

Elementi di acustica

Massimiliano Salfi

salfi@dmi.unict.it

Cos'è il suono

Col termine "suono" viene di solito indicato l'insieme di due fenomeni:

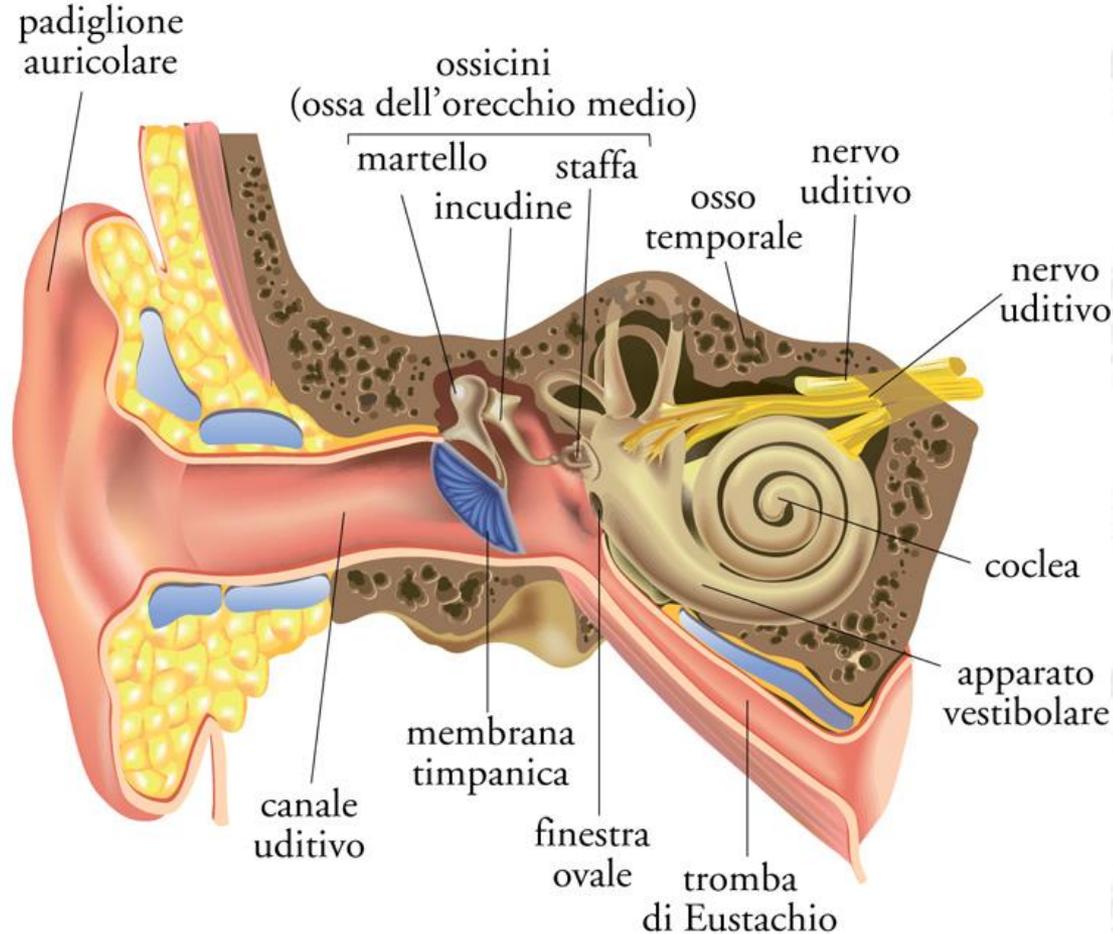
- Propagazione in un mezzo elastico di **onde** prodotte da una sorgente messa in vibrazione;
- Interpretazione di queste onde, da parte dell'uomo, mediante il complesso sistema orecchio-cervello.

Cos'è il suono

- Fondamentalmente, ciò che caratterizza un suono, da un punto di vista strettamente fisico, è la frequenza che si misura in **Hertz** (cicli al secondo) legata alla velocità di vibrazione della sorgente e l'intensità che si misura in **decibel**, legata all'ampiezza, o più propriamente all'energia dell'oscillazione stessa.
- Mentre l'orecchio esterno rileva la variazione periodica di pressione, l'orecchio interno la converte in impulsi elettrici da inviare al cervello che interpreta tale variazione come suono.

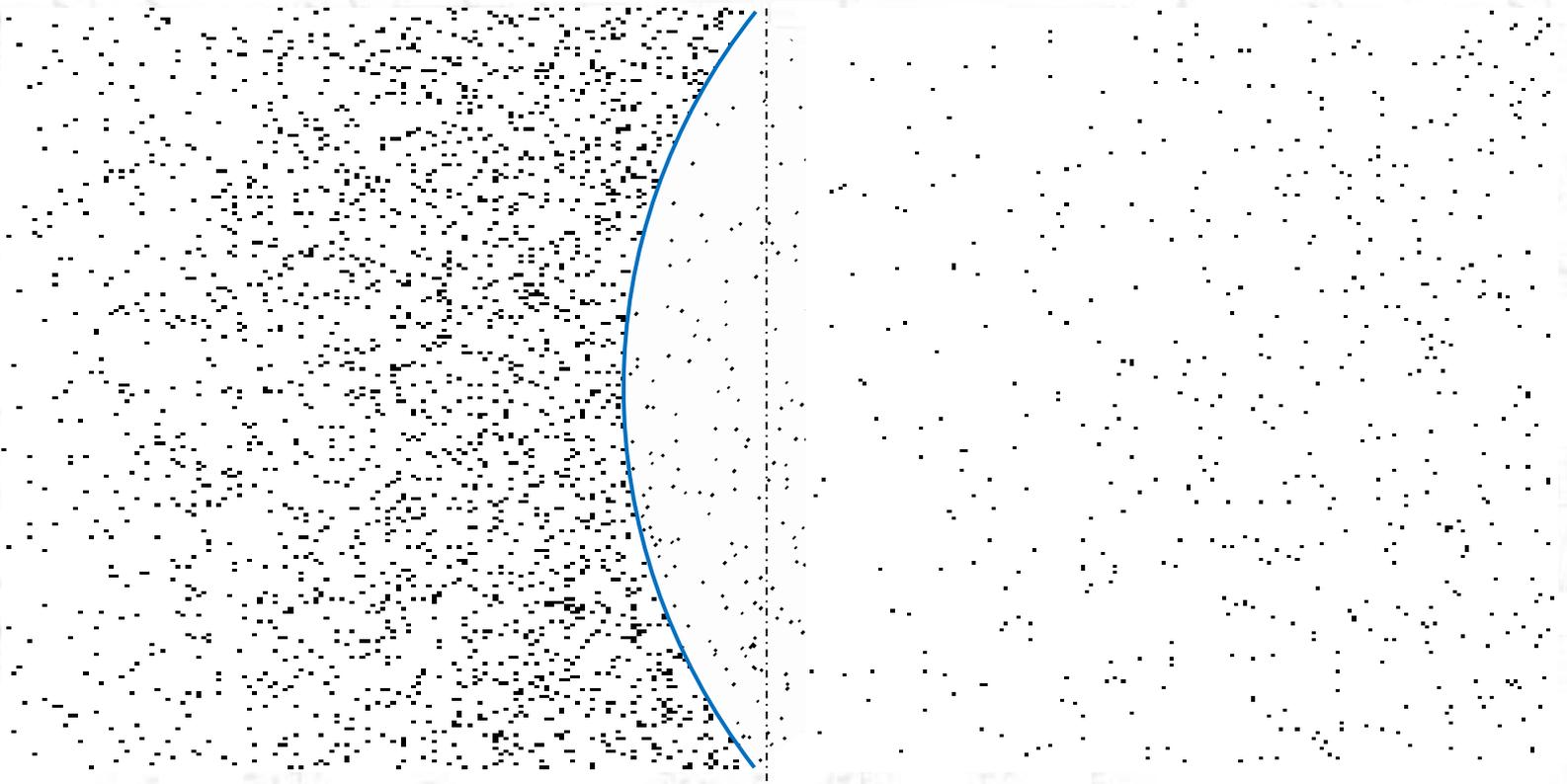
La propagazione del suono nell'aria

Orecchio umano



La propagazione del suono nell'aria

Esempio 1: una corda che vibra nell'aria



La propagazione del suono nell'aria

- Inizialmente la densità delle molecole d'aria é costante, cioè in ogni unità di volume vi è lo stesso numero di molecole.
- Questa densità può essere espressa da un valore di pressione, che in condizioni di quiete, a livello del mare, è di circa 1 atm, pari a 1.033 kg/cm^2 .
- Quando l'aria viene perturbata (cioè quando la corda vibra), il valore di pressione non è più costante, ma varia da punto a punto: aumenta dove le molecole sono compresse, diminuisce dove le molecole sono espanse:

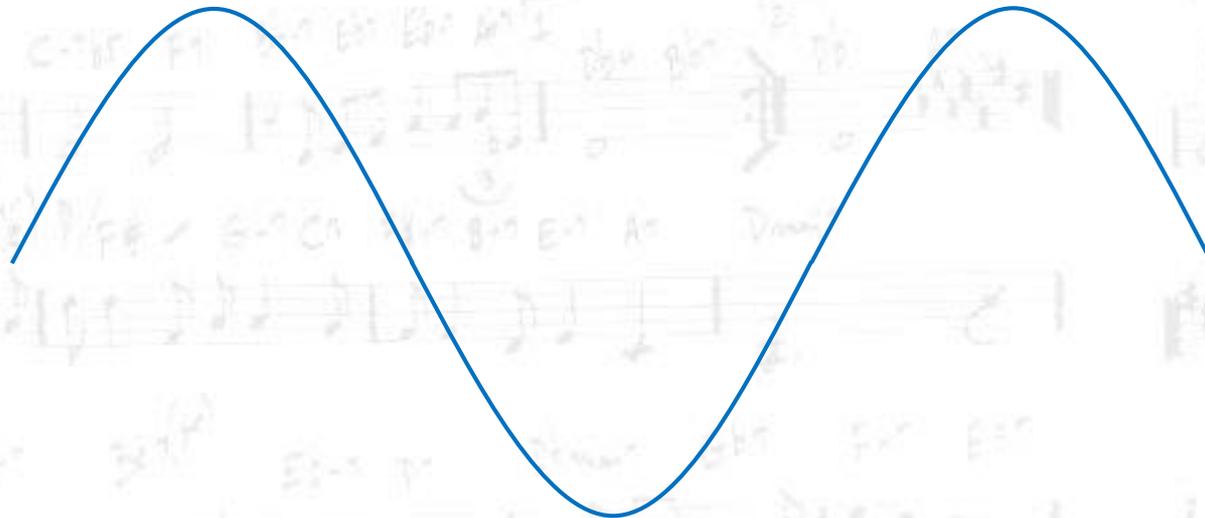
La propagazione del suono nell'aria

Il fenomeno può essere studiato:

- dal punto di vista dello spazio (indagando sul valore della pressione nei vari punti in un determinato istante)
- dal punto di vista del tempo (indagando su come varia il valore della pressione in uno stesso punto in funzione del tempo).

La propagazione del suono nell'aria

Graficamente si ottiene una sinusoide:

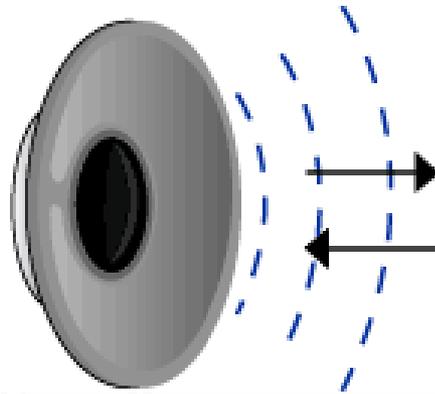


La propagazione del suono nell'aria

- Quello che noi percepiamo come suono è una variazione, rispetto ad un valore costante, nella pressione dell'aria ripetuta ciclicamente un certo numero di volte in un intervallo di tempo.
- Affinché un suono si possa propagare ha bisogno di un mezzo che lo trasporti: qualsiasi mezzo, solido, liquido o gassoso che abbia proprietà di elasticità nel movimento delle sue particelle elementari.

La propagazione del suono nell'aria

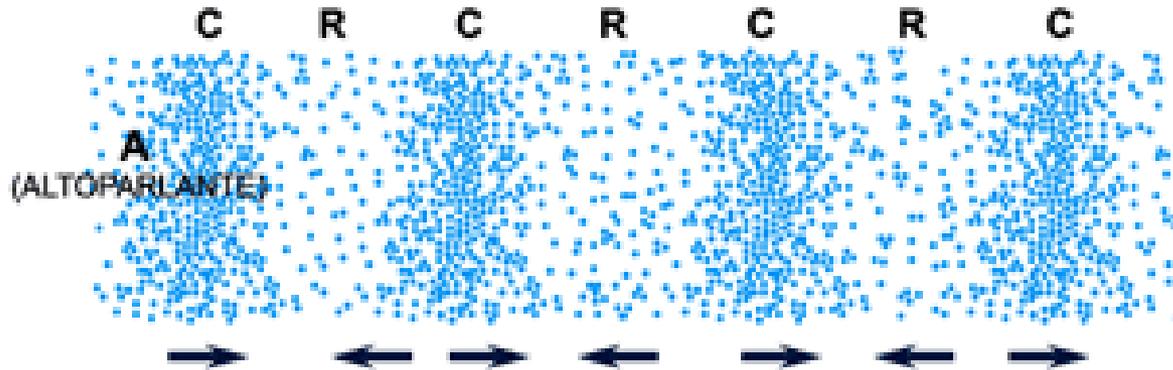
Esempio 2: un altoparlante



Il magnete si muove avanti e indietro seguendo l'ampiezza del segnale elettrico che viene applicato all'induttore su cui si appoggia.

