

SOUND DESIGN

Alessandro Fiordelmondo
alessandro.fiordelmondo@labatrentino.it

1T ACUSTICA

LABA Libera Accademia Belle Arti - Trentino
2021/2022

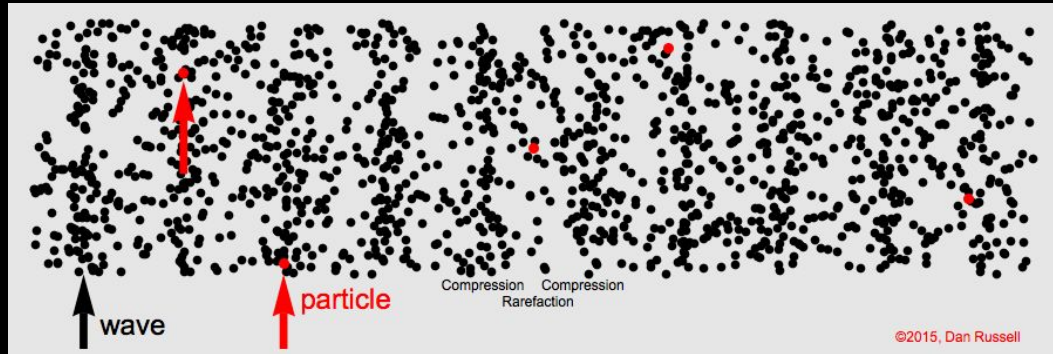
LA NATURA DEL SUONO

La natura fisica del suono è di tipo ondulatorio: si tratta di onde meccaniche che trasportano energia lontano dalla sorgente, che è un oggetto in vibrazione. A viaggiare non è del materiale ma un **segnale**.

La vibrazione causata dalla sorgente provoca una serie di compressioni e rarefazioni (variazioni di pressione) nel *mezzo di propagazione* (aria, acqua, ecc) che si propagano lontano dalla sorgente in tutte le direzioni. Tale segnale pone in vibrazione ogni oggetto che si trova sulla sua traiettoria. Quando l'onda è passata, ogni cosa torna nella posizione originale.

Il suono necessita di una **sorgente**, cioè di un corpo vibrante e di un **mezzo elastico di propagazione** in cui le onde possano viaggiare. Aria, acqua, legno, metalli, cemento, mattoni e vetro possono vibrare e propagare le onde sonore.

Tra gli oggetti che si possono trovare sulla traiettoria di un'onda acustica ci può essere il **timpano dell'orecchio** il quale attiva tutto un meccanismo molto complesso (meccanico, fisico, chimico e psichico) che ci permette di ascoltare.



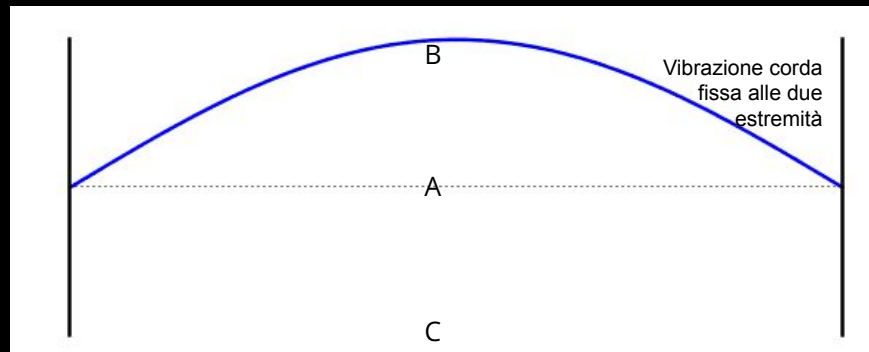
LA PRODUZIONE DEL SUONO

All'origine di un suono vi è sempre una vibrazione. Tutte le sorgenti sonore vibrano.

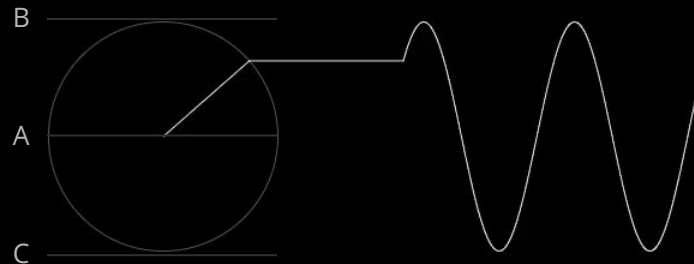
Con i **moti oscillatori** possiamo descrivere il movimento di una particella messa in vibrazione da una sorgente sonora. Si ha un moto oscillatore quando una particella oscilla (o vibra) intorno ad una posizione di equilibrio. →

La particella parte da una posizione di riposo A (o posizione di equilibrio) → raggiunge massima distanza B → ritorna al punto di equilibrio A → raggiunge la massima distanza C (opposto ad B) → ritorna al punto di equilibrio A →

NOTA: i punti B e C rappresentano rispettivamente la massima compressione e rarefazione delle particelle.



Se descriviamo il moto oscillatore nell'asse del tempo otteniamo la funzione dell'**onda sinusoidale**. Tutta la scienza delle onde sonore è costruita a partire dalle onde sinusoidali.

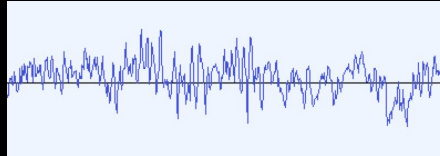
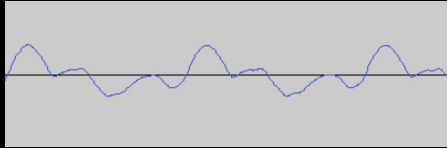


SUONI SEMPLICI E COMPLESSI

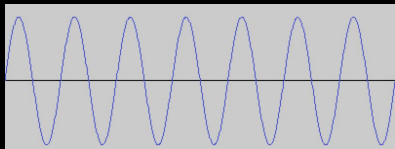
Il suono semplice (detto anche anche suono puro) è rappresentato dall'onda sinusoidale, definita come l'elemento basilare nello studio dei suoni.



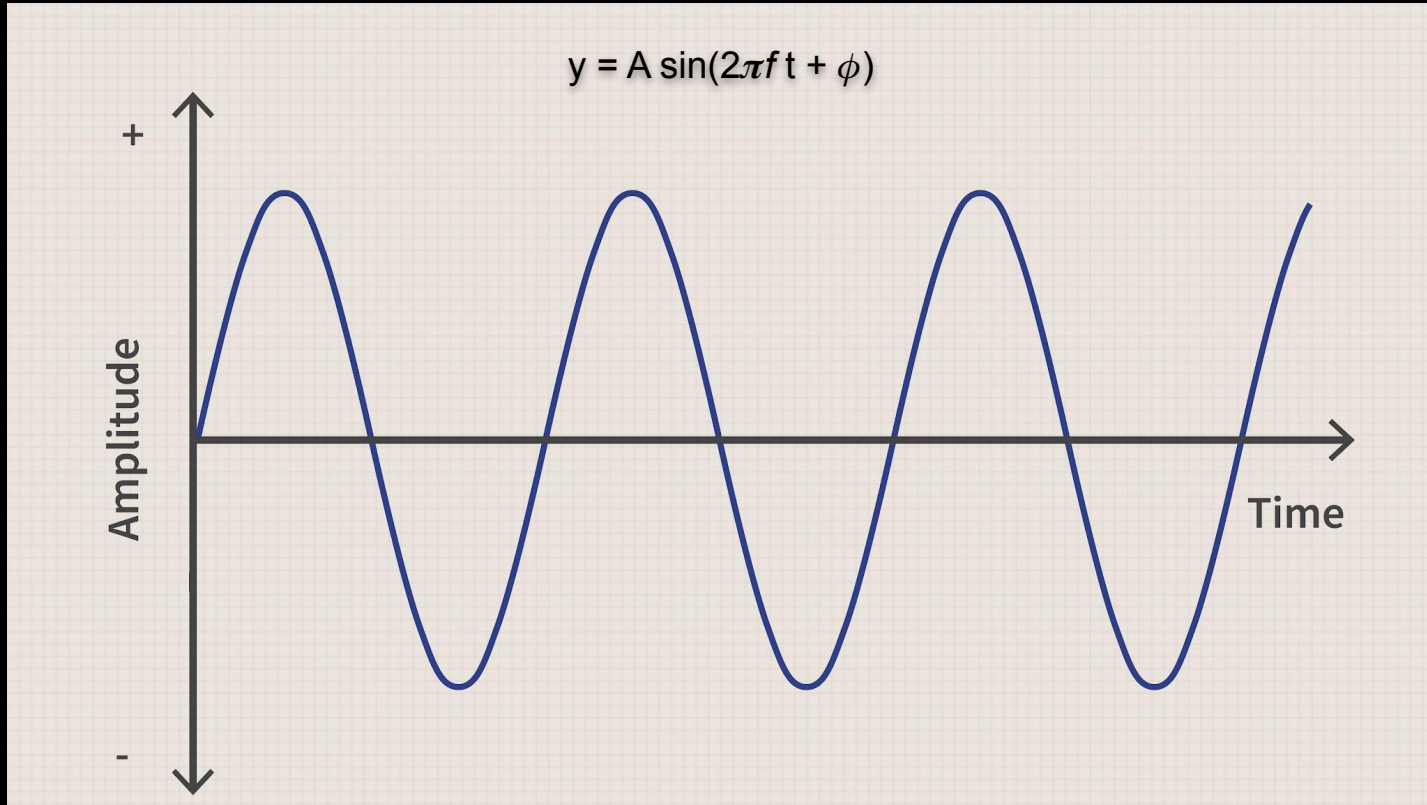
Il suono complesso è definito dalla somma di più onde sinusoidali diverse. La forma d'onda del suono complesso è caratterizzata da un andamento articolato. In un singolo periodo possono essere comprese più alternanze di compressioni e rarefazioni.



