritrovarmi con l'onda nella stessa configurazione: il periodo è doppio!  $T=4L/c_s$
- La frequenza sarà metà:  $f=c_s/4L$
- Vedremo inoltre che scompaiono le armoniche dispari.



## Un altro modo di vedere le cose....



Le onde dentro al tubo aperto devono avere agli estremi la pressione uguale a quella atmosferica: quindi la sovrapressione deve essere zero.

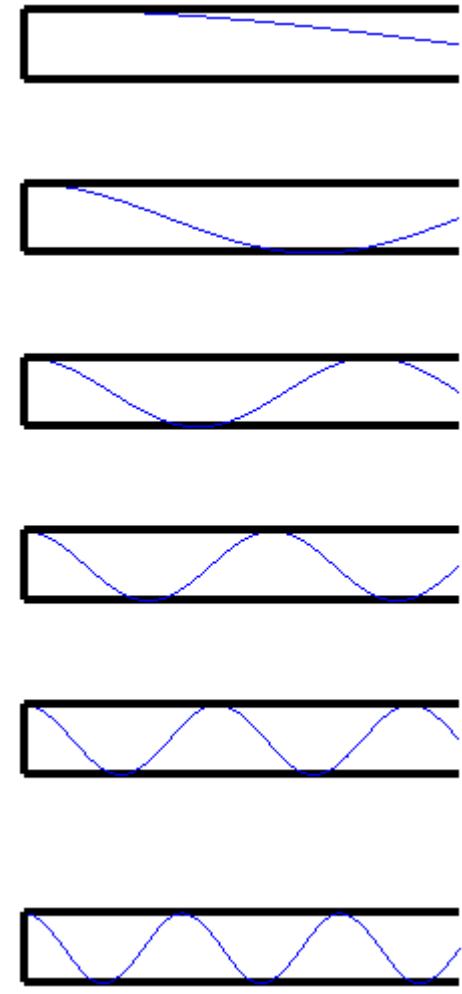
Di conseguenza, guardando la figura, si capisce che il tubo deve essere lungo un multiplo di mezza lunghezza d'onda:

$$L = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{c_s}{2f_n} \Rightarrow f_n = n \frac{c_s}{2L}$$

Le onde in questo caso rimangono imprigionate dentro al tubo: non vanno né a destra né a sinistra: si parla di onde stazionarie.

Si ragiona in modo analogo per il tubo chiuso.

# E il tubo semiaperto?



Nel tubo semiaperto, la pressione ha un massimo ad un estremo e uno zero all'altro! La lunghezza del tubo è pari ad un numero dispari di  $1/4$  della lunghezza d'onda

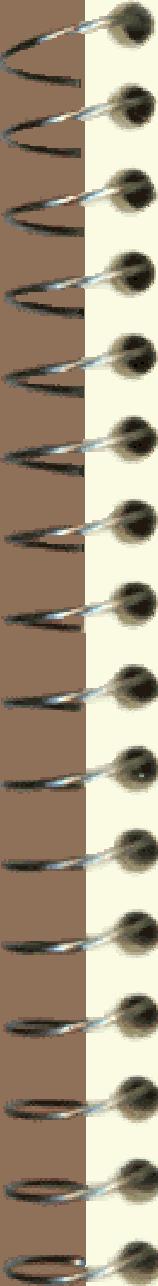
$$L = (2n-1) \frac{\lambda}{4} = (2n-1) \frac{Tc_s}{4} = (2n-1) \frac{c_s}{4f_n}$$

$$f_n = (2n-1) \frac{c_s}{4L}$$

La frequenza minima ( $n=1$ ) corrisponde alla fondamentale, che è il **doppio** di quella di un tubo aperto o chiuso da tutte e due le parti.

Le altre frequenze sono multipli *dispari* della fondamentale.

Isidoro Ferrante



## E il resto?

---

- Il resto è un bel casino: a parte le corde vibranti e i tubi sonori, non si riescono a trattare bene gli oggetti vibranti di forma diversa.
- In particolare, il suono prodotto da questi:
- non sarà in generale periodico
- conterrà parziali non armoniche, ovvero non multiple della fondamentale
- Non avrà una altezza ben definita.



## Le membrane

---

- Ad esempio, le membrane tese vibrano in modi molto complicati tra di loro.
- Tamburi e tamburelli non emettono una nota precisa, servono solo a dare il ritmo.
- In alcuni casi, come nel timpano, esiste un modo di oscillazione più forte degli altri che dà l'altezza.



## I metallofoni

---

- I metallofoni, strumenti di metalli suonati per percussione, sono un incubo da trattare.
- Spesso però, come nello xilofono o nelle campane tubolari, un modo domina sugli altri, e quindi è possibile definire una altezza.
- Le campane, ad esempio, sono costruite in modo da avere parziali quasi armoniche: allora le note suonate possiedono un'altezza precisa.



## E infine gli strumenti elettrici...

- 
- Gli strumenti elettrici sfruttano l'elettronica per produrre le oscillazioni, e sono in grado di simulare, in linea di principio qualunque spettro.
  - Pero' a me sembrano meno interessanti di quelli meccanici, e per questo mi fermo qui.