La propagazione del suono nell'aria

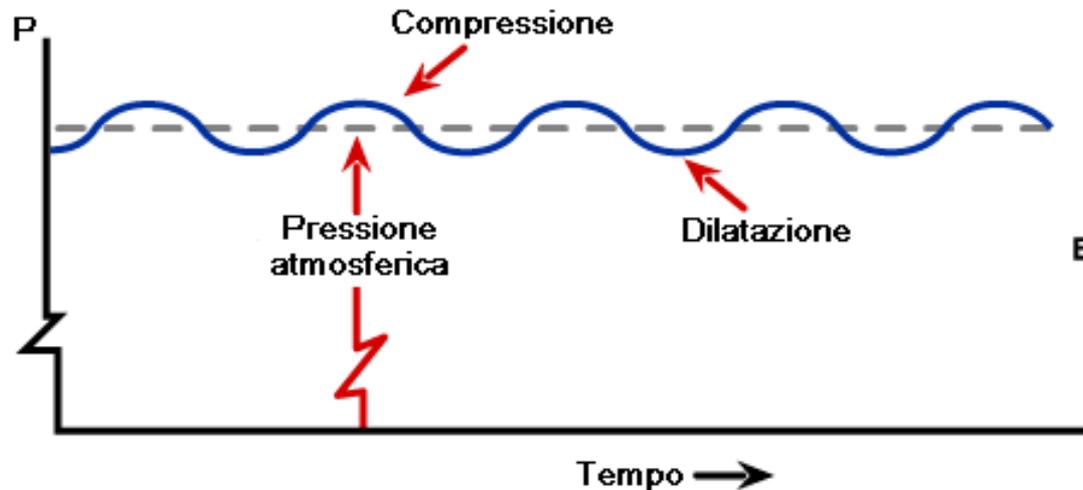
Così facendo, sposta delle particelle d'aria comprimendole prima e dilatandole poi:



Questo procedimento fa sì che le particelle trasmettano l'energia oscillando e non muovendosi fisicamente nella direzione di propagazione del suono.

La propagazione del suono nell'aria

Se l'altoparlante è pilotato da un segnale sinusoidale, la pressione atmosferica nelle sue vicinanze avrà l'andamento descritto dalla figura seguente:



Le proprietà del suono

Le forme d'onda possono arrivare ad essere molto complicate, ma tutte (come vedremo) possono essere considerate un'estensione di una forma d'onda molto semplice: la Sinusoide:

$$y = A \sin(2\pi ft)$$

Le proprietà del suono

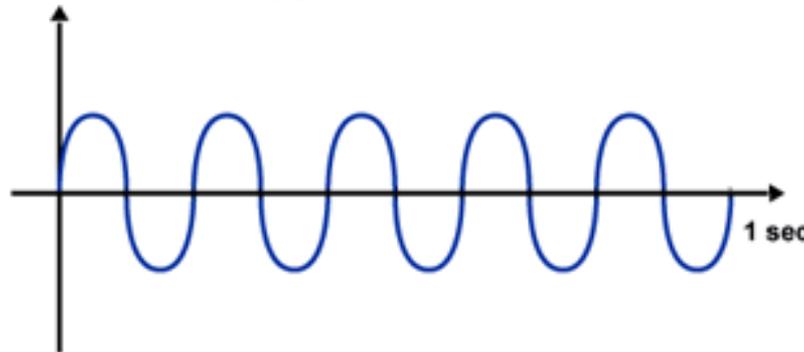
Le proprietà più importanti di una sinusoide sono:

- Frequenza (f)
- Periodo (T)
- Lunghezza d'onda (λ)
- Ampiezza (A)

Le proprietà del suono

Frequenza

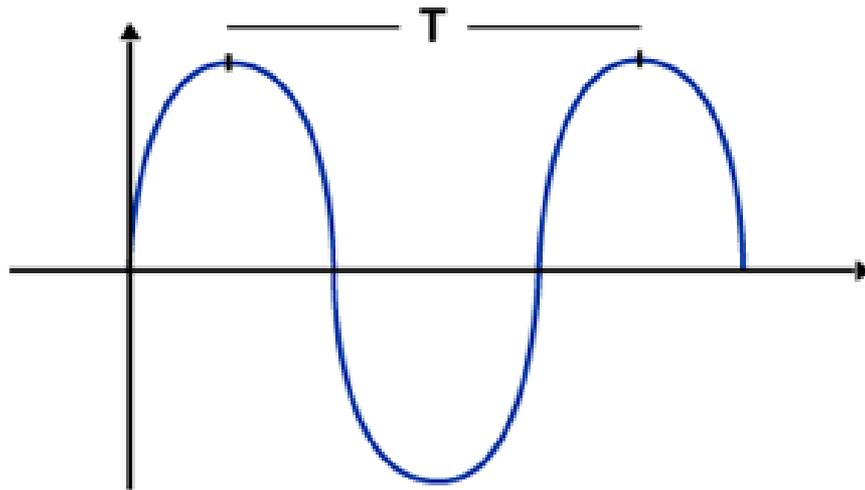
- Numero di cicli che vengono compiuti dall'onda in un secondo.
- Viene misurata in Hertz (Hz) appunto cicli/sec cioè in definitiva $1/\text{sec}$.
- Un'onda di frequenza pari a 1Hz compie un ciclo ogni secondo.



Le proprietà del suono

Periodo

- Tempo impiegato per compiere un ciclo completo.
- Vale la relazione: $T = \frac{1}{f}$



Le proprietà del suono

Lunghezza d'onda

- Distanza tra due punti corrispondenti (per esempio due massimi successivi) lungo la forma d'onda.
- Vale la relazione:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c = velocità del suono nel mezzo che si sta considerando (nell'aria è circa 330 m/sec). Rappresenta lo spazio che un ciclo occupa fisicamente nell'aria e, se l'onda fosse visibile, potrebbe facilmente essere misurato, per esempio, con un metro.

Le proprietà del suono

Lunghezza d'onda

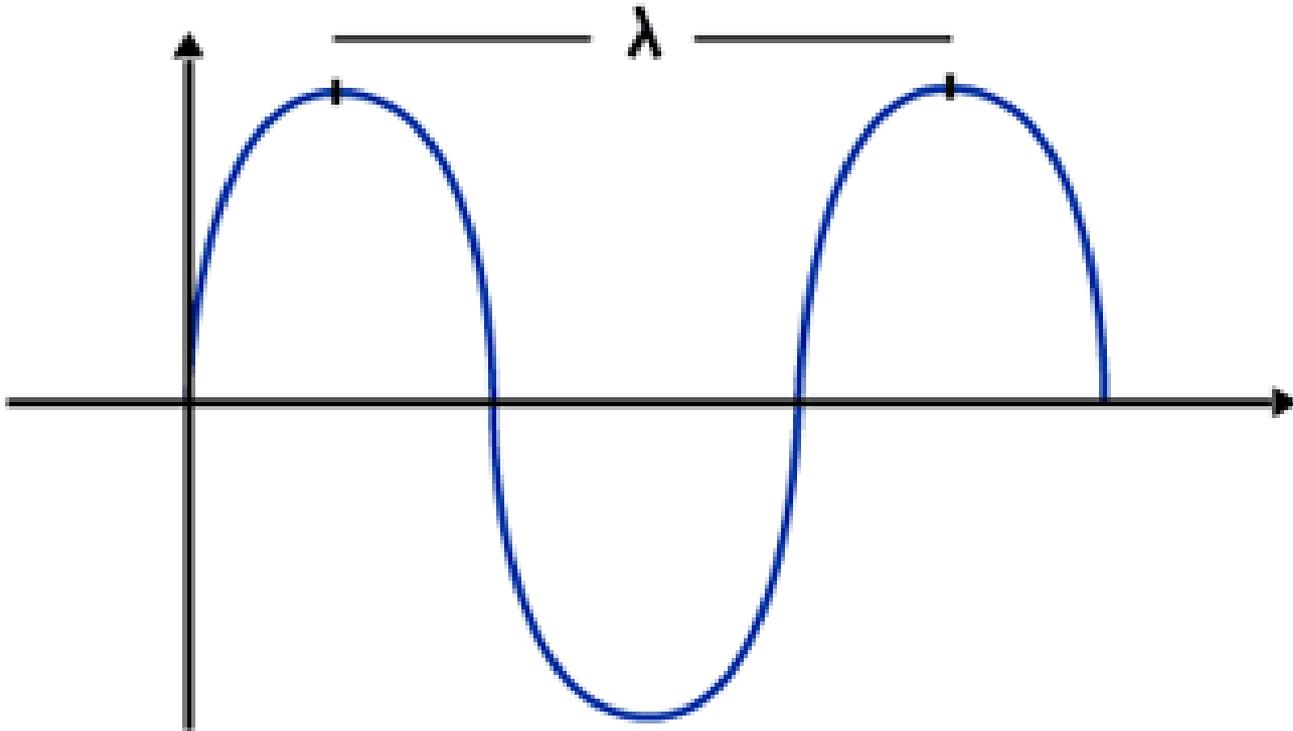
- Considerare un'onda di frequenza 1 Hz che viaggia nell'aria. Si ha:

$$\lambda = \frac{C}{f} = CT = \frac{330m}{sec} \text{sec} = 330m$$

L'orecchio umano comincia a percepire suoni di frequenza superiore ai 20-30Hz (quindi lunghezze d'onda tra 17,2 e 11,5 metri) e fino a circa 20 KHz (cioè lunghezze d'onda di 17,2 mm).

Le proprietà del suono

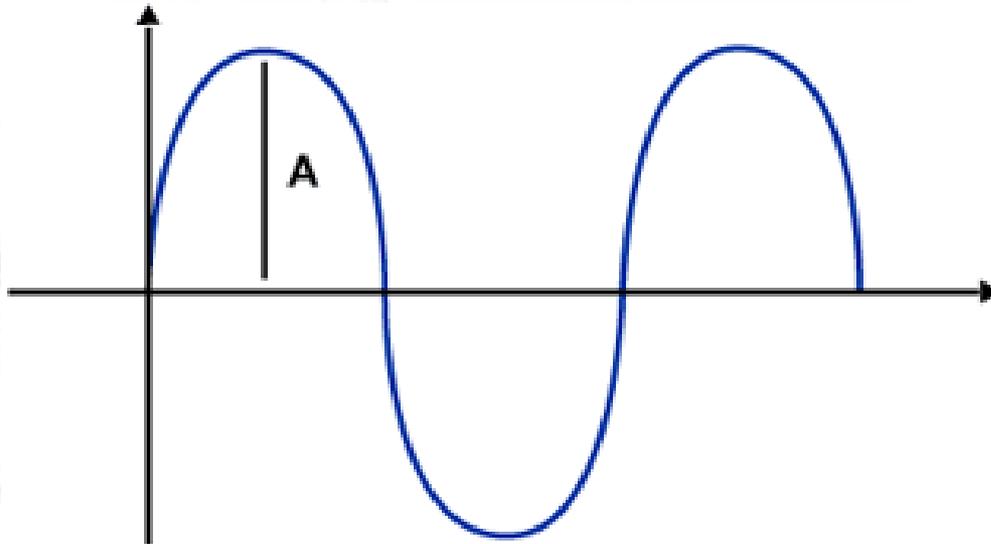
Lunghezza d'onda di una sinusoide



Le proprietà del suono

Ampiezza

- Indica il massimo spostamento dall'asse orizzontale.
- Possiamo considerare l'*ampiezza di picco*:



Le proprietà del suono

Ampiezza

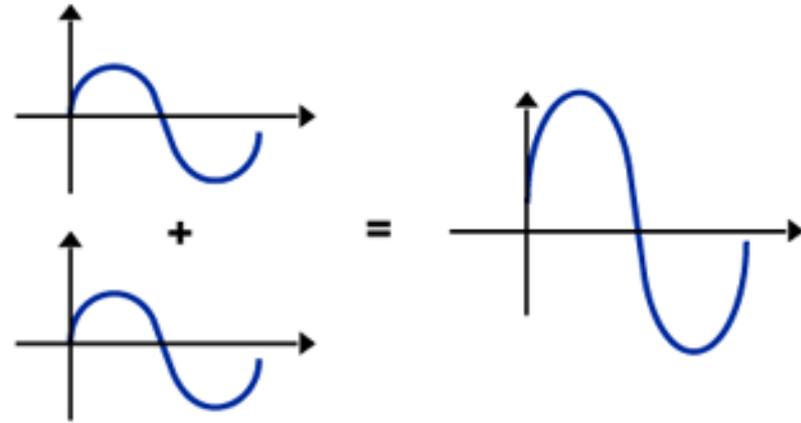
- Sebbene una misura dell'ampiezza, come viene percepita dall'orecchio, è data dall'*ampiezza efficace* (RMS, Root Mean Square) :

$$A_{eff} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

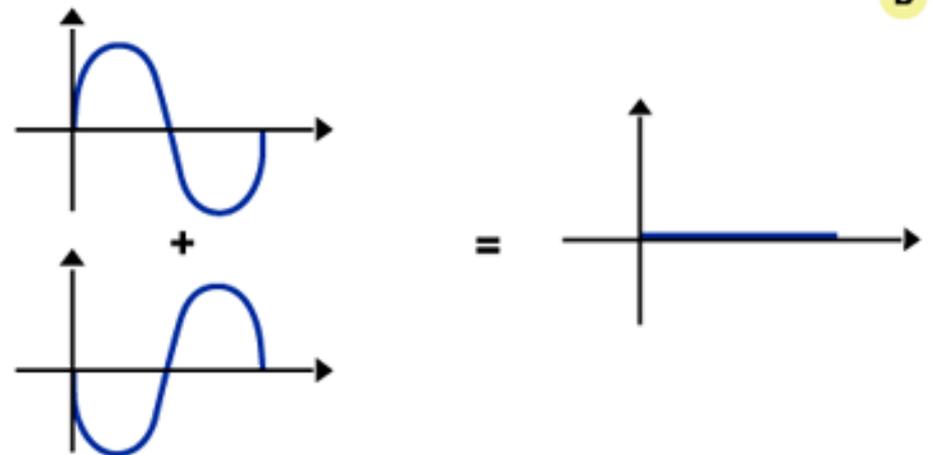
Combinazioni di sinusoidi pure

Prendiamo due forme d'onda in fase (cioè generate da due puntini che girano lungo una circonferenza in senso antiorario, partendo allo stesso istante e procedendo alla stessa velocità) e combiniamole insieme:

Forme d'onda in fase

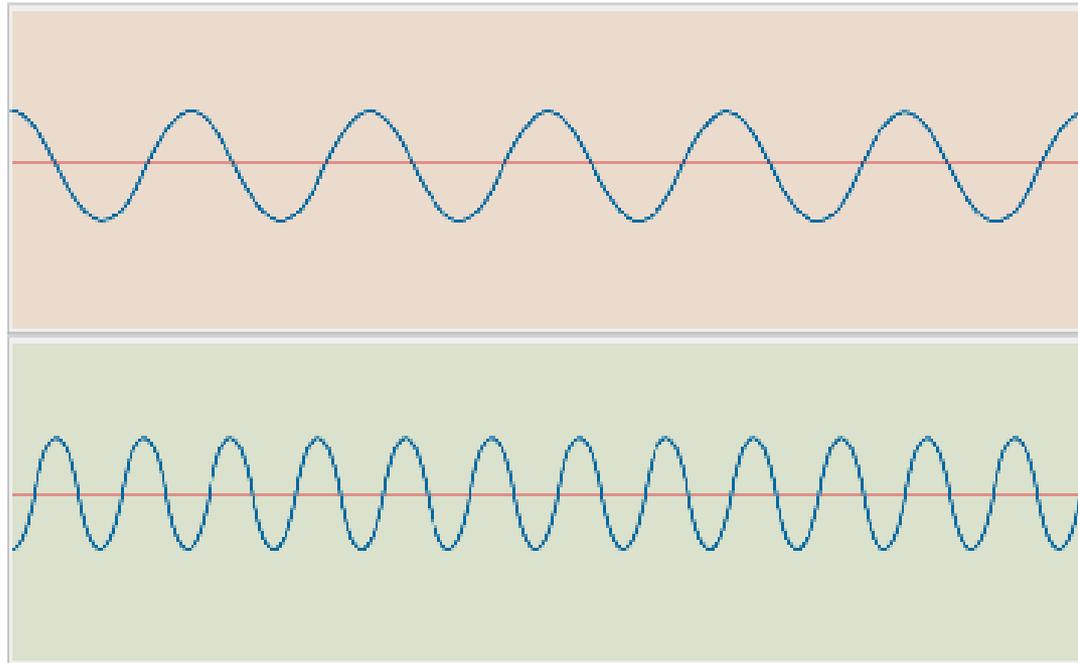


Forme d'onda sfasate di 180°



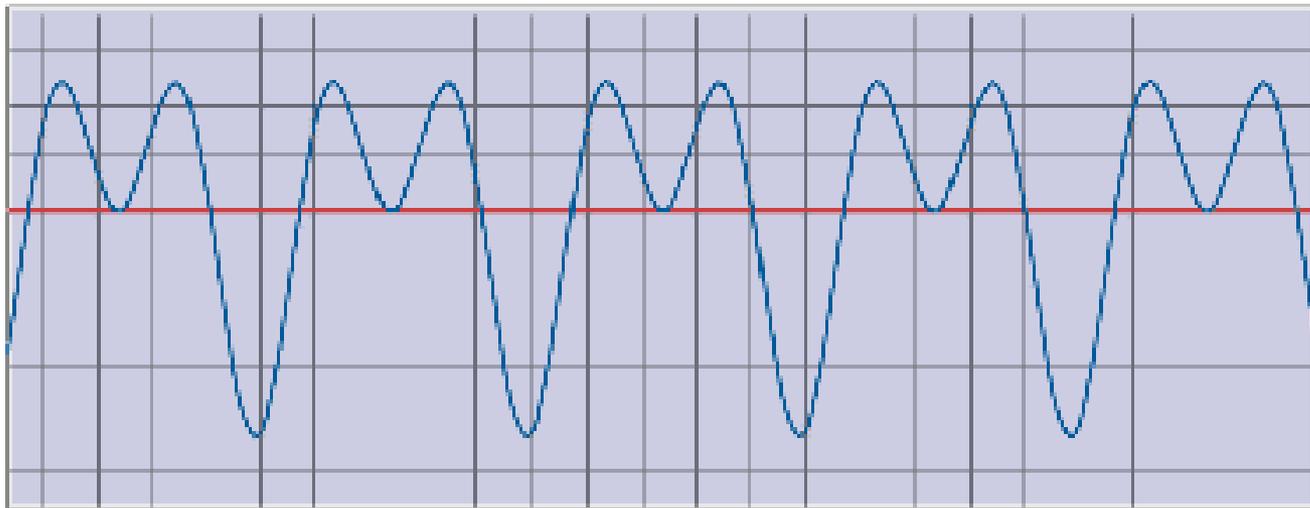
Combinazioni di sinusoidi pure

Complichiamo un po' le cose: consideriamo due forme d'onda sfasate una di 90 gradi e l'altra di 270 con diversa frequenza (una doppia dell'altra):



Combinazioni di sinusoidi pure

Sommando i due suoni precedenti otteniamo un nuovo suono la cui forma d'onda ha l'andamento mostrato nella figura seguente ottenuto come somma delle due sinusoidi componenti:



Rappresentazione ampiezza-frequenza

- Alla rappresentazione di un segnale acustico nel *dominio del tempo* (grafici Ampiezza-Tempo), possiamo far corrispondere una rappresentazione grafica nel *dominio delle frequenze* detta anche *spettro* (grafici Ampiezza-Frequenza).

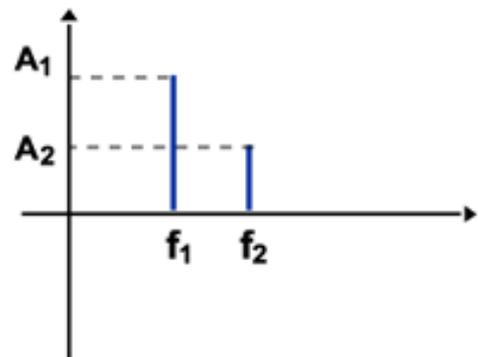
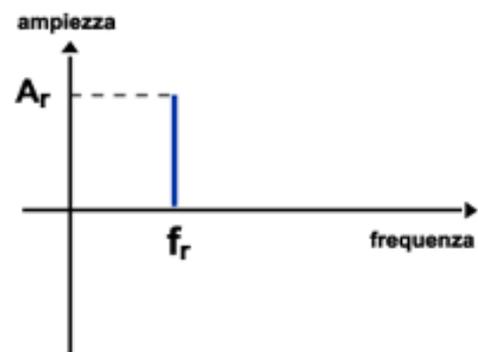
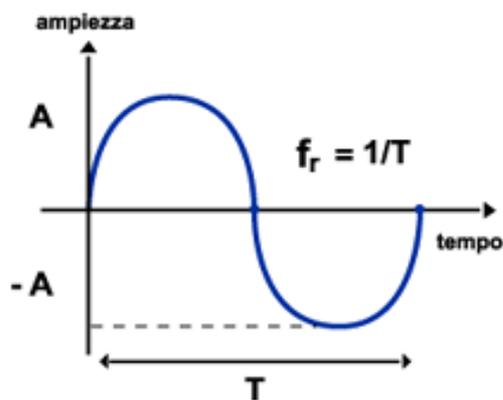
- Nel caso di una sinusoide pura di equazione:

$$y = A \sin(2\pi ft)$$

sia la frequenza f che l'ampiezza A sono costanti.

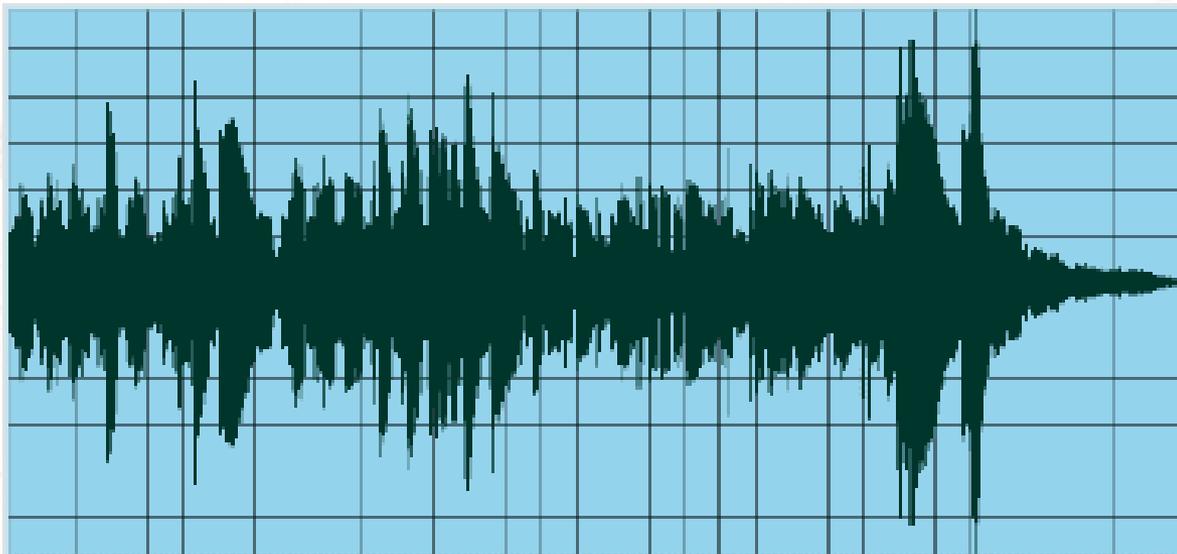
Rappresentazione ampiezza-frequenza

- A partire da quanto affermato e considerando 2 sinusoidi come quelle dell'esempio precedente, ma con ampiezza differente si avrà:



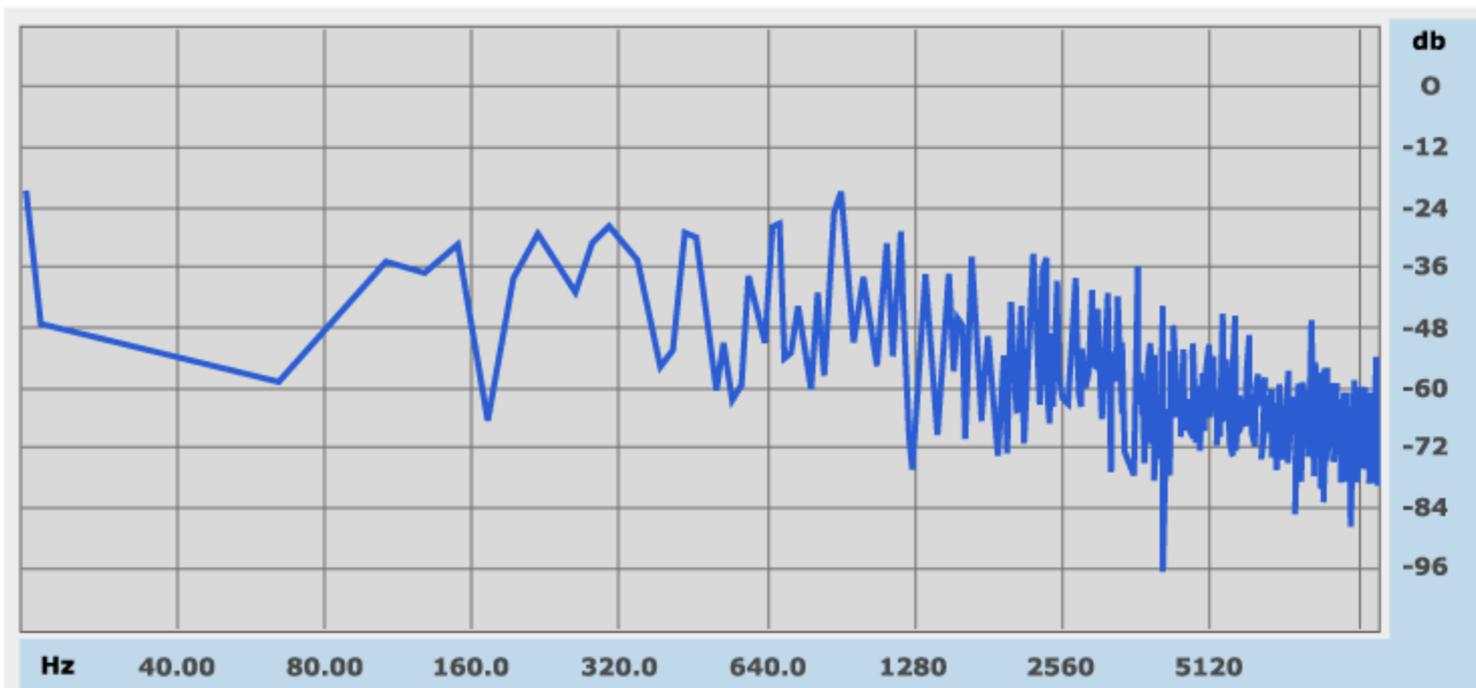
Rappresentazione ampiezza-frequenza

- Ora mettiamo insieme tutte queste cose. Immaginiamo un suono complesso, cioè composto da tutte le sinusoidi da 20Hz a 20KHz (come quello mostrato nella figura seguente):



Rappresentazione ampiezza-frequenza

- Il suo spettro di frequenza varierà continuamente nel tempo e se immaginiamo di “fotografare” lo spettro in un determinato istante, avremo su un diagramma Ampiezza-Frequenza il seguente tipo di grafico:



Contenuto armonico di una forma d'onda

- Il segnale sinusoidale è il tassello fondamentale per mezzo del quale è possibile costruire il resto della realtà sonora.
- Agli inizi del 1800, infatti, il matematico francese Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830) dimostrò analiticamente che un segnale periodico è scomponibile nella somma di infiniti segnali sinusoidali avente ognuno la propria frequenza, la propria fase e la propria ampiezza, determinate da opportune leggi matematiche.

Contenuto armonico di una forma d'onda

Teorema di Fourier

Qualunque segnale periodico $v(t)$ può essere ottenuto mediante la somma di un eventuale termine costante A_0 detto anche *componente continua* e di infinite funzioni sinusoidali le cui frequenze sono multipli interi della frequenza di $v(t)$. Analiticamente:

$$\begin{aligned} v(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) = A_0 + A_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega_0 t + \varphi_2) \\ &+ \dots \end{aligned}$$

Essendo $\omega_0 = 2\pi f_0$ la *pulsazione* del segnale periodico $v(t)$ avente frequenza pari ad f_0 , t il tempo, A_n l'ampiezza dell' n -esima funzione sinusoidale e φ_n la fase iniziale della stessa.