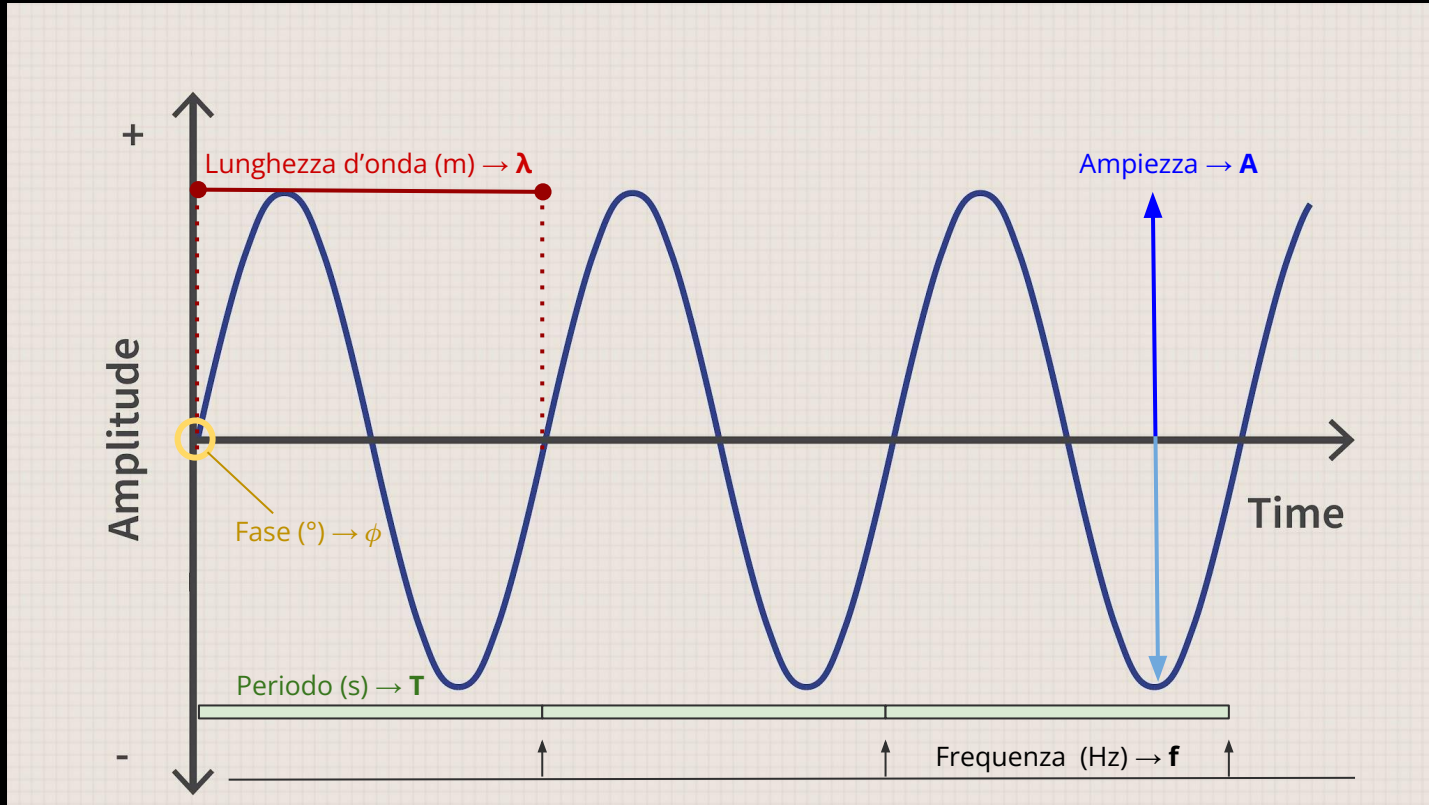
I suoni in natura sono di tipo complesso e ciascuno è caratterizzato dalla sorgente che lo ha prodotto. Il suono puro può essere creato solamente in laboratorio. Il diapason è lo strumento che più si avvicina alla produzione dell'onda sinusoidale.



L'ONDA SINUSOIDALE



PARAMETRI FONDAMENTALI DEL SUONO



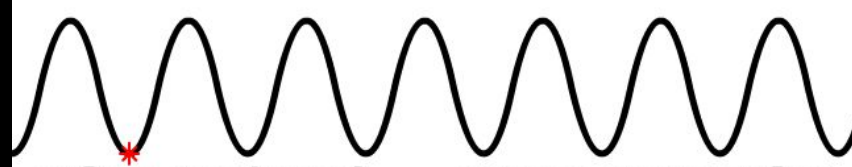
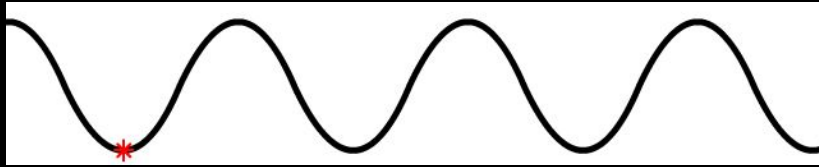
PARAMETRI FONDAMENTALI DEL SUONO

Ampiezza (A) → l'ampiezza dell'oscillazione rappresenta l'*intensità* del suono. Maggiore è la distanza percorsa dalla particella allontanandosi dalla posizione di equilibrio, maggiore è l'intensità sonora.

Suono deboli (es. un bisbiglio) compiranno oscillazioni intorno la posizione di equilibrio. Suoni forti (es. un'esplosione) compiranno ampie oscillazioni intorno alla posizione di equilibrio.

Frequenza (f) → La frequenza di oscillazione rappresenta l'*altezza* di un suono. La frequenza rappresenta la velocità con cui la particella oscilla (la velocità di rotazione sul cerchio). Si misura con il numero di cicli che la particella completa nell'unità di tempo (1 secondo). Esiste un'unità di misura specifica per calcolare la frequenza che sono gli *Hertz (Hz)* che rappresenta i cicli al secondo.

Maggiore è la frequenza e più acuto è un suono / Minore è la frequenza e più grave è un suono. La nota più bassa (grave) di un pianoforte compie 27,5 cicli al secondo (quindi avrà una frequenza di 27,5 Hz), mentre la nota più alta (acuta) ne compie 4186 al secondo (4186 Hz)



Periodo (T) → Il periodo è l'inverso della frequenza ($T = 1/f$) e rappresenta il tempo (in secondi) che l'onda impiega per compiere un ciclo di vibrazione.

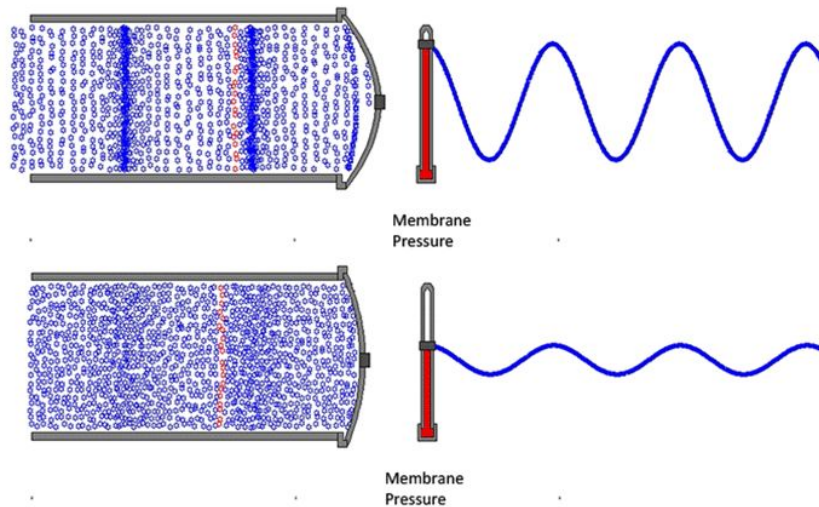
La durata di un ciclo di vibrazione della nota più bassa di pianoforte sarà di 0.036 secondi ($T = 1/27,5$) mentre la durata di un ciclo di vibrazione della nota più alta di pianoforte sarà di 0,00023 secondi ($T = 1/4186$)

Lunghezza d'onda → La lunghezza d'onda è la distanza tra due punti identici in cicli adiacenti di un segnale. Viene misurato in metri (m).

Fase → la fase è un parametro di una sinusoide che si misura in radianti (o anche in gradi °) e che rappresenta la sua traslazione rispetto ad un'altra. Si prende in considerazione se si lavora con due o più sinusoidi.

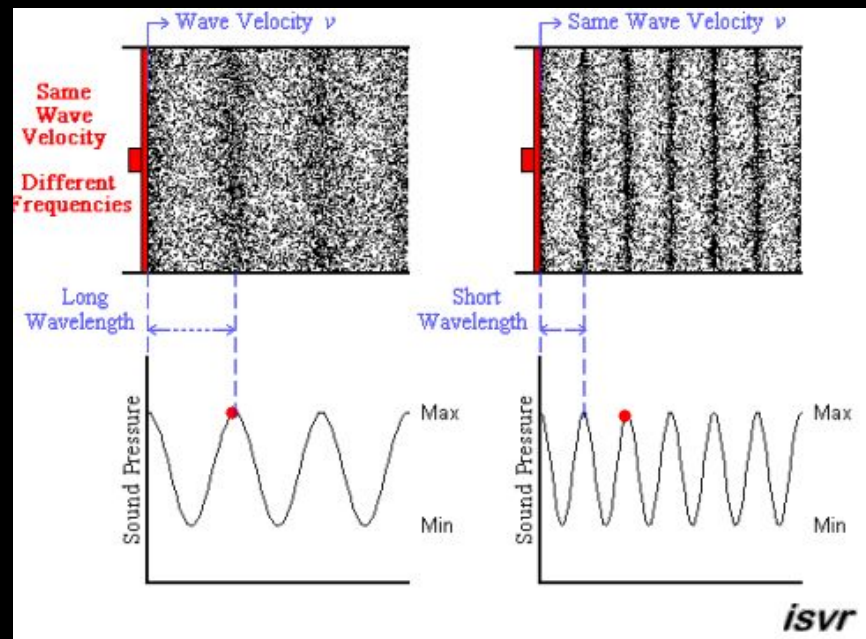
PARAMETRI FONDAMENTALI DEL SUONO

Property 1: Amplitude



“Loudness”

Units: 1 decibel (dB)



AMPIEZZA

L'ampiezza dell'oscillazione rappresenta **l'intensità** di un suono. Possiamo definirla anche come la *forza del suono*. Maggiore è la forza del suono maggiore sarà lo spostamento delle particelle di aria.

Potremmo misurare l'ampiezza del suono in metri (m), tuttavia tale misurazione potrebbe generare inconvenienti < la maggior parte dei suoni sono dell'ordine di $1\mu\text{m}$ (un millesimo di millimetro, quindi molto piccoli)

Esistono due tipi di misurazione definiti per il suono

- **Sound Pressure Level - SPL**
Misurazione della pressione sonora dell'aria dovuta dalla compressione e rarefazione delle particelle.
- **Sound Intensity Level - SIL**
Misurazione dell'energia trasportata dall'onda sonora.