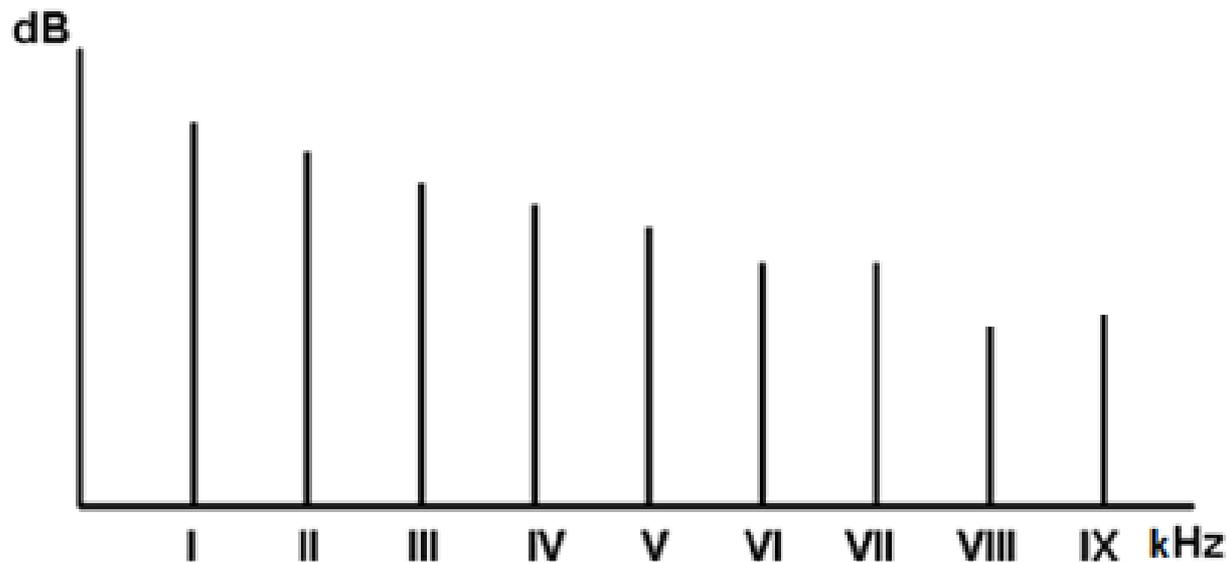
La sinusoide con la stessa frequenza di $v(t)$ è detta *fondamentale*, le sinusoidi di frequenza multipla della fondamentale, *armoniche*. L'ampiezza delle armoniche è decrescente e tendente a zero con il crescere della frequenza.

Contenuto armonico di una forma d'onda

- I valori delle frequenze dei segnali sinusoidali che compongono il segnale periodico, sono multipli interi della frequenza del segnale in esame.
- Quindi, un qualsiasi segnale periodico di frequenza f , sarà composto da segnali sinusoidali di frequenza $f, 2f, 3f, \dots$ detti rispettivamente *fondamentale*, *seconda armonica*, *terza armonica*, etc.

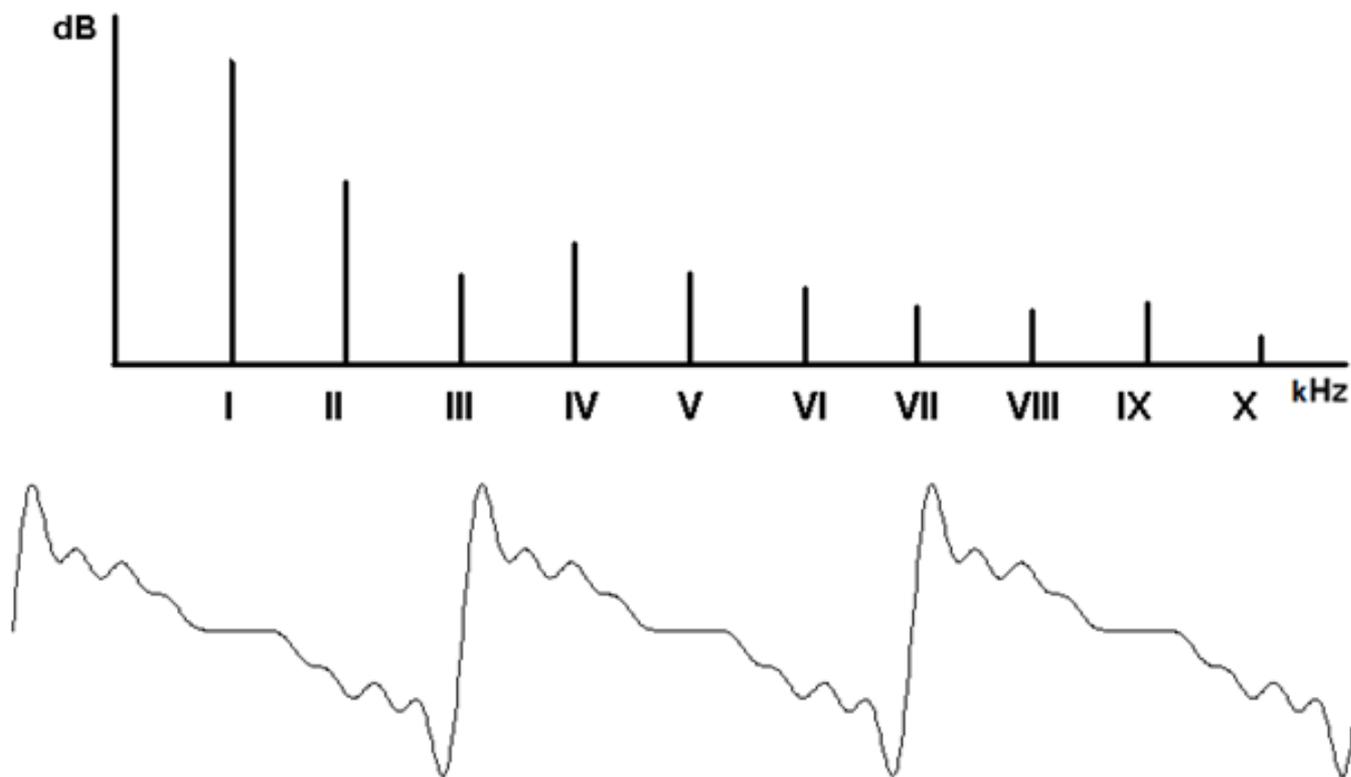
Contenuto armonico di una forma d'onda

- Quello in figura è lo spettro di un suono: sull'asse orizzontale vi sono le frequenze, in kHz, sull'asse verticale le ampiezze in dB. Lo spettro è di tipo armonico, in quanto le frequenze sono equispaziate.



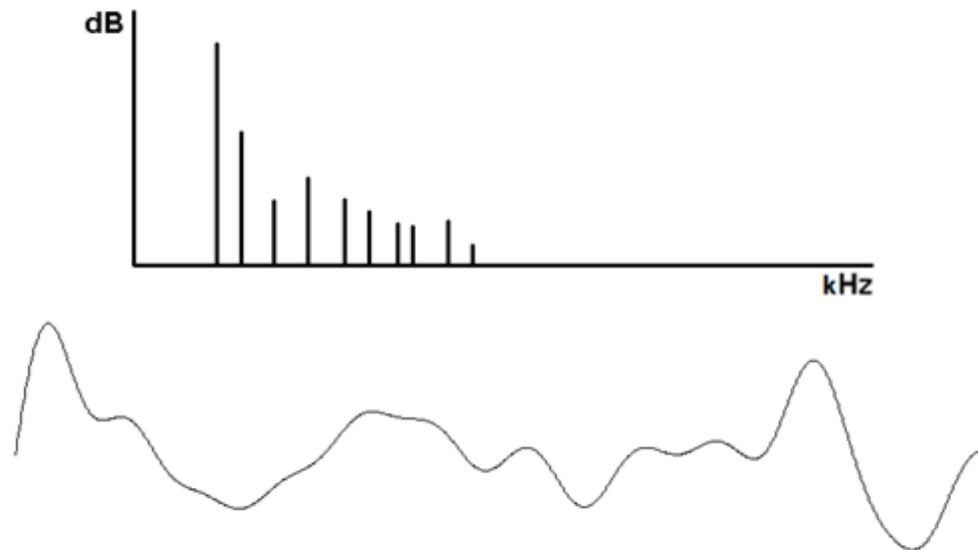
Contenuto armonico di una forma d'onda

- Nella figura seguente è mostrato uno spettro di tipo armonico e l'onda risultante (periodica).



Contenuto armonico di una forma d'onda

- I segnali non periodici sono caratterizzati dall'assenza di una frequenza fondamentale e quindi le componenti sinusoidali non sono correlate armonicamente. In questo caso invece che di armoniche, si parlerà di *parziali non armoniche* e la prima parziale coinciderà con la componente sinusoidale di frequenza minore.



Contenuto armonico di una forma d'onda

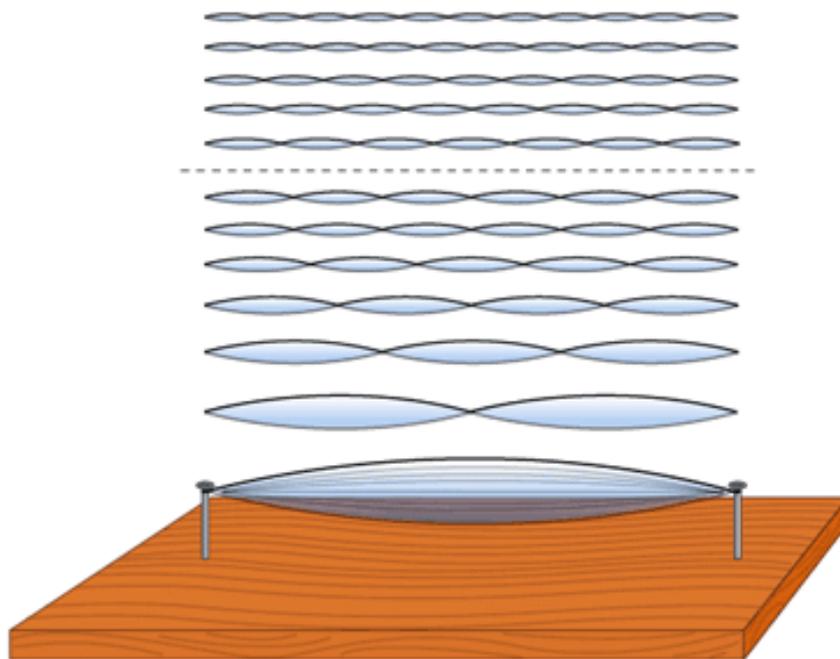
Esempio: quinta corda di chitarra pizzicata (LA)

- La corda oscilla ad una frequenza di 110Hz.
- Ma allora come mai non suona come una semplice sinusoidale di frequenza pari a quella, ma suona con il suono di una chitarra?
- Nel caso del LA vengono generate le sinusoidi:
 - 110 Hz Fondamentale (prima armonica)
 - 220 Hz Seconda Armonica
 - 330 Hz Terza Armonica
 -
 - $n \cdot 110$ Hz n-esima Armonica

Contenuto armonico di una forma d'onda

Esempio: quinta corda di chitarra pizzicata (LA)

- la corda pizzicata dal chitarrista non oscilla solo alla frequenza fondamentale, ma anche alle frequenze armoniche secondo la figura seguente:



Contenuto armonico di una forma d'onda

Esempio: quinta corda di chitarra pizzicata (LA)

- La prima armonica è detta anche fondamentale e caratterizza la nota che effettivamente percepiamo;
- La seconda armonica è ad una frequenza doppia, dunque la seconda armonica è la stessa nota della fondamentale e aggiunge calore al suono;
- La terza armonica non è più un La e dunque contribuisce ad arricchire il suono.

Contenuto armonico di una forma d'onda

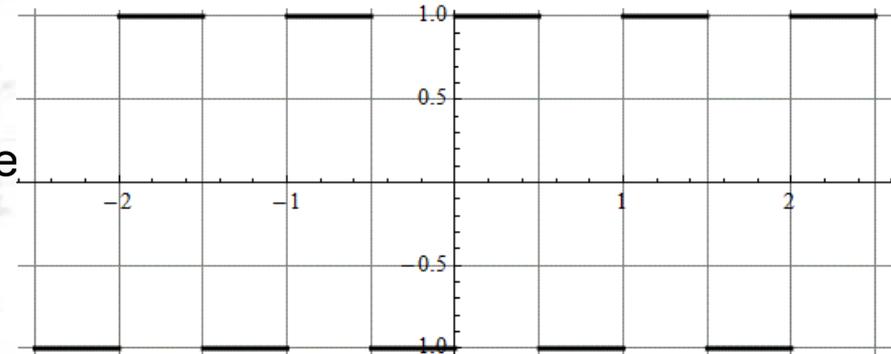
Esempio: quinta corda di chitarra pizzicata (LA)

- Si noti anche come al centro si abbia una prevalenza di basse frequenze mentre ai lati prevalgano le alte.
- In commercio esistono amplificatori per chitarra di tipo valvolare e a transistor. I transistor tendono ad enfatizzare la terza armonica, mentre le valvole enfatizzano la seconda.
- Questo significa che la scelta di un amplificatore influisce in modo sostanziale il timbro del suono prodotto.

Le forme d'onda

Onda quadra

L'onda quadra è un segnale composto dall'alternanza regolare di due valori (i due stati logici 0 e 1 nel caso di segnale digitale, due livelli di tensione nel caso di segnale elettrico e quindi anche audio).



Analiticamente, la funzione onda quadra è definita come segue:

$$y(t) = \begin{cases} -a, & \text{se } -\frac{T}{2} \leq t < 0 \\ a, & \text{se } 0 \leq t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

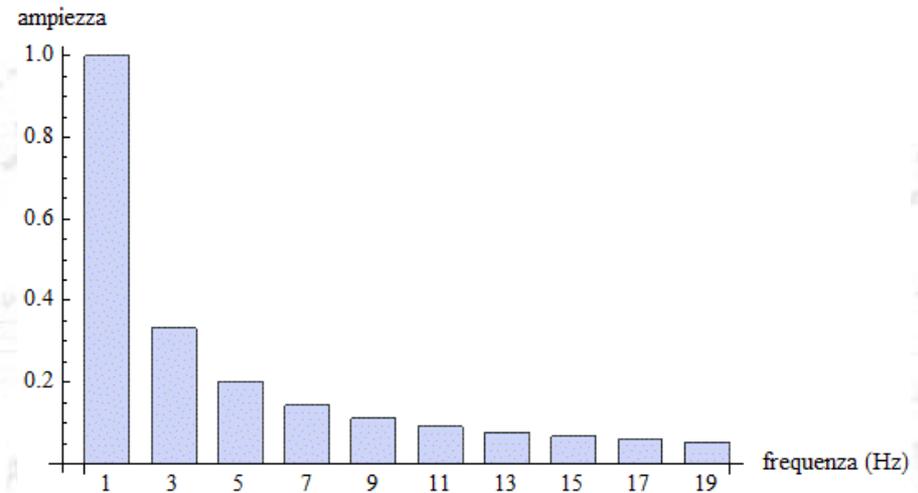
essendo a una costante assegnata e T il periodo. Lo sviluppo di Fourier di un'onda quadra è dato dall'espressione:

$$y(t) = a \sum_{i=0}^{\infty} \frac{4}{(2i+1)\pi} \sin\left(\frac{2\pi(2i+1)}{T}t\right)$$

Le forme d'onda

Onda quadra

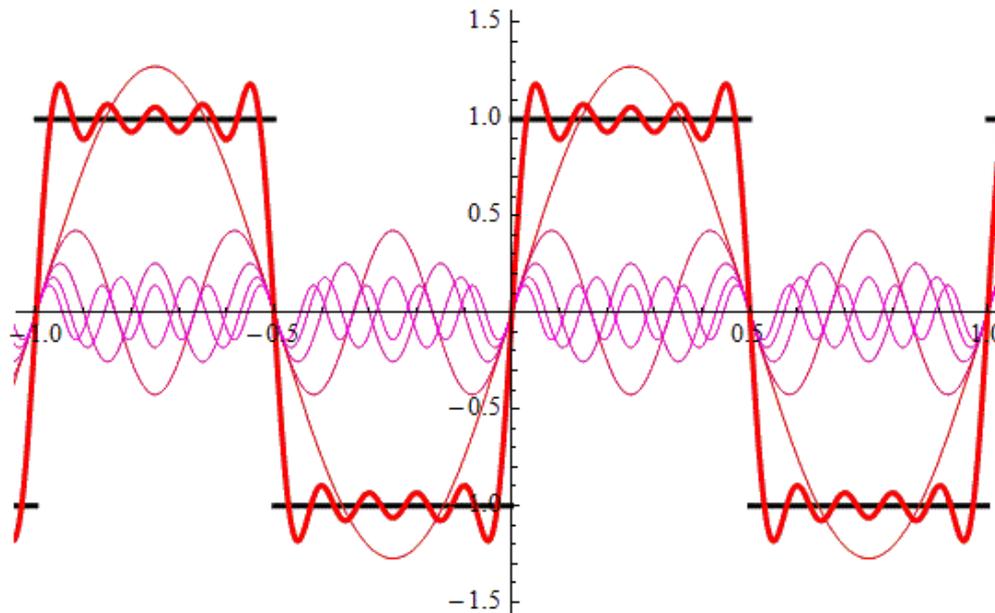
- Il contenuto armonico è composto dalle sole armoniche dispari.
- L'ampiezza decresce con un andamento di tipo $1/n$ rispetto all'ampiezza della fondamentale, essendo n il numero dell'armonica.



Le forme d'onda

Onda quadra

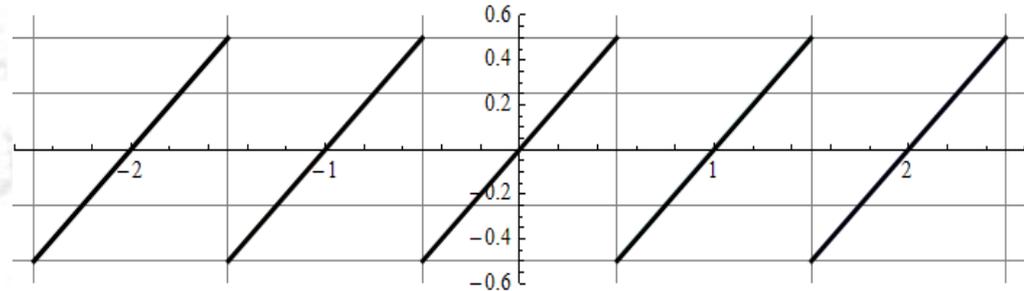
La somma delle armoniche dispari, fino ad un ordine massimo di 20, fornisce la rappresentazione grafica seguente:



Le forme d'onda

Onda a dente di sega

L'onda a dente di sega è un segnale che, per convenzione, cresce linearmente per poi decrescere bruscamente.



Analiticamente, la funzione a dente di sega è definita come segue:

$$y(t) = \frac{a}{T}t \quad \text{con} \quad -\frac{T}{2} \leq t < \frac{T}{2}$$

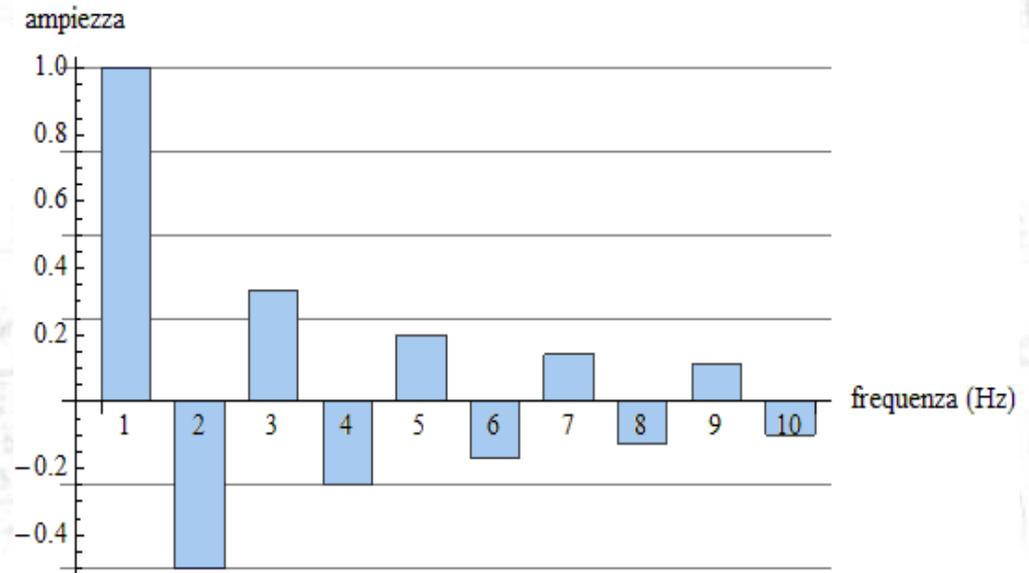
essendo anche in questo caso a una costante assegnata e T il periodo. Lo sviluppo di Fourier di un'onda a dente di sega è dato dall'espressione seguente:

$$y(t) = a \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1}}{i\pi} \sin\left(\frac{2\pi i}{T}t\right)$$

Le forme d'onda

Onda a dente di sega

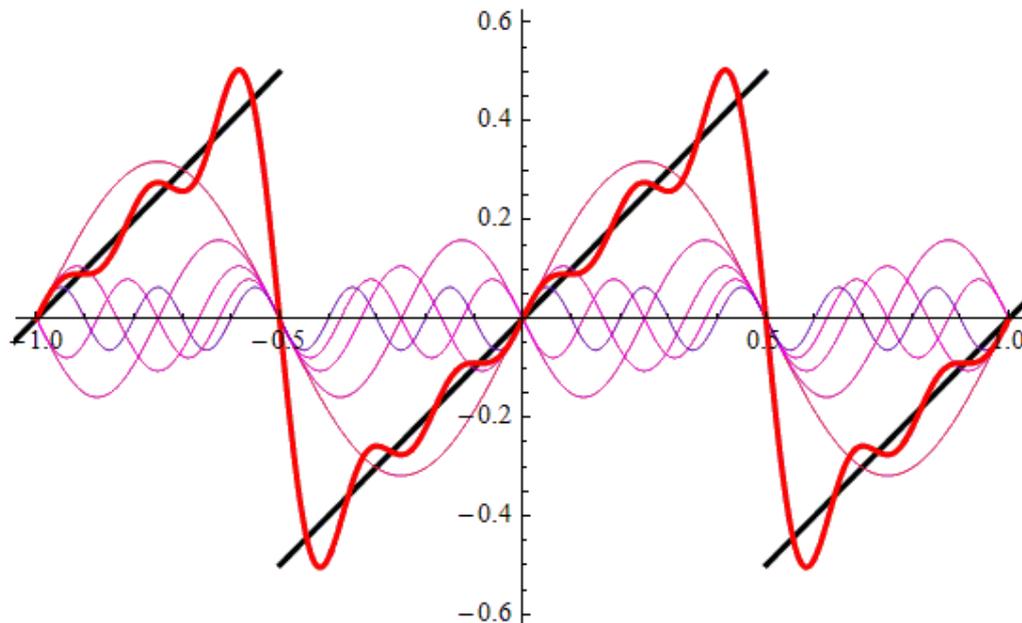
- Sono presenti tutte le armoniche.
- L'ampiezza di ogni armonica ha un andamento decrescente in modulo ancora del tipo $1/n$, ma con segno alterno.



Le forme d'onda

Onda a dente di sega

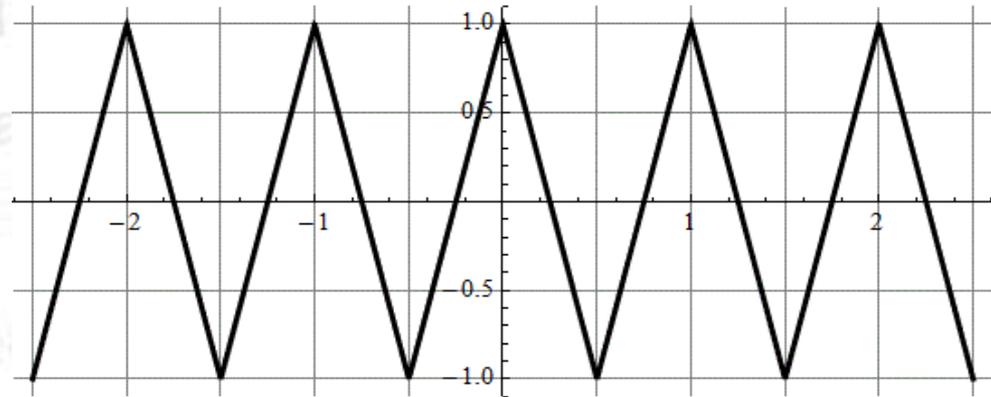
La somma delle armoniche, fino ad un ordine massimo di 20, fornisce la rappresentazione grafica indicata nella figura seguente:



Le forme d'onda

Onda triangolare

Anche l'onda triangolare, come le precedenti, deve il suo nome all'andamento del grafico ampiezza-tempo che si presenta come nella figura seguente:



Analiticamente, la funzione per un'onda triangolare è definita come segue:

$$y(t) = \begin{cases} a \left(1 + \frac{4}{T} t \right), & \text{se } -\frac{T}{2} \leq t < 0 \\ a \left(1 - \frac{4}{T} t \right), & \text{se } 0 \leq t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

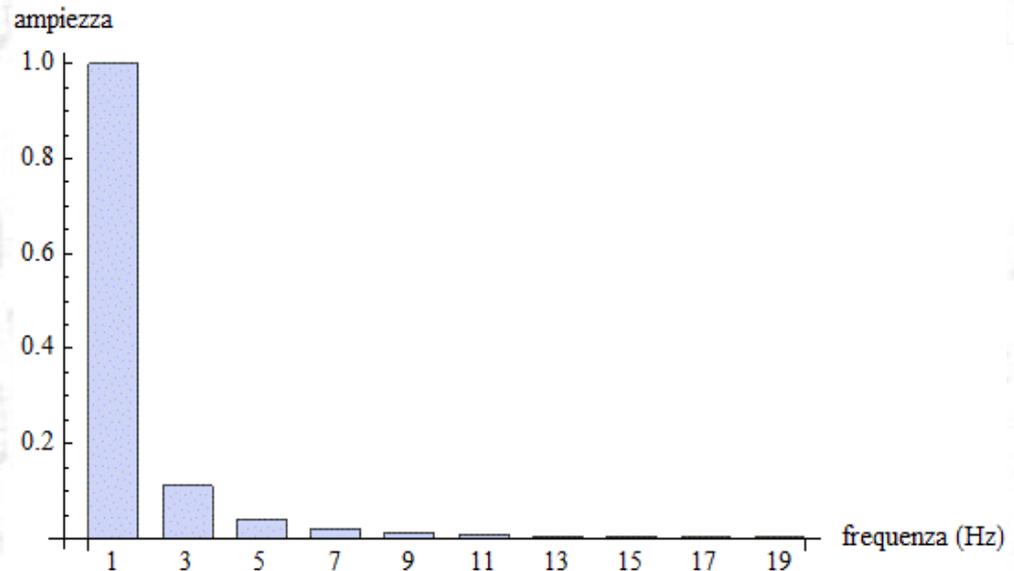
essendo ancora una volta a una costante assegnata e T il periodo. Lo sviluppo di Fourier di un'onda triangolare è dato dall'espressione seguente:

$$y(t) = a \sum_{i=0}^{\infty} \frac{8}{(2i+1)^2 \pi^2} \cos \left(\frac{2\pi(2i+1)}{T} t \right)$$

Le forme d'onda

Onda triangolare

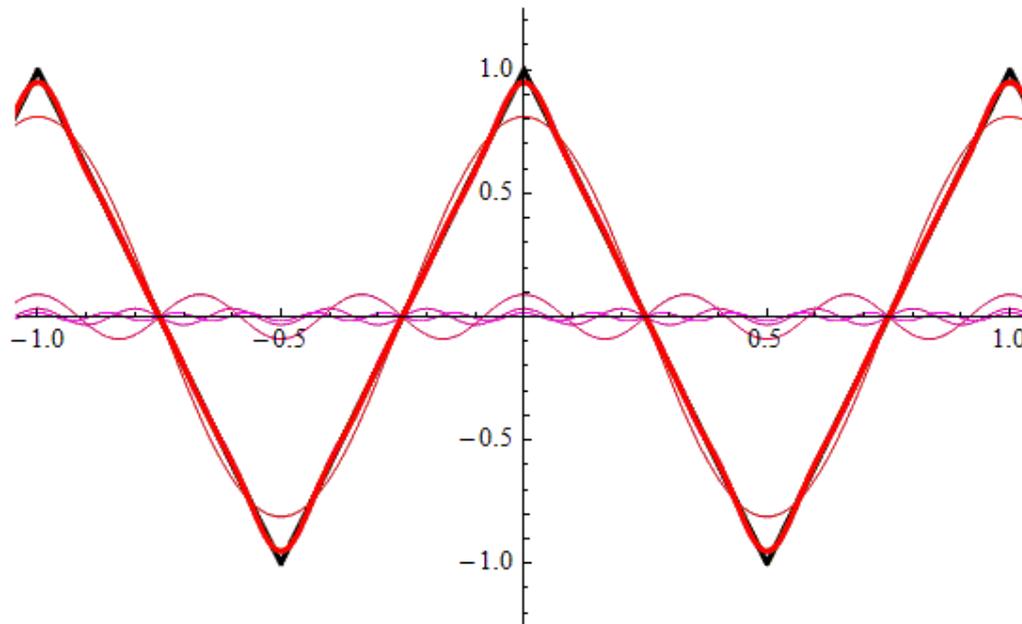
- Il contributo è dato solo dalle armoniche dispari.
- le ampiezze di tali armoniche decrescono con un andamento del tipo $1/n^2$.