AMPIEZZA - *Sound Pressure Level* - pressione sonora

Il silenzio corrisponde alla pressione atmosferica

La pressione atmosferica varia molto lentamente (se non presenta nessuna onda sonora) e pertanto può essere considerata una costante.

Anche in questo caso le grandezze misurate sono molto piccole. Nonostante ciò tali quantità sono facilmente misurabili con i diaframmi dei microfoni (che si comportano esattamente come il timpano).

La pressione sonora si misura in *pascal* (p)

Per misurare la pressione sonora si considera la variazione media della pressione rispetto alla pressione atmosferica.

In questo caso si utilizza la **pressione quadratica media (Root Mean Square - RMS)** o meglio la radice quadrata della media dei quadrati delle pressioni.

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_N^2}{N}}$$

AMPIEZZA - *Sound Pressure Level & Decibel*

Per calcolare il livello di pressione sonora dobbiamo utilizzare la **scala dei decibel**.

La scala dei decibel è una scala logaritmica relativa con la quale non misuriamo una quantità ma un valore in rapporto ad un valore di riferimento.

Nel calcolo del SPL il valore di riferimento è la **soglia minima di udibilità** = $0,00002 p$

Si utilizza una scala logaritmica poiché la differenza tra la soglia minima di udibilità ($0,000025 p$) e la soglia del dolore (opposto estremo - "del dolore" poiché provoca danni al timpano $\rightarrow 30 p$) è molto ampia (soglia del dolore un milione di volte più grande della soglia minima).

$$SPL = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

p = pressione sonora (p_{rms})
 p_0 = soglia di udibilità

AMPIEZZA - *Sound Pressure Level* - Livelli SPL di riferimento

SUONO	SPL	REAZIONE
Massimo rumore prodotto in laboratorio	210	Suono insopportabile
Lancio di un missile (a 50m)	200	
Rottura del timpano	160	
Jet al decollo (a 50m)	130	Dolore fisico
Suono al limite del dolore	120	
Complesso rock in locale	110	
Schianto di un fulmine	110	
Urlo (a 1,5 m)	100	
Martello pneumatico	90	Suoni utili
Traffico cittadino diurno	70-80	
Ufficio o ristorante (affollati)	60-65	
Conversazione (a 1m)	50	
Teatro o chiesa (vuoti)	25-30	
Bisbiglio (a 1m)	15	
Fruscio di foglie	10	
Zanzara vicino all'orecchio	10	Non udibile
Soglia dell'udito (a 1000Hz)	0	

AMPIEZZA - *Sound Intensity Level SIL & Decibel*

Anche la misurazione del livello di intensità sonora (SIL) è basata sulla scala dei decibel.

L'intensità rappresenta l'energia trasportata dall'onda e si misura in $Watt/m^2$.

La soglia minima di intensità udibile (energia trasportata dall'onda) è di $0,0000000000001 (10^{-12}) Watt/m^2$

$$SIL = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

I = intensità sonora
 I_0 = soglia di udibilità

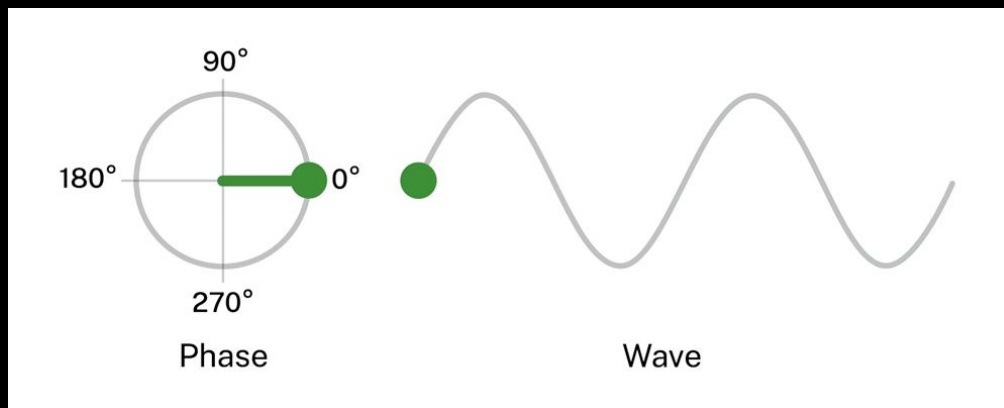
FASE

La fase è il parametro che indica la posizione in cui si trova il ciclo dell'onda in un determinato istante. Viene solitamente utilizzato per indicare la traslazione tra una o più onde sonore. Può essere misurata in *gradi* o *radianti*.

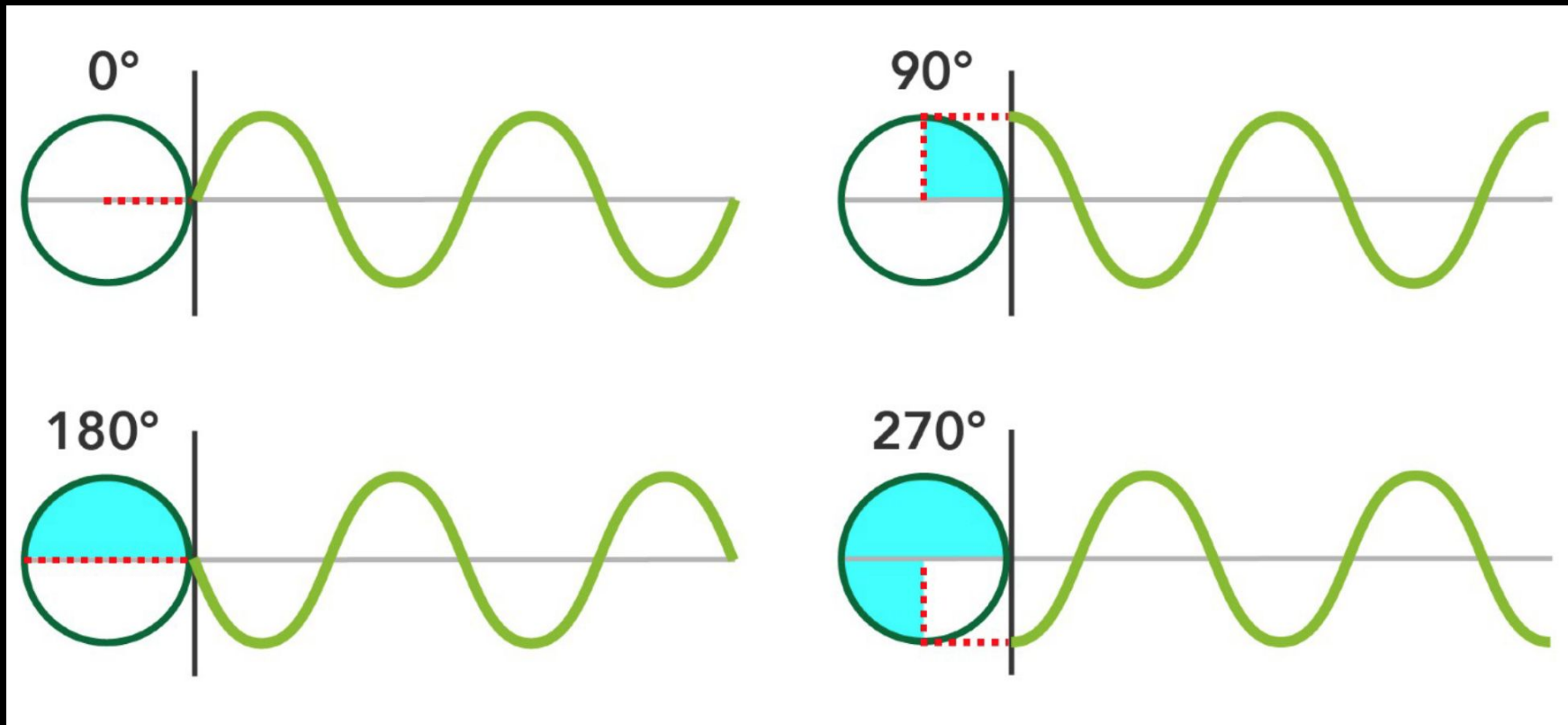
$$0^\circ = 0 \text{ rad} \quad \rightarrow \quad 90^\circ = \pi/2 \text{ rad} \quad \rightarrow \quad 180^\circ = \pi \text{ rad} \quad \rightarrow \quad 270^\circ = 3 \cdot (\pi/2) \text{ rad} \quad \rightarrow \quad 360^\circ = 0 \text{ rad}$$

$$\text{rad} = \text{grad} / 180 * \pi$$

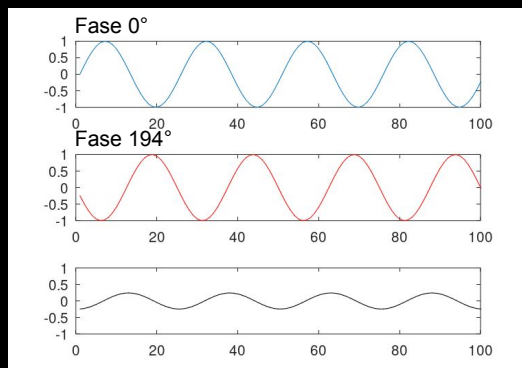
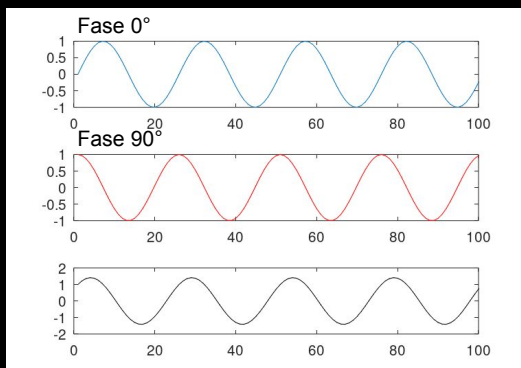
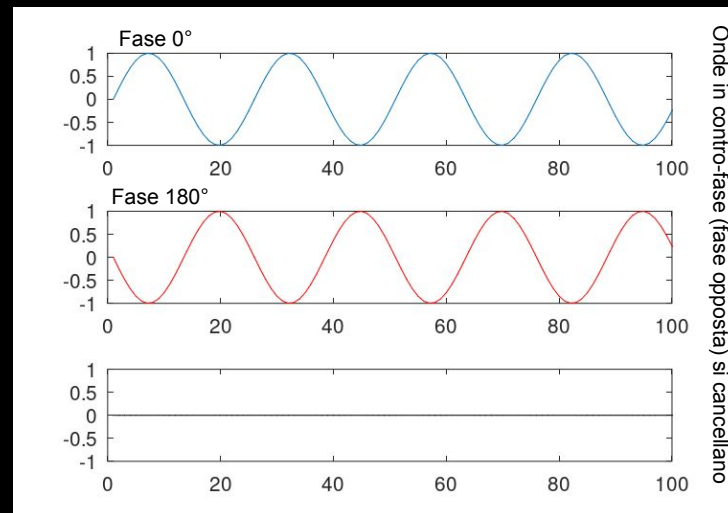
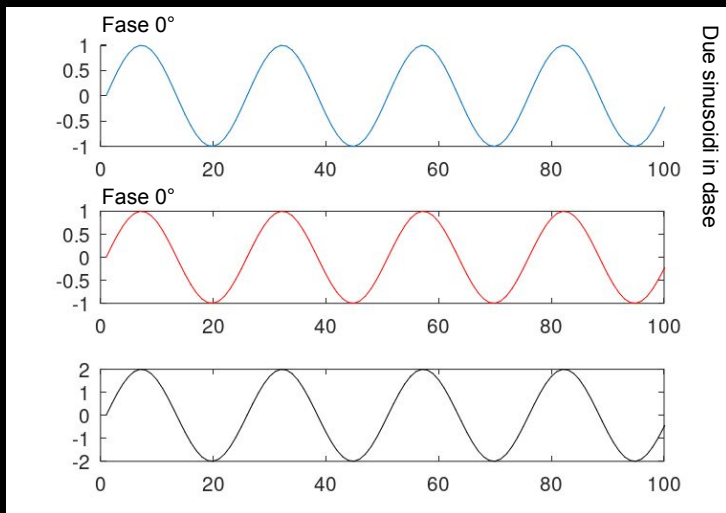
$$\text{grad} = \text{rad} / \pi * 180$$



Il parametro della fase è molto importante nella somma delle sinusoidi



FASE somma delle sinusoidi



Quando due onde sono in discordanza di fase, la loro somma crea un'onda con stessa frequenza ma con ampiezza dipendente dalla quantità di sfasamento tra le due

FREQUENZA

La frequenza di un suono, cioè il numero di variazioni complete che la sorgente compie in un secondo, o alternativamente il numero di compressioni/rarefazioni che subisce una particella d'aria in un secondo, è la principale responsabile dell'**altezza del suono**.

Non tutti i suoni hanno un'altezza definita → l'altezza è una qualità che risulta dalla periodicità di un segnale, cioè dal fatto che un segnale ripete lo stesso andamento per un po' di tempo.

La frequenza si misura in Hertz (Hz) che rappresenta il *numero di cicli al secondo*.

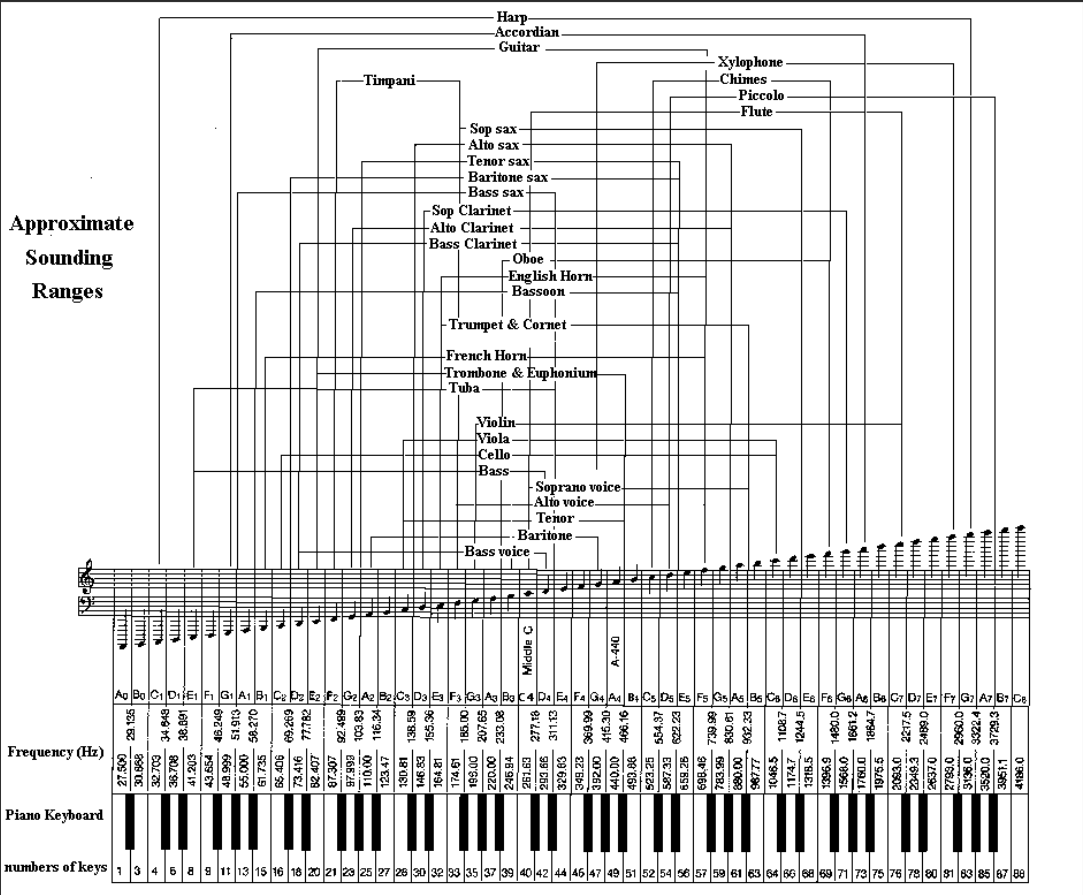
FREQUENZA - Percezione dei suoni

I **suoni** sono segnali che hanno un frequenza tra i 20 Hz e i 20 kHz (= 20.000 Hz), limite definito dalla percezione dell'umano.

Segnali che hanno frequenze inferiori le 20 Hz, vengono definiti **infrasuoni**; segnali con frequenze superiori le 20 Hz sono definiti **ultrasuoni**.

SUONO	Frequenza (Hz)
La nota più bassa del pianoforte	27,5
La nota più bassa del clarinetto basso	100
La nota più bassa del clarinetto	104,8
Il Do centrale del pianoforte	261,6
Il La oltre il Do centrale del pianoforte	440
L'estensione superiore di un soprano	1000
La nota più alta di un pianoforte	4186
L'armonica superiore degli strumenti musicale	10.000
Il limite dell'udito nelle persone anziane	12.000
Limite dell'udito	16.000-20.000

FREQUENZA - Note



Ma come distinguiamo suoni che hanno stessa ampiezza e frequenza?



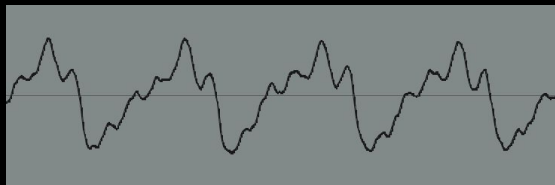
FORMA D'ONDA

TRANSITORI

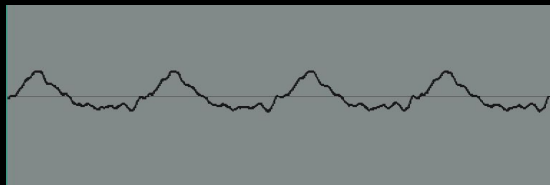
FORMA D'ONDA

Il parametro più importante per distinguere un suono da un altro, *a parità di ampiezza e frequenza*, è la **forma d'onda**. La forma d'onda rappresenta il modo in cui la sorgente vibra, permettendo quindi di identificare l'origine del suono. La forma d'onda descrive l'andamento delle compressioni/rarefazioni che per i suoni complessi è molto articolato.

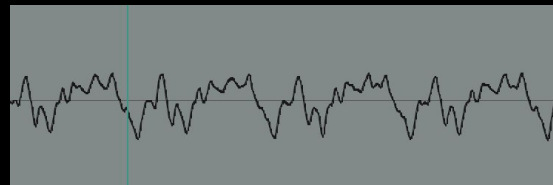
Il parametro percettivo che meglio corrisponde alla forma d'onda è il **timbro**. Ogni strumento musicale ha un timbro che lo contraddistingue.



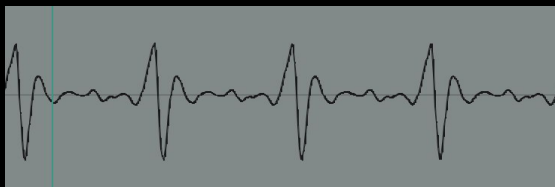
Pianoforte
Do4



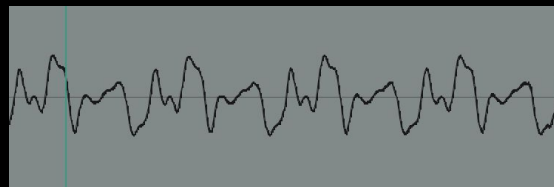
Contrabbasso
Do4



Violino
Do4



Tromba
Do4



Flauto
Do4



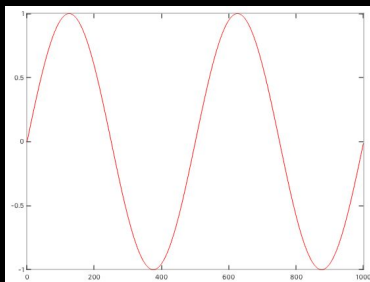
FORMA D'ONDA

La forma d'onda dipende dal **contenuto spettrale** (anche chiamato **spettro**) del segnale.

Ogni *suono complesso* è definito dalla somma di più onde sinusoidali con ampiezza e frequenza diversa

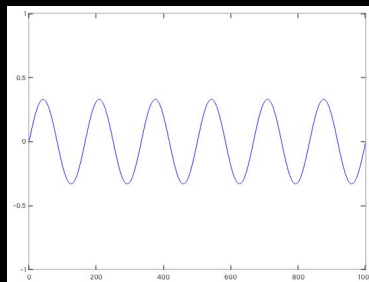
→ il contenuto spettrale si riferisce al "contenuto sinusoidale" del suono complesso

⇒ la forma d'onda (il timbro) di un suono è definito dalle sinusoidi (suoni semplici o puri) che lo compongono.