Le forme d'onda

Onda triangolare

La rappresentazione grafica che si ottiene, come approssimazione dell'onda triangolare, sommando insieme le armoniche fino ad un ordine massimo pari a 10, è indicata nella figura seguente:

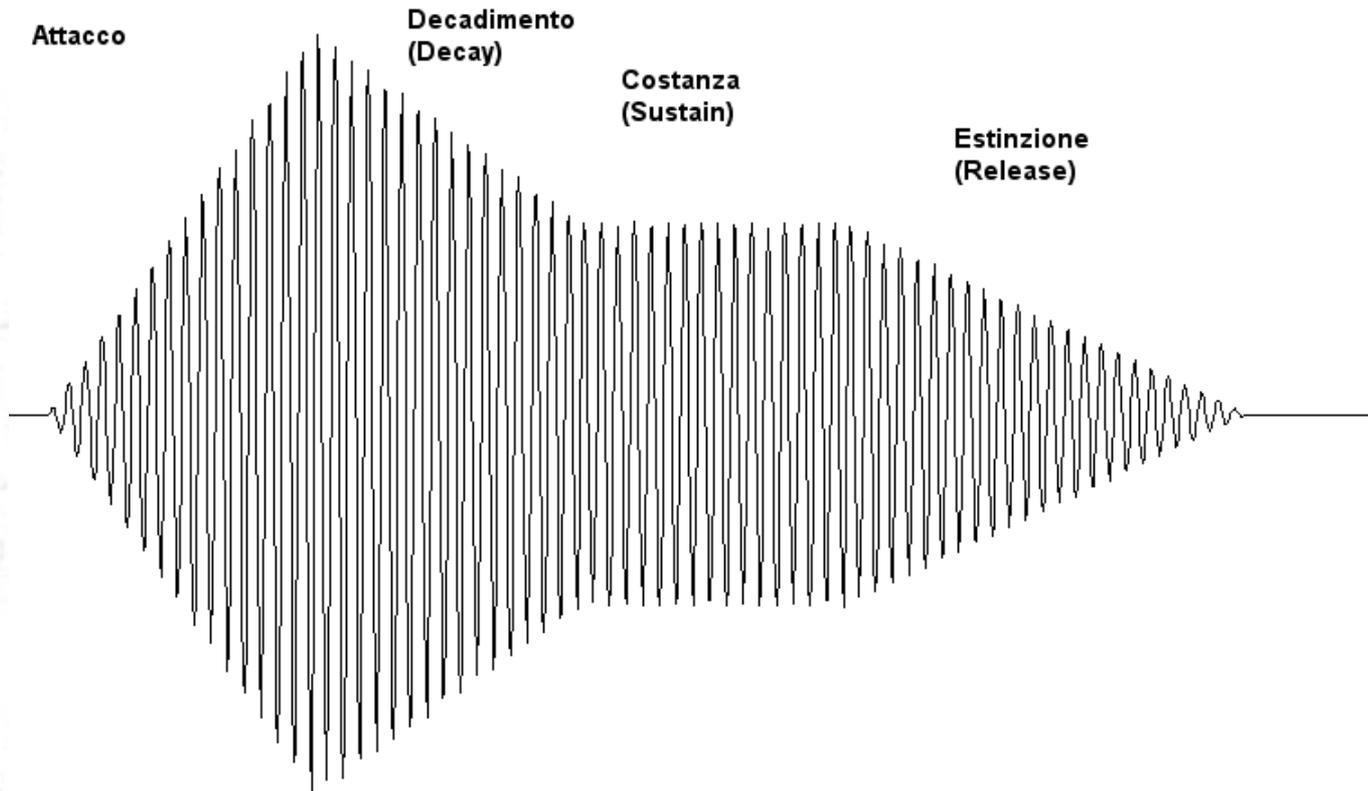


Inviluppo del suono

- Qualsiasi fenomeno in cui sia in gioco una certa quantità di energia, non può passare bruscamente da uno stato energetico a un altro.
- Per tale motivo un suono non può passare improvvisamente dal silenzio alla massima ampiezza.

Inviluppo del suono

In figura è mostrato l'andamento tipico di un suono strumentale:



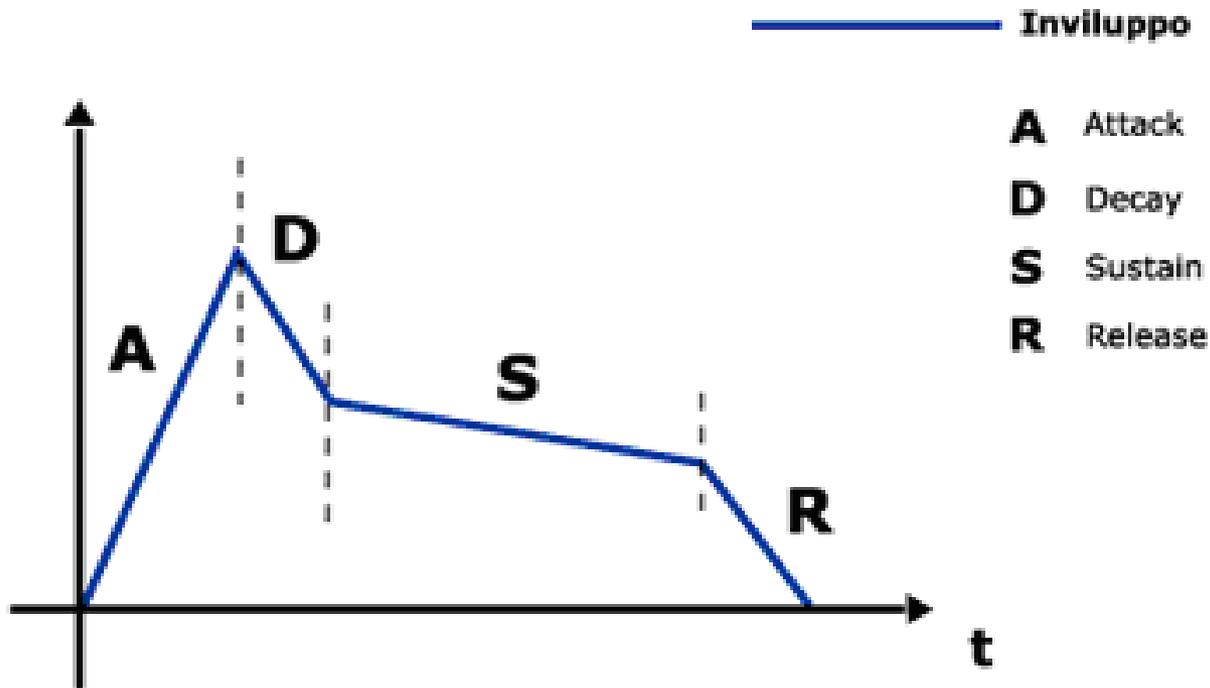
Inviluppo del suono

Il fenomeno è stato diviso in quattro fasi fondamentali:

- *attack*: fase in cui l'ampiezza varia più o meno rapidamente da zero al valore massimo;
- *decay*: dopo l'attacco, parte dell'energia iniziale viene persa e l'ampiezza diminuisce fino a un certo livello;
- *Sustain*: in cui l'ampiezza mantiene un livello quasi costante per un certo periodo di tempo;
- *release*: in cui l'ampiezza gradualmente diminuisce fino a zero.

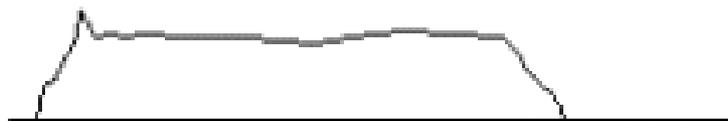
Inviluppo del suono

L'andamento dell'ampiezza di picco (cioè quella linea ideale che congiunge i picchi positivi) si chiama inviluppo dell'onda.



Inviluppo del suono

Nelle figure seguenti, sono schematizzati alcuni andamenti caratteristici dei transitori di ampiezza di alcuni strumenti musicali:



Flauto



Tromba



Pianoforte



Pianoforte smorzato

Inviluppo del suono

Nelle figure seguenti, sono schematizzati alcuni andamenti caratteristici dei transitori di ampiezza di alcuni strumenti musicali:



Violino



Organo



Contrabbasso



Wood-blocks

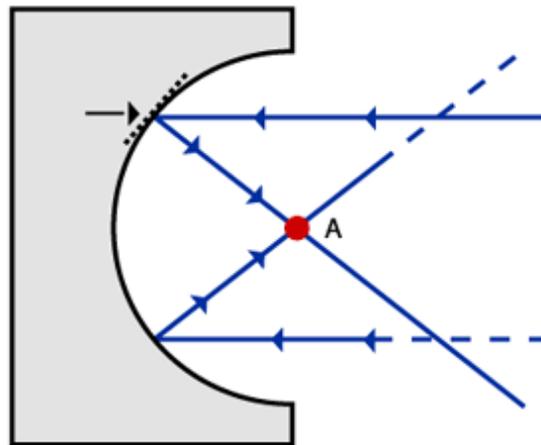
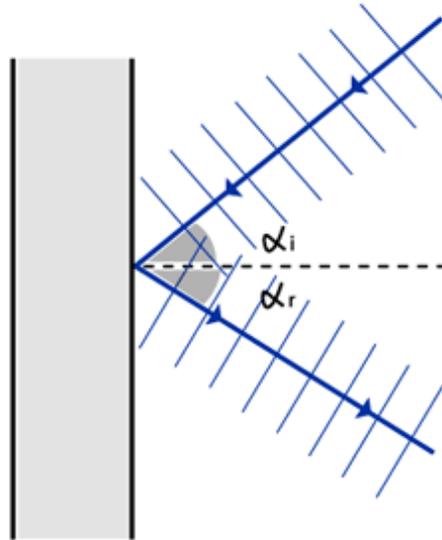
Comportamento del suono

- I suoni che percepiamo non ci giungono così come sono stati emessi dalla sorgente sonora, ma vengono sempre, in misura maggiore o minore, modificati dall'ambiente in cui ci troviamo.
- Qualunque superficie, infatti, riflette almeno una parte dell'energia sonora che vi arriva, e una parte di questa energia riflessa ritorna al nostro orecchio. Se poi, come di solito avviene, ci troviamo in un ambiente chiuso, le superfici riflettenti saranno più di una, tipicamente sei.

Comportamento del suono

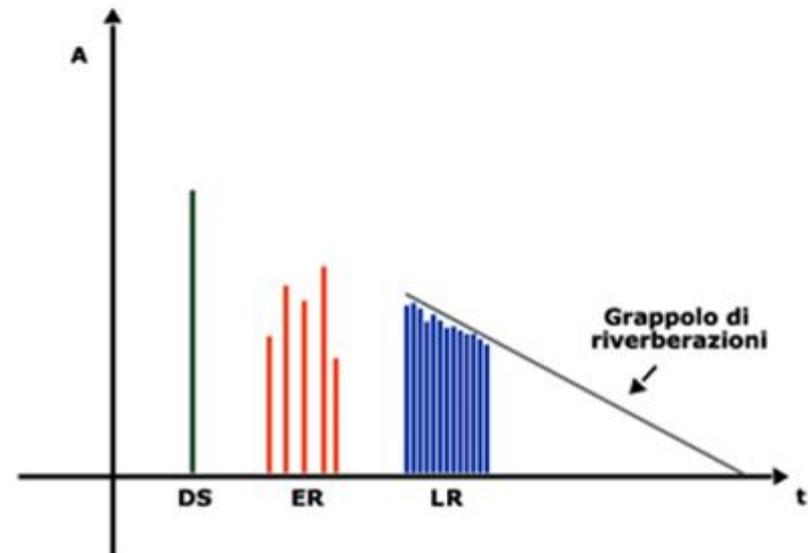
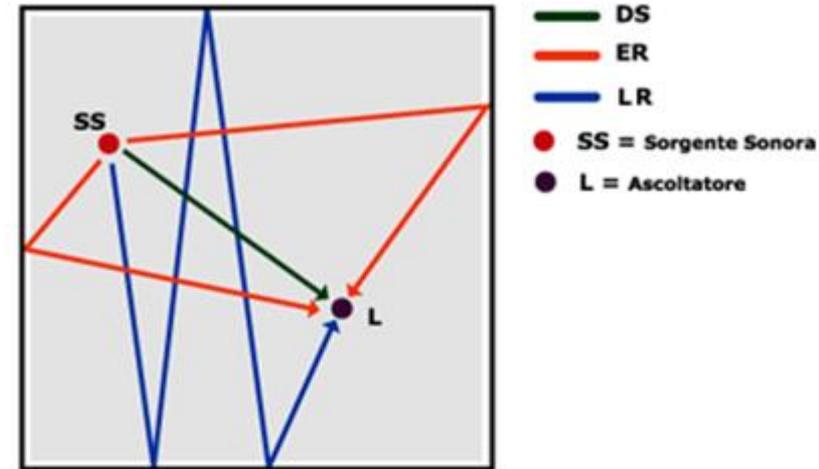
- I comportamenti che verranno presi in esame, valgono per le onde in generale, anche se noi le contestualizzeremo all'ambito del suono. Analizzeremo nell'ordine:
 - Riflessione;
 - Diffrazione;
 - Rifrazione;
 - Assorbimento;
 - Interferenza e Battimento.