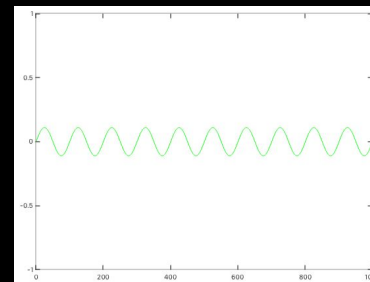
Sinusoide 1 (Freq. = x ; Amp. = y)

+



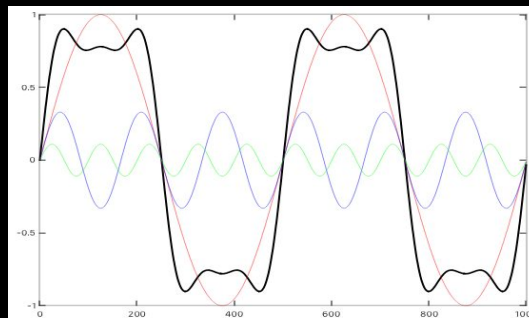
Sinusoide 2 (Freq. = $3x$; Amp. = $y/3$)

+



Sinusoide 3 (Freq. = $5x$; Amp. = $y/5$)

=



Forma d'onda risultante

Sinusoide 1

Sinusoide 2

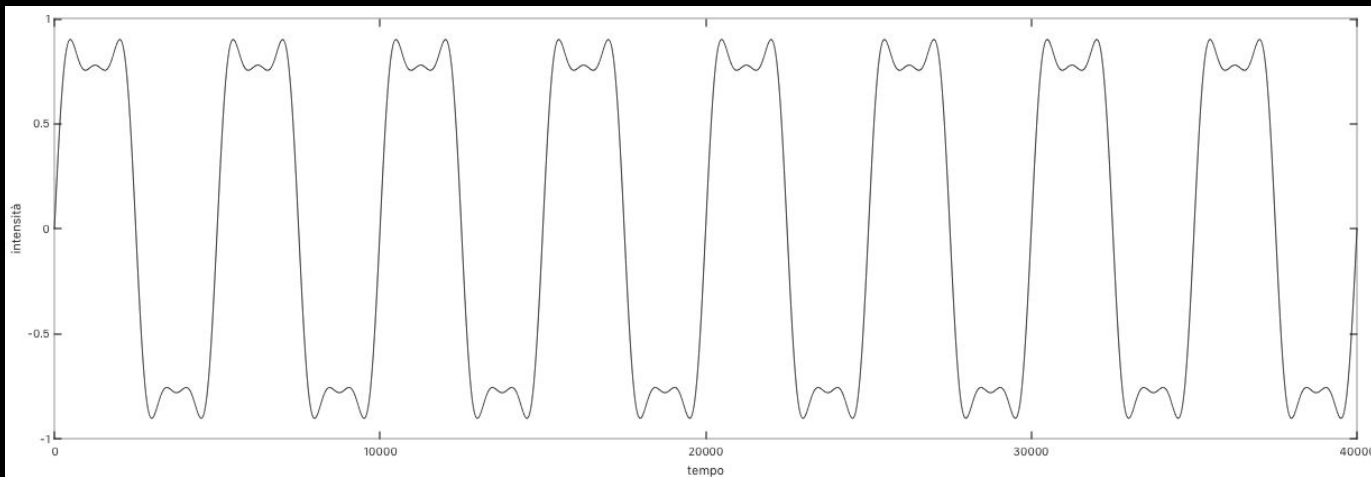
Sinusoide 3

FORMA D'ONDA - *Dominio del tempo e dominio della frequenza*

Le componenti spettrali possono essere osservate attraverso la rappresentazione del suono nel **dominio della frequenza**.

Fino ad ora abbiamo osservato il suono nel **dominio del tempo**.

La rappresentazione nel dominio del tempo descrive l'andamento di una grandezza (nel nostro caso l'intensità sonora) nel tempo. Considerando un punto della curva, quello rappresenta l'ampiezza del suono in un preciso istante.

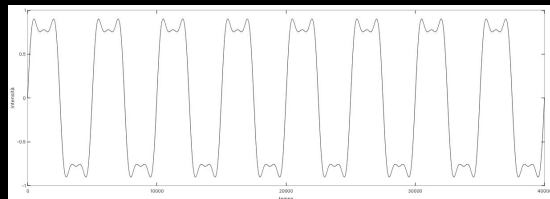


DOMINIO DEL TEMPO

FORMA D'ONDA - Dominio del tempo e dominio della frequenza

Se nella rappresentazione del tempo abbiamo nell'asse delle x (l'ascissa) gli istanti tempo e quindi descriviamo l'intensità del suono negli istanti tempo...

Nella **rappresentazione della frequenza** nell'asse delle x (l'ascissa) abbiamo le frequenze e quindi descriviamo l'intensità di un suono in determinate frequenze. In altre parole descriviamo l'intensità e la frequenza delle sinusoidi contenute nel segnale



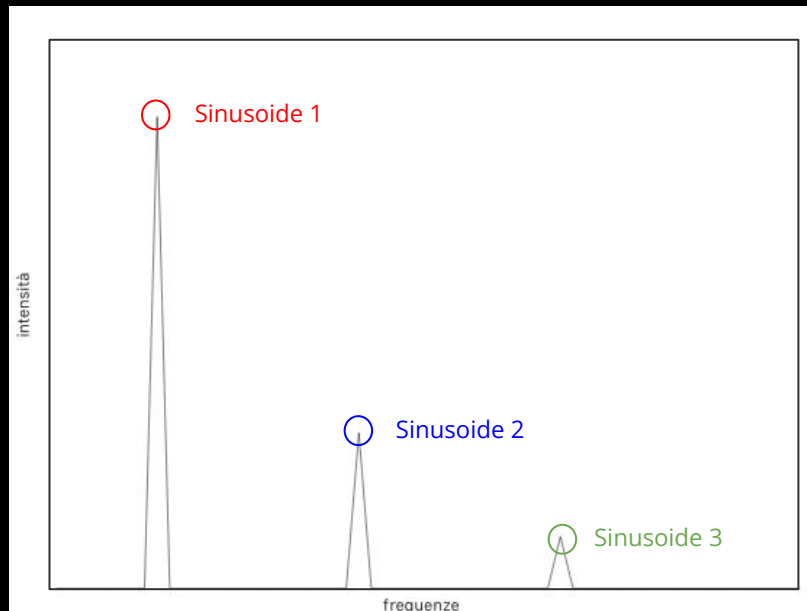
DOMINIO DEL TEMPO

Per passare dal dominio del tempo al dominio della frequenza si utilizza la **trasformata di Fourier** (*Fourier Transform* - **FT**).

$$\mathcal{F}g(t) = G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i2\pi ft} dt$$

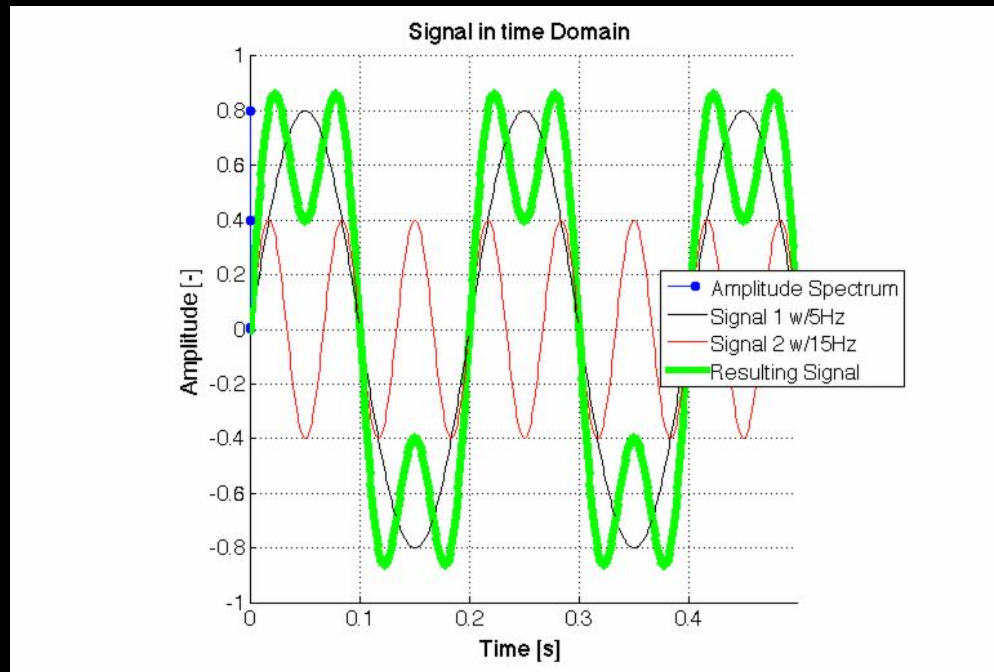
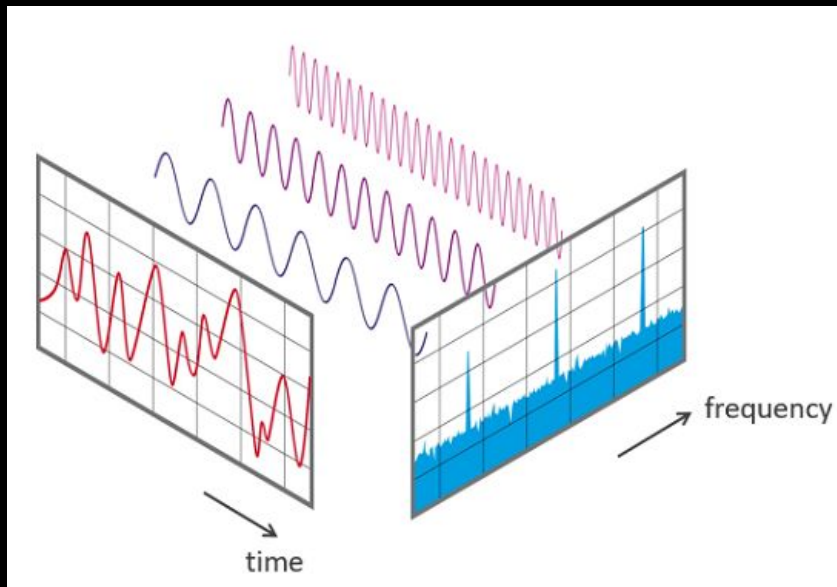
Con la trasformata di Fourier possiamo decomporre ogni segnale $g(t)$ può essere scomposto in una somma di sinusoidi $G(f)$, chiamato anche spettro del suono.

<https://www.thefouriertransform.com>



DOMINIO DELLA FREQUENZA

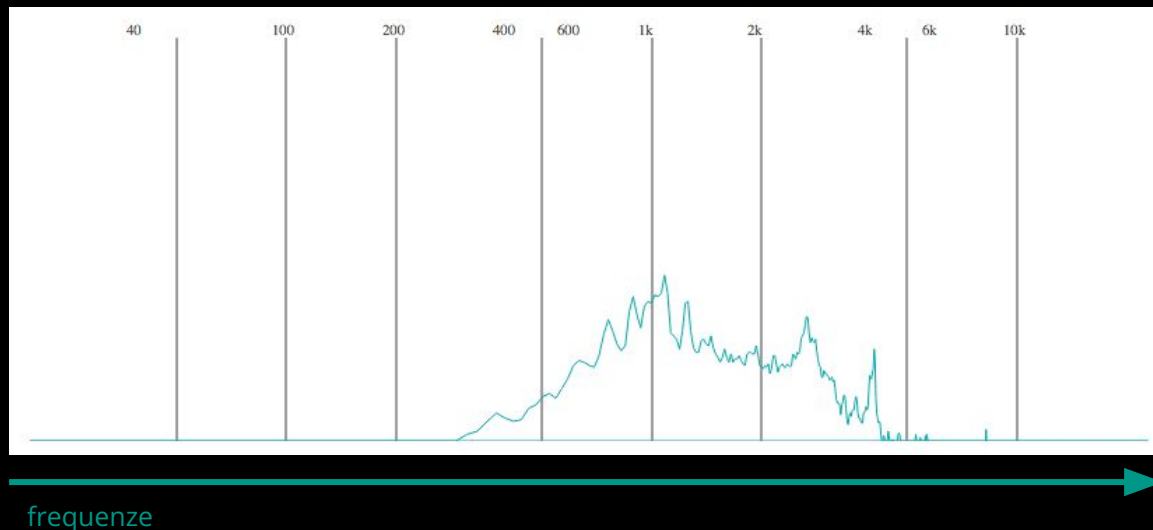
FORMA D'ONDA - *Dominio della frequenza*



FORMA D'ONDA - *Dominio della frequenza*

Nel dominio della frequenza possiamo distinguere sette regioni fondamentali:

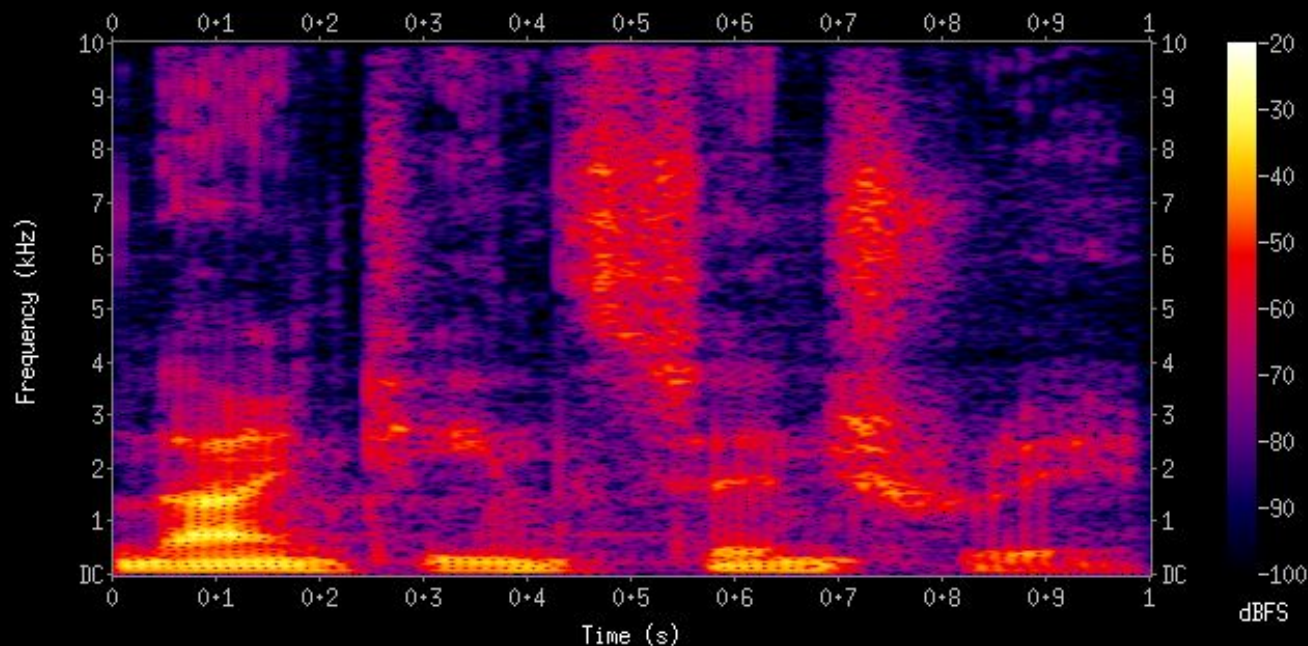
- **Sub-bass** → 20 - 60 Hz
- **Bass** (Bassi) → 60 - 250 Hz
- **Low Mid-range** (Medi bassi) → 250 - 500 Hz
- **Midrange** (Medi) → 500 - 2000 Hz
- **Upper Mid-range** (Medi Alti) → 2 - 4 kHz
- **Presence** (Alti / Presenza) → 4 - 6 kHz
- **Brilliance** (Brillantezza) → 6 - 20 kHz



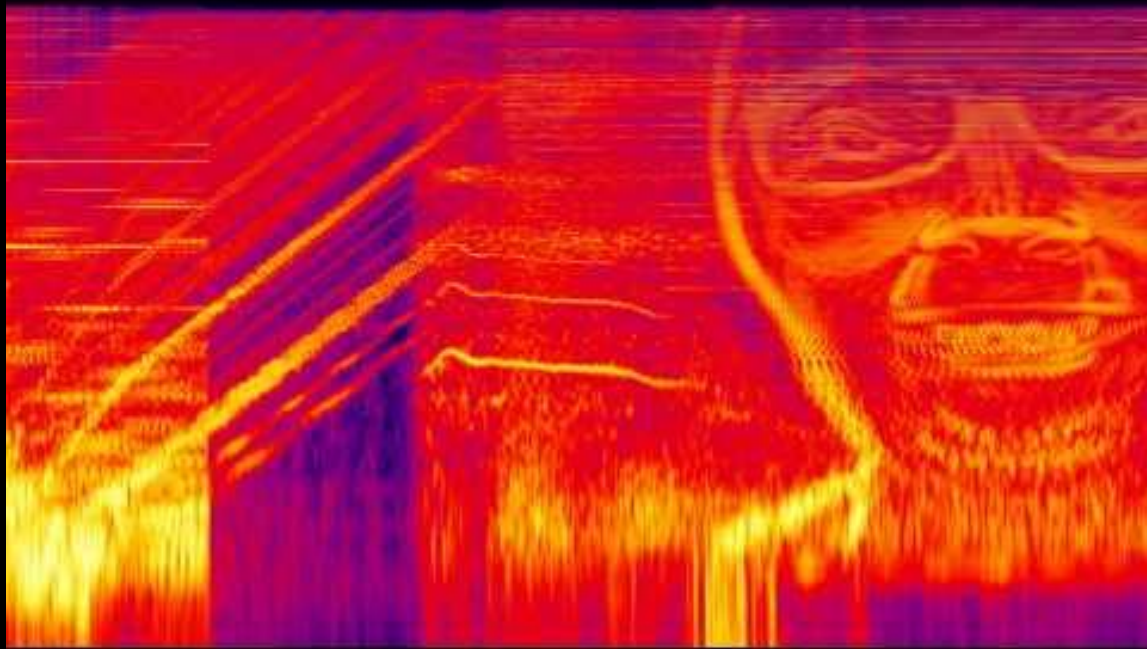
SONOGRAMMA

Il **sonogramma** è un altro tipo di visualizzazione del suono che combina la rappresentazione nel dominio della frequenza con la rappresentazione nel dominio del tempo.

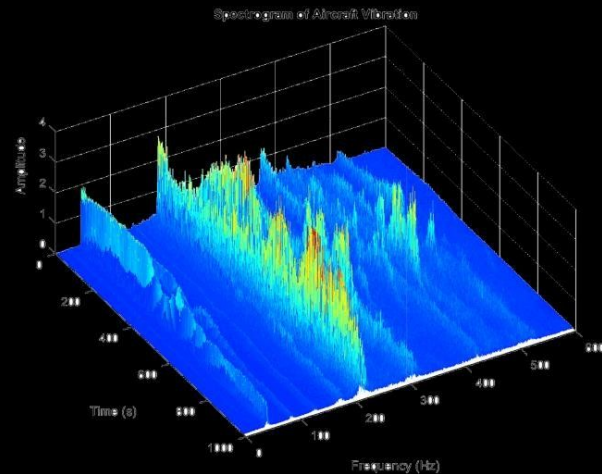
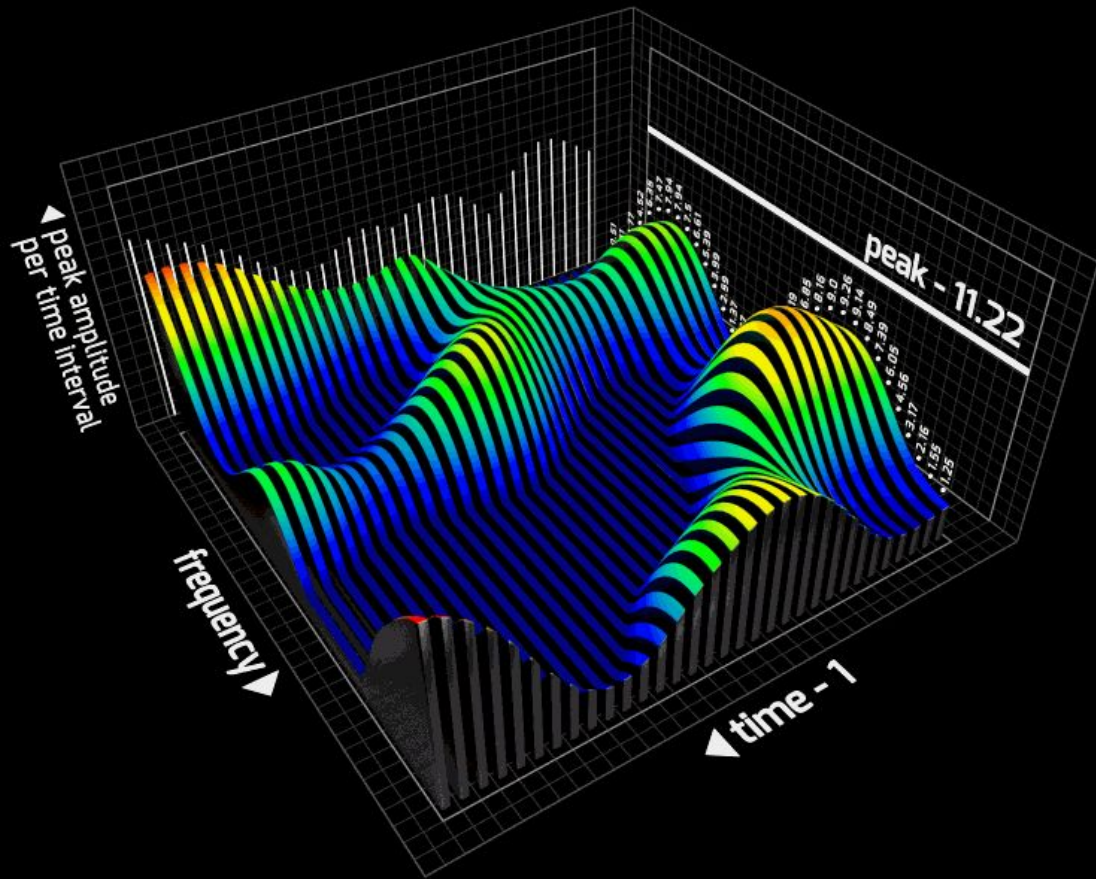
La variazione d'ampiezza per le differenti frequenze che compongono il suono sono rappresentate con la variazione di colore