Riflessione



Riflessione

- Quando un suono si propaga in una stanza, raggiunge l'ascoltatore in diversi modi (diretto, per riflessione primaria o secondaria).



Rifrazione

- Con tale termine si indica il fenomeno secondo il quale un'onda che attraversa due mezzi di diversa densità cambia direzione.

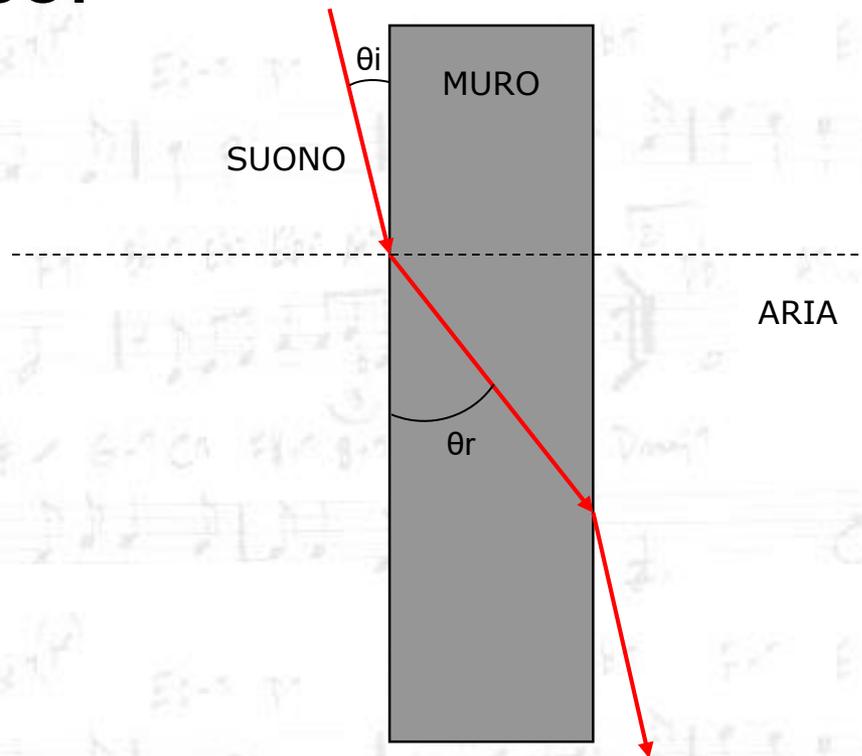
Leggi della rifrazione

1) Il raggio incidente (θ_i) ed il raggio rifratto (θ_r) sono complanari.

2)
$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_i}{v_r} = k$$

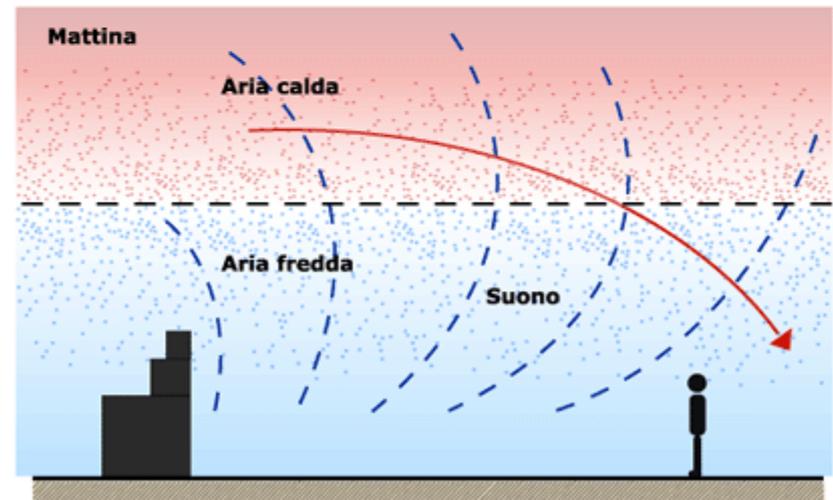
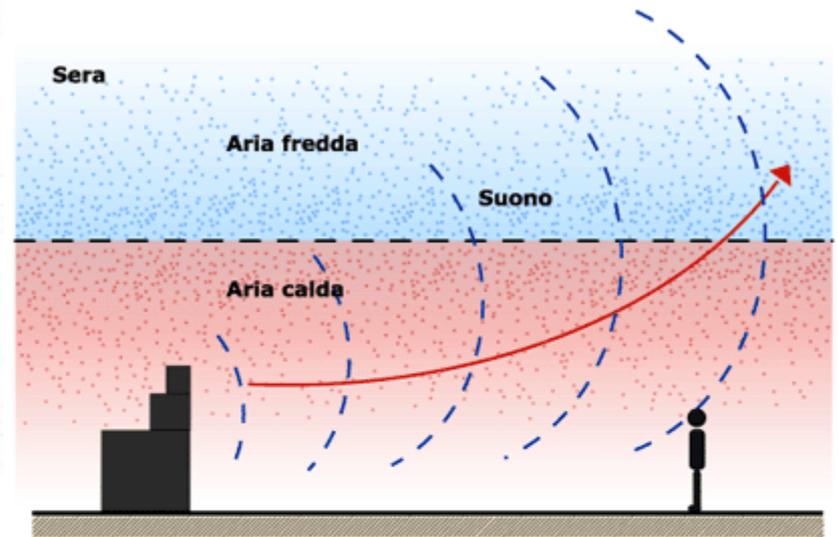
Rifrazione

- La figura si riferisce al caso in cui l'onda passa da un mezzo meno denso ad uno più denso.



Rifrazione

- In figura si vede come questo fenomeno diventi rilevante nel caso di concerti all'aperto, dove le condizioni cambiano radicalmente dalla mattina alla sera, modificando la propagazione del suono nell'ambiente.



Diffrazione

- Se la lunghezza d'onda sonora è confrontabile con quella dell'ostacolo incontrato durante la sua propagazione, si origina il fenomeno della diffrazione.
- I fenomeni di diffrazione consentono di ascoltare suoni che provengono da dietro un angolo, o una parete.
- Ad esempio, stando in una stanza, siamo in grado di sentire una persona che parla nel corridoio vicino. Questo avviene, quindi, perché la lunghezza d'onda del suono emesso dalla voce umana è dello stesso ordine di grandezza degli ostacoli che incontra sul suo cammino.

Diffrazione

- Osserviamo che nel punto in cui l'onda incontra l'ostacolo, si generano onde sferiche che si propagano in tutte le direzioni permettendo al suono di giungere in punti che si trovano dietro l'ostacolo.

Assorbimento

- Può essere descritto come la conversione di energia acustica in energia termica da parte di una superficie.
- In altre parole, quando un suono viene a contatto con un ostacolo, gli trasferisce energia che viene dissipata sotto forma di calore.

Assorbimento

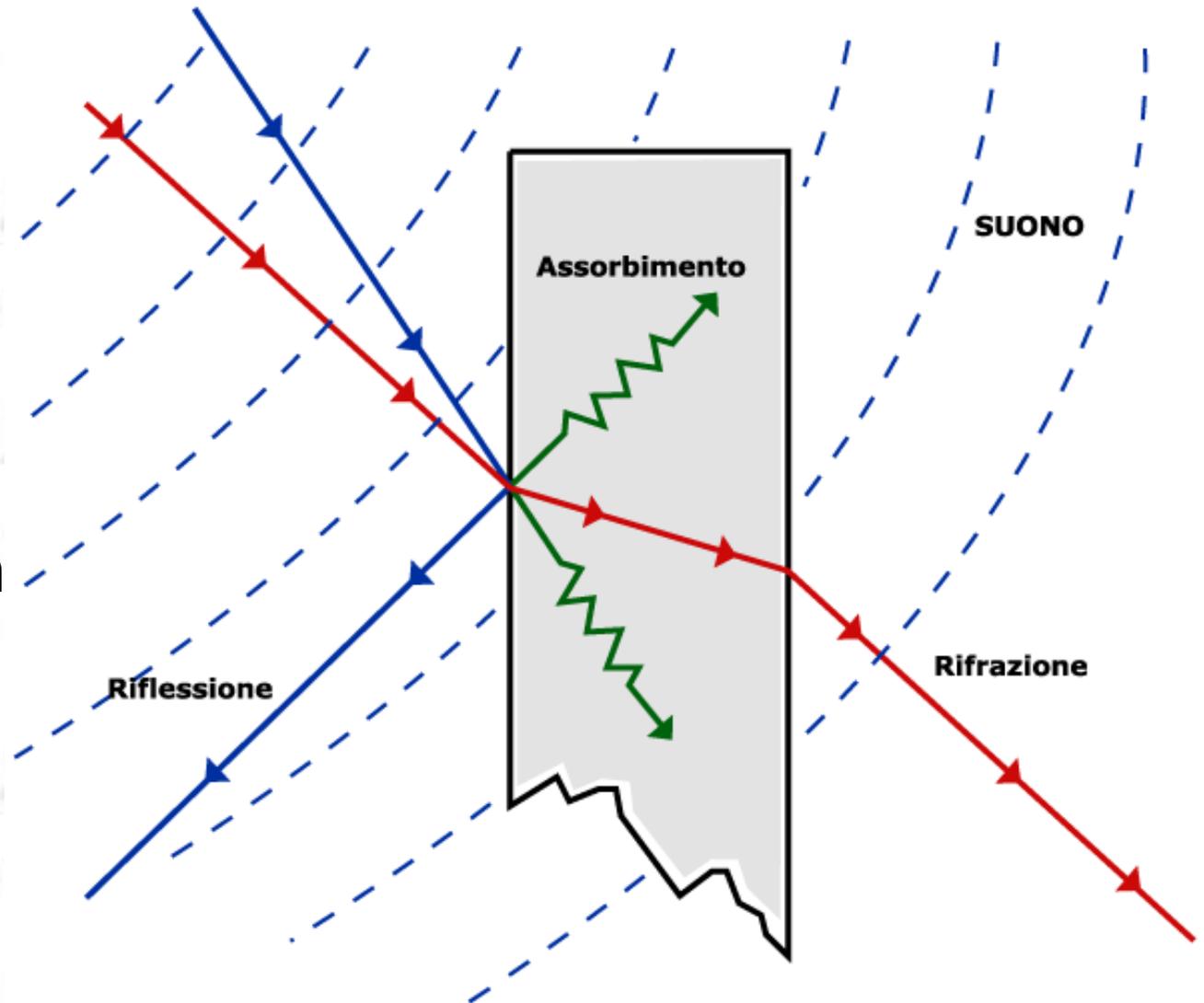
- Le proprietà assorbenti dei materiali sono quantificate attraverso il *coefficiente di assorbimento acustico* α , il quale è definito come rapporto tra la potenza sonora assorbita e la potenza sonora incidente.
- Il valore di α , quindi, rappresenta la frazione di energia sonora assorbita da un determinato materiale e può variare tra 0 (nel caso in cui l'energia incidente venga totalmente riflessa) ad 1 (nel caso in cui tutta l'energia incidente venga assorbita).

Assorbimento

- Questo significa che un valore di α pari a 0.4 indica che il 40% dell'energia incidente una data superficie viene assorbita dal materiale di cui è costituita la superficie stessa.

Riassumendo

- In generale questi quattro fenomeni sono tutti presenti nel momento in cui un'onda sonora incontra un ostacolo.



Interferenza e Battimento

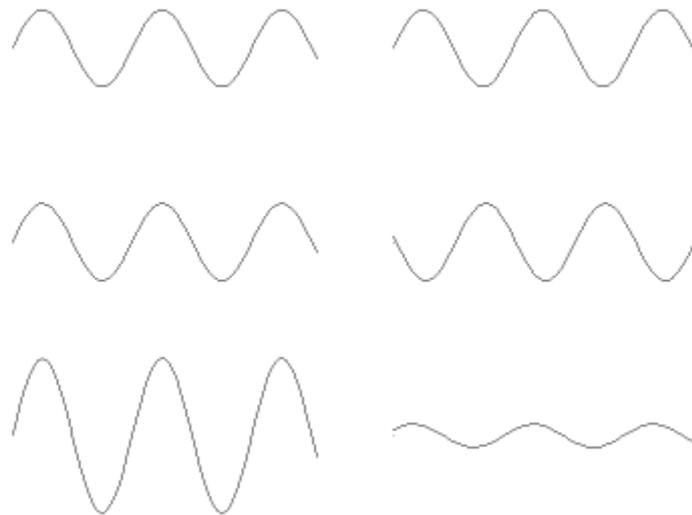
- Abbiamo già visto in precedenza che istante per istante, i valori istantanei dell'ampiezza delle diverse onde si sommano algebricamente.
- Quando in un punto dello spazio due onde della stessa frequenza si sovrappongono (si sommano), si ha il fenomeno dell'interferenza.

Interferenza e Battimento

- Quindi se due onde hanno la stessa frequenza, l'ampiezza risultante dalla loro somma sarà data dalla somma delle singole ampiezze.
- Questo è però vero se le due onde sono in fase, cioè se i loro picchi positivi coincidono.