SONOGRAMMA



SPETTROGRAMMA TRIDIMENSIONALE

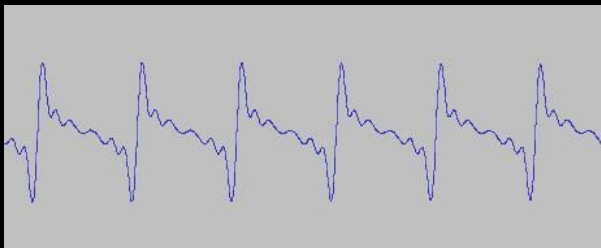


FORMA D'ONDA - *Suoni complessi periodici e non periodici*

Si distinguono due tipi di suoni complessi:

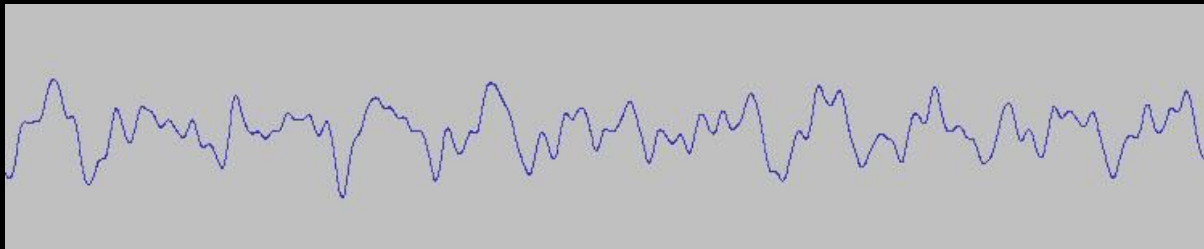
SUONI PERIODICI

Costituiti dalla ripetizione di una porzione del segnale. Solo grazie alla periodicità possiamo distinguere un'altezza definita del suono.



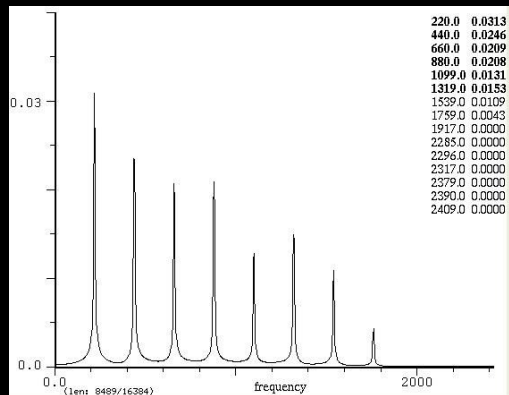
SUONI NON PERIODICI

Non è possibile discernere una ripetizione del segnale. I suoni non periodici non hanno un'altezza definita.



FORMA D'ONDA - Frequenza fondamentale, Parziali armoniche ed inarmoniche

Attraverso la Trasformata di Fourier possiamo scomporre il suono nelle sinusoidi che lo compongono, con relative frequenze ed ampiezze.



Ogni sinusoida in cui un suono è scomposto viene chiamata **PARZIALE**.

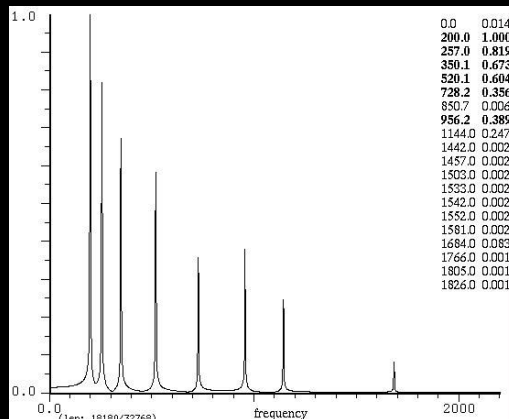
La prima delle parziali (sinusoidi) estratte viene chiamata **FONDAMENTALE** (frequenza fondamentale). La frequenza fondamentale di un suono periodico complesso è quella che definisce l'altezza percepita. Il resto delle parziali definisce invece il timbro.

Se le parziali sono multipli interi della fondamentale, queste sono chiamate **PARZIALI ARMONICHE** (o anche solamente "armoniche").

Fondamentale
f

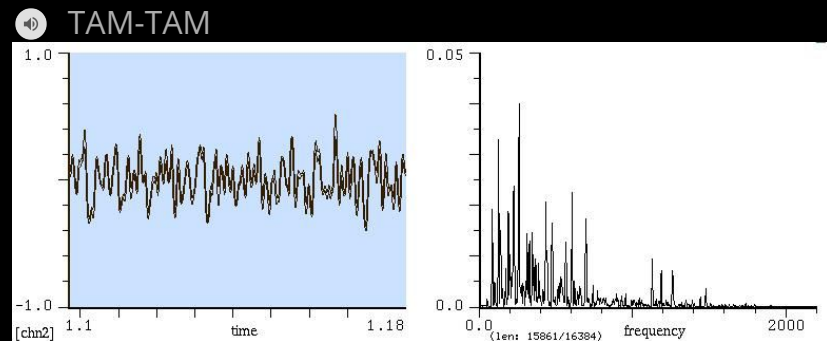
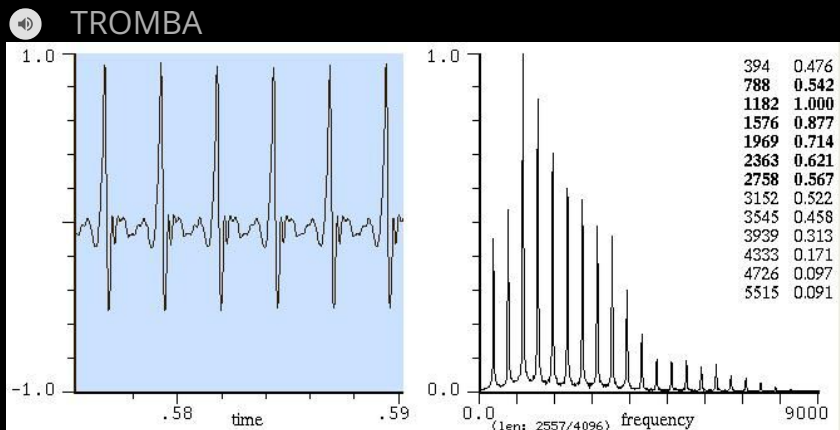
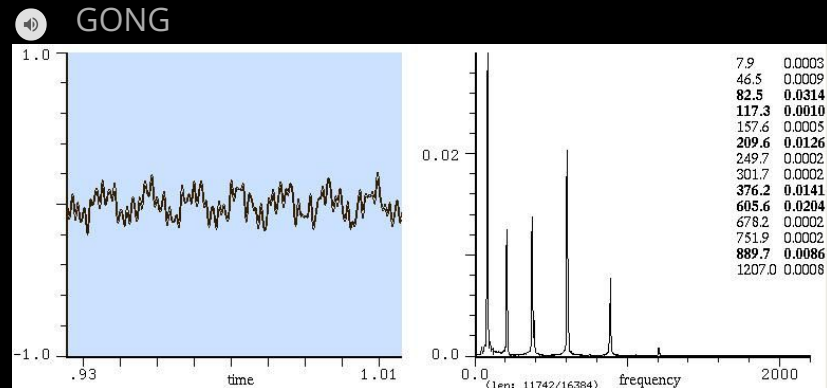
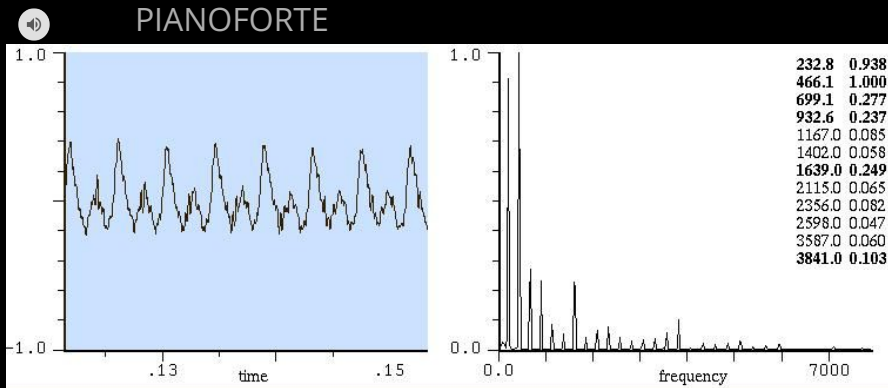
Parziali Armoniche
[2f, 3f, 4f, 5f, ... , nf]

dove n è un numero intero



Se le parziali non sono multipli interi della fondamentale, queste sono chiamate **PARZIALI INARMONICHE**. I suoni costituiti da parziali inarmoniche non sono periodici e solitamente considerati rumorosi o non musicali.

FORMA D'ONDA - Frequenza fondamentale, Parziali armoniche ed inarmoniche



Mauro Graziani - Dispense di Acustica per Musicisti

https://www.maurograziani.org/text_pages/acoustic/acustica/MG_Acustica06.html

FORMA D'ONDA - L'onda quadra

L'onda quadra è un suono complesso periodico molto utilizzato nella musica elettronica.

È composto dalla frequenza fondamentale e solo parziali dispare, quale ampiezza è divisa dall'ordine dell'armonica

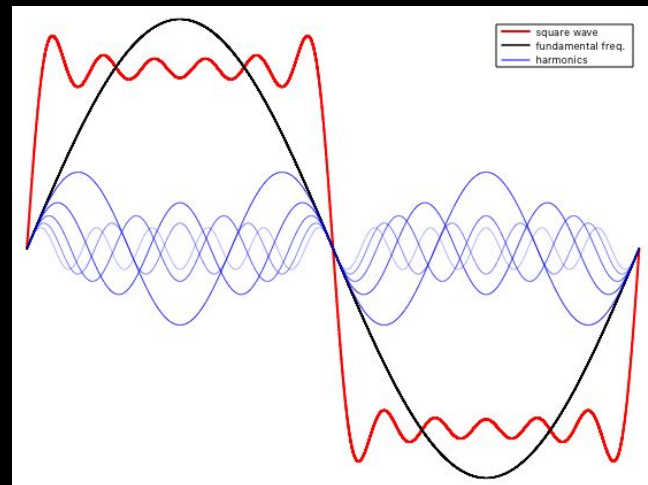
$$\sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2\pi f_n t)$$

n = Ordine armonica (solo dispari)

f = Frequenza (f_1 = frequenza fondamentale; f_3, f_5, f_7, f_n = parziali armoniche)

$A \cdot \sin(2\pi f t)$ = Formula senoide

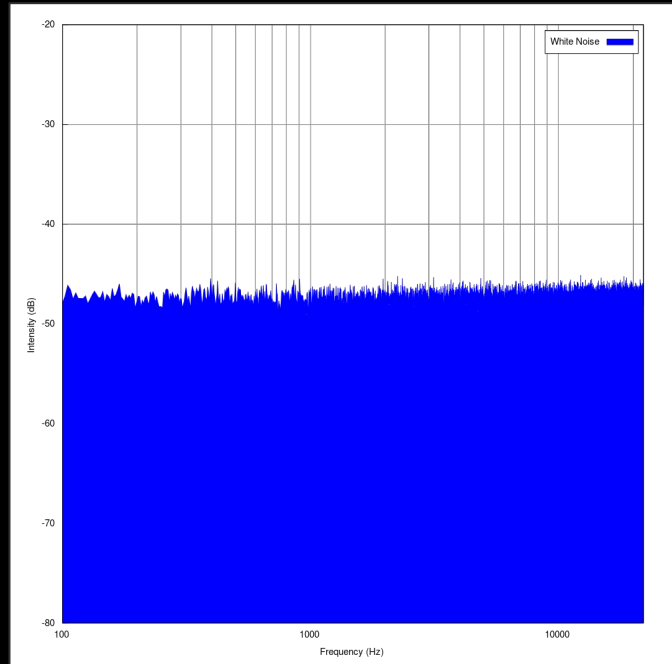
t = Tempo



FORMA D'ONDA - Rumore bianco

Il rumore bianco è il caso limite della non periodicità ed inarmonicità, il cui spettro contiene tutte le frequenze alla stessa ampiezza.

È detto rumore bianco come paragone con il fenomeno luminoso, in cui la luce bianca presenta tutte le lunghezze d'onda con la stessa intensità



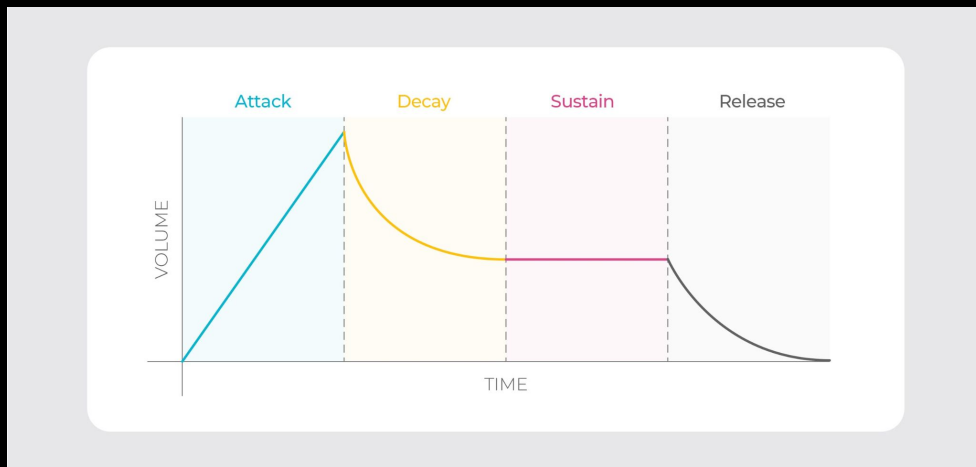
TRANSITORI

Ogni suono in natura ha un “macro-andamento” temporale. Fino ad ora si è visto l’andamento temporale “microscopico”, ossia quello che fa riferimento alla periodicità del suono (in cui il periodo più lungo che possiamo ascoltare è di 1/20 di secondo, 0.05 secondi). Tuttavia l’ampiezza generale del suono si evolve anche macroscopicamente (sopra 1/20 di secondo, fino al minuto e oltre).

L’ampiezza di un suono si evolve nel tempo in modo caratteristico, *transitando* da un condizione di riposo a una condizione di vibrazione periodica fino ad una condizione in cui si estingue.

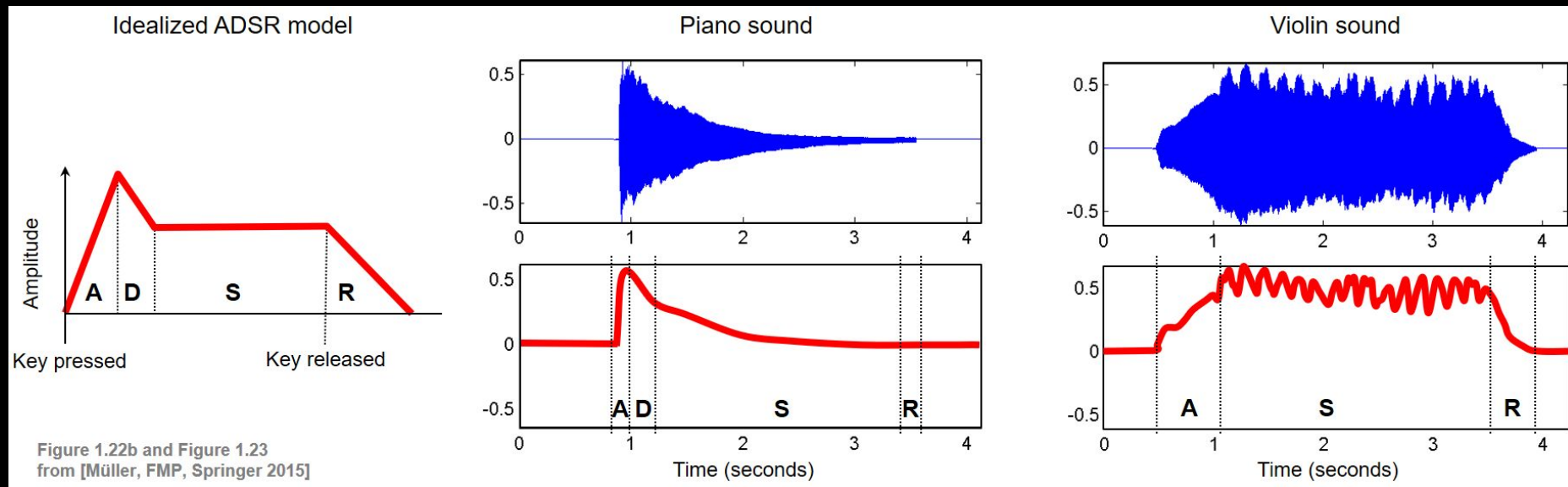
Per ogni suono si possono individuare quattro fasi, o **transitori**, che verranno realizzate in modo differente dalle varie sorgenti sonore.

- **Attacco:** in cui l’ampiezza varia da zero alla massima ampiezza;
- **Decadimento:** in cui l’ampiezza diminuisce fino ad un certo livello;
- **Sostegno:** in cui l’ampiezza rimane pressappoco costante;
- **Estinzione:** in cui l’ampiezza diminuisce fino a zero.



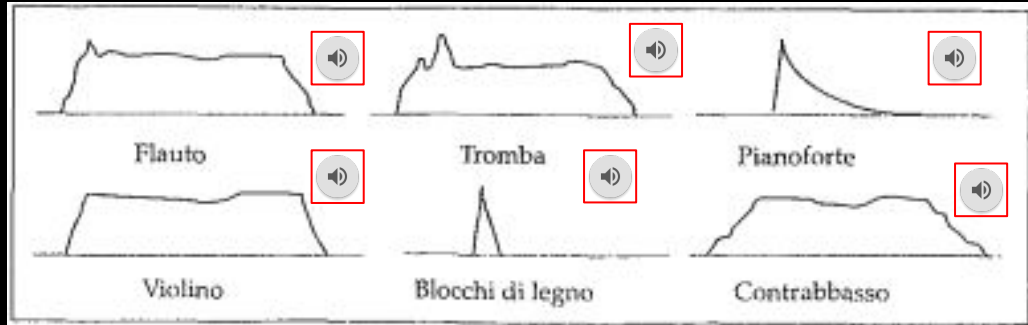
TRANSITORI - *Involuppo d'ampiezza ADSR*

L'evolversi dell'ampiezza di un suono in funzione del tempo e nei quattro transitori è chiamato **INVILUPPO D'AMPIEZZA**. Nella musica elettronica è spesso nominato con l'acronimo **ADSR** (*Attack Decay Sustain Release*)



TRANSITORI - *Inviluppo d'ampiezza ADSR*

L'inviluppo di ampiezza è molto importante nel riconoscimento delle sorgenti sonore, in special modo degli strumenti musicali.



RIFERIMENTI

- Lombardo, Vincenzo, and Andrea Valle. *Audio e multimedia*. Maggioli Editore, 2014. **CAPITOLO 1 – ACUSTICA**
- Cipriani, Alessandro, and Maurizio Giri. *Musica elettronica e sound design: teoria e pratica con MaxMSP*. ConTempoNet., 2013. **Da p.7 a p.32**
- Mauro Graziani - *Dispense di Acustica per Musicista* https://www.maurograziani.org/text_pages/acoustic/acustica/MG_Acustica06.html

Altro

- Approfondimenti sulla Trasformata di Fourier → <https://www.thefouriertransform.com>