Interferenza e Battimento

- Se le due onde non sono in fase, picchi positivi e picchi negativi non coincidono più e quindi l'ampiezza massima andrà calcolata sommando, punto per punto, le ampiezze istantanee delle due onde:

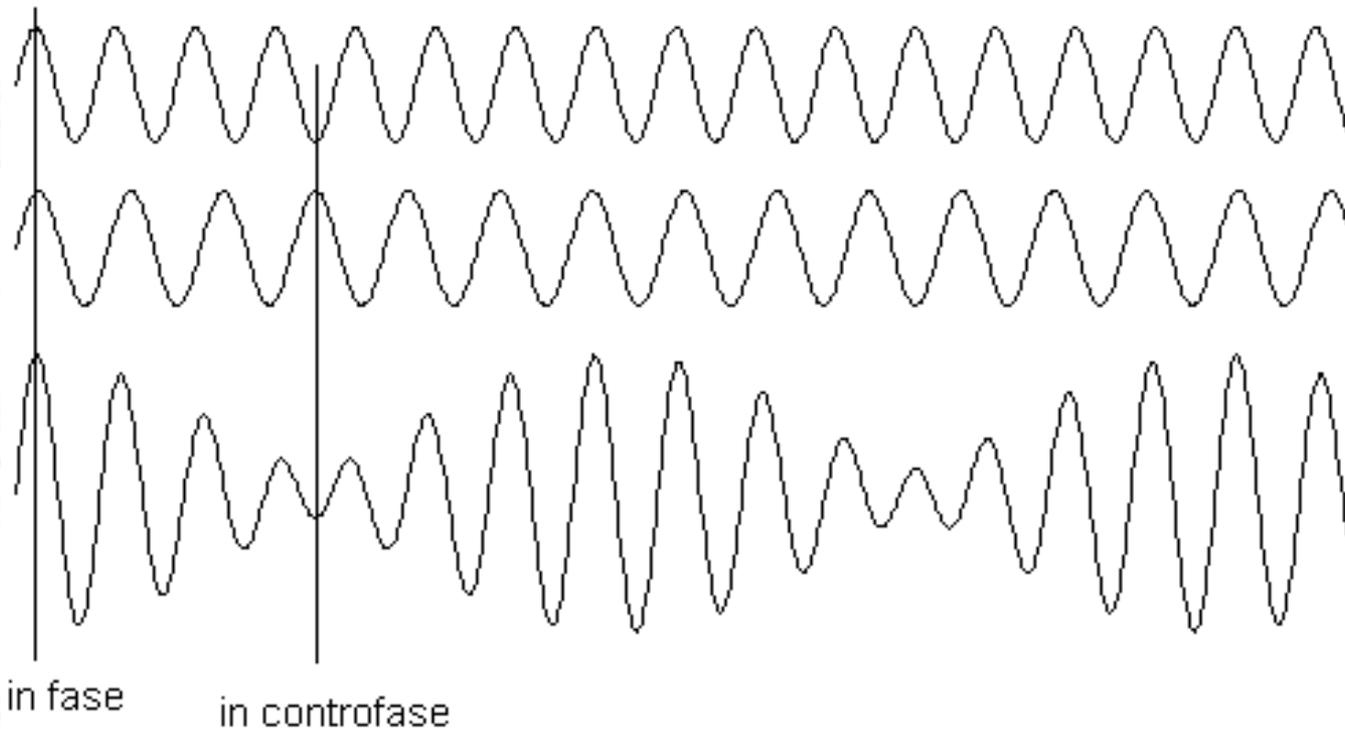


Interferenza e Battimento

- Se poi le due onde sono sfasate di un semiperiodo (sono, come si dice, in controfase), allora l'ampiezza dell'onda risultante sarà data dalla differenza delle ampiezze massime delle due onde.
- Al limite, se le due onde sono in controfase e le loro ampiezze sono uguali, come detto, la loro somma sarà nulla, in quanto le due onde si annulleranno reciprocamente.

Interferenza e Battimento

- Consideriamo invece la somma di due onde di frequenza poco diversa, come nella figura seguente:



Interferenza e Battimento

- Supponiamo che inizialmente le due onde siano in fase. Dopo un certo numero di periodi, a causa della lieve differenza di frequenza, si troveranno in controfase e le ampiezze si sottrarranno.
- Dopo un certo altro numero di periodi le onde saranno di nuovo in fase, e così via.

Interferenza e Battimento

- Il risultato sarà una oscillazione dell'ampiezza dell'onda risultante e questa oscillazione avrà frequenza pari alla differenza di frequenza delle due onde che lo provocano. Questo fenomeno si chiama battimento.
- Se la differenza di frequenza è superiore alla minima frequenza udibile (circa 20-30 Hz), in certe condizioni la frequenza di battimento diviene udibile, e dà luogo al cosiddetto suono differenziale o terzo suono di Tartini.

Elementi di psicoacustica

- Quanto detto fin qua è incentrato in buona sostanza sugli aspetti fisici dell'acustica.
- Ma mentre i meccanismi per i quali le vibrazioni acustiche vengono tradotte in impulsi nervosi sono noti, non altrettanto si può dire dei meccanismi che trasformano tali impulsi in sensazioni coscienti.

Elementi di psicoacustica

- Pensiamo, ad esempio, all'esperienza "quotidiana" del non sentire un suono che in un dato momento non interessa.
- Basta questo a far capire come le informazioni acustiche vengano filtrate, selezionate e modificate dal cervello.
- Il campo di indagine che si riferisce al comportamento dei meccanismi fisiologici e psicologici che intervengono nella percezione uditiva, prende il nome di *psicoacustica*.

Elementi di psicoacustica

Il dominio della psicoacustica si può suddividere in due diversi campi di applicazione:

- la capacità dell'udito di valutare le caratteristiche fisiche dei suoni;
- quella di coglierne le variazioni.

Elementi di psicoacustica

- Sia in un caso, che nell'altro è importante il concetto di *soglia*:

In psicologia per soglia, in genere, si intende il valore minimo di intensità di stimolazione necessaria affinché si verifichi una certa risposta psicologica.

Elementi di psicoacustica

- Come in tutti i fenomeni dell'ambito psicologico, i valori ottenuti dai rilevamenti sperimentali hanno significato statistico.
- Si tratta quindi della media delle risposte di un "gruppo di ascolto" costituito da un certo numero di soggetti scelti con il criterio della omogeneità (soprattutto riguardo l'età) e posti nelle medesime condizioni sperimentali.
- Di solito, nelle ricerche di psicoacustica vengono utilizzati suoni puri, chiamati toni, e rumori opportunamente calibrati, come il rumore bianco.

Percezione dei parametri caratteristici

Le caratteristiche di un suono periodico dipendono principalmente da tre parametri:

- Frequenza;
- Ampiezza;
- Forma d'onda.

E' necessario però evidenziare il legame che intercorre tra il suono, inteso come fenomeno fisico, e la corrispondente sensazione della percezione sonora da parte del sistema orecchio/cervello.

Percezione dei parametri caratteristici

A ciascuno di questi parametri, infatti, corrisponde una sensazione soggettiva che, al contrario dei parametri, non è misurabile fisicamente.

CARATTERISTICA FISICA	PARAMETRO	SENSAZIONE
frequenza	altezza	acuto/grave
ampiezza	dinamica o intensità	forte/piano
forma d'onda	timbro	chiaro/scuro

Legame tra suono e sensazione sonora

- Pitagora, attraverso il suo monocordo, determinò l'intervallo di ottava dimezzando la lunghezza della corda.
- Nel corso dei secoli, sono stati effettuati diversi tentativi di creazione di una “scala musicale” suddividendo tale intervallo.
- Il sistema temperato (o equabile) prevede la suddivisione in dodici intervalli “uguali”.

Legame tra suono e sensazione sonora

- L'approccio immediato è quello di dividere l'ottava in sottointervalli aventi tutti la stessa ampiezza.
- Tuttavia, il legame che intercorre tra la frequenza e l'intervallo musicale percepito, non è lineare.
- Questo significa che l'orecchio non è sensibile alle differenze di frequenza.

Legame tra suono e sensazione sonora

- Ernest Weber, infatti, studiò il legame tra stimolo e percezione.
- Secondo tali studi, occorre aggiungere 1 unità a uno stimolo di 10 unità (oppure 10 unità a uno stimolo di 100 unità, etc.) al fine di produrre una differenza percettibile.

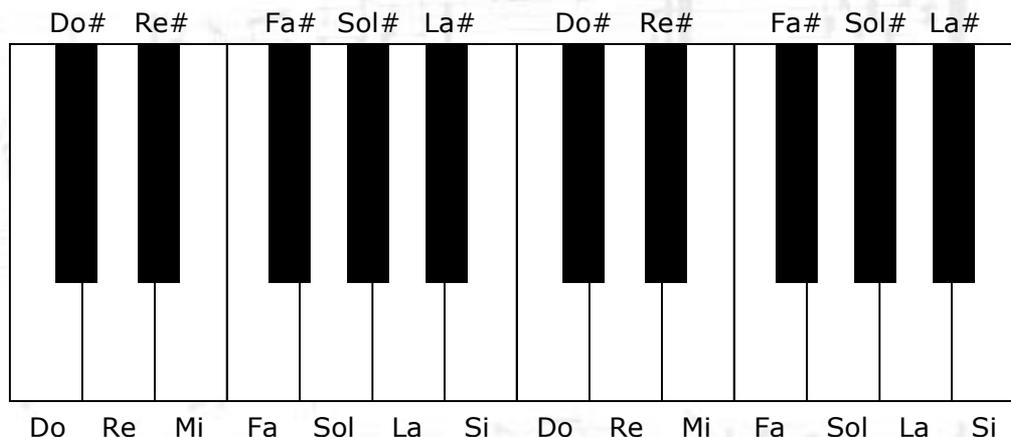
Legame tra suono e sensazione sonora

- G.T. Fechner, basandosi sugli studi di Weber, formulò la seguente legge:

$$\frac{\Delta R}{R} = k$$

essendo R l'intensità dello stimolo fisico, ΔR la variazione di intensità dello stimolo relativa ad R e k una costante indipendente da R e propria della sensazione analizzata.

Legame tra suono e sensazione sonora



$$\frac{F_{do\#}}{F_{do}} = \frac{F_{re}}{F_{do\#}} = \frac{F_{re\#}}{F_{re}} = \dots = \frac{F_{si}}{F_{la\#}} = \frac{2F_{do}}{F_{si}} = r$$

$$F_{do} \cdot r = 2F_{do}$$

$$r^{12} = 2 \Rightarrow r = \sqrt[12]{2} = 1,05946309$$

Legame tra suono e sensazione sonora

- In sede di accordo internazionale è stata fissata una altezza standard che definisce il La centrale a 440 Hz. Da questa frequenza di riferimento è possibile ricavare la frequenza di tutte le altre note con la seguente formula:

$$F_n = 440 \cdot (\sqrt[12]{2})^{\# \text{semitoni}}$$

dove n indica la nota di cui si vuole trovare il valore di frequenza, mentre $\# \text{semitoni}$ rappresenta il numero di semitoni che separa n dal La centrale.

Legame tra suono e sensazione sonora

- Per poter misurare variazioni di frequenza inferiori al semitono, è stata introdotta una ulteriore suddivisione relativa, secondo la quale l'unità di riferimento è nota come *cent*, o centesimo di semitono:

$$\text{cent} = \sqrt[100]{12\sqrt{2}} = \sqrt[1200]{2}$$

Grazie a questa suddivisione, in un semitono temperato ci sono 100 cent, mentre l'ottava è suddivisa in 1200 cent.

Le curve isofoniche

- In una camera anecoica le riflessioni vengono ridotte al minimo, in modo che l'ascoltatore sia raggiunto esclusivamente dal segnale diretto.
- Le curve indicano come l'orecchio umano reagisca diversamente alle varie frequenze in termini di intensità sonora percepita.
- I singoli componenti del gruppo di ascolto sono stati sottoposti varie volte all'audizione successiva di toni diversi, chiedendo loro di indicare quando ogni tono veniva percepito di intensità pari al suono di riferimento di frequenza 1 kHz.

Le curve isofoniche

- Come si nota dal grafico, a parità di pressione sonora, la percezione del volume di ascolto cambia in funzione della frequenza.
- Le curve indicano come l'orecchio umano reagisca diversamente alle varie frequenze in termini di intensità sonora percepita.
- Muovendoci lungo una curva possiamo determinare quale deve essere la pressione sonora affinché l'orecchio percepisca il suono con la stessa intensità, variandone la frequenza.

Le curve isofoniche

- Tale percezione è misurata in phon.
- Si stabilì che la sensazione sonora indotta da un tono di 1000 Hz, avente intensità pari ad un certo valore n di dB_{spl} , abbia livello espresso in phon pari allo stesso numero n .
- Sulla base di ciò, quindi, a 1000Hz per ottenere 50 phon di intensità soggettiva (l'intensità percepita), occorrono 50 dB_{spl} di pressione reale (quella realmente prodotta dalla sorgente sonora).

Le curve isofoniche

- Le curve spiegano, quindi, perché se ascoltiamo una registrazione musicale a basso volume, perdiamo gran parte dell'informazione contenuta nelle basse e nelle alte frequenze.
- Spesso le apparecchiature sonore sono dotate del comando *loudness* che esalta le basse ed alte frequenze, secondo opportune curve, al fine di migliorare l'ascolto di un brano musicale a basso volume.

Effetto di mascheramento

- Due o più suoni prodotti assieme si “disturbano” reciprocamente. Tale fenomeno è noto come effetto di mascheramento, o semplicemente mascheramento.
- Il caso più evidente è quello in cui suoni di intensità maggiore coprono suoni deboli. Tuttavia anche un suono forte può essere disturbato dalla presenza di un suono meno intenso.
- Il suono disturbatore è detto suono *mascherante*, mentre il suono disturbato, suono *mascherato*.

Effetto di mascheramento

- Dal punto di vista psicoacustico, l'effetto di mascheramento consiste nell'innalzamento della soglia di udibilità a scapito del suono mascherato.
- L'effetto di mascheramento è misurato dal numero di dB del quale si deve aumentare il suono mascherato affinché possa ritornare udibile.
- Se, ad esempio, devo aumentare l'intensità di tale suono di 10 dB perché torni ad essere udibile, si dice che subisce un mascheramento di 10 dB.

Alcuni esempi

Alcuni esempi di fenomeni legati alla percettività del sistema orecchio/cervello sono:

- L'effetto doppler.
- Il posizionamento di un suono.