

La descrizione fisica del segnale sonoro

Prof. Farabegoli Giorgio



I.T.T. “Marie Curie” di Savignano sul Rubicone (FC)

g.farabegoli@libero.it

La natura fisica del segnale Sonoro

- Il suono è generato dalla variazione di pressione in un mezzo materiale (fluido o solido) che si propaga senza trasporto di materia.
- Quando l'onda sonora è passata, ogni mezzo sulla traiettoria torna alla posizione originale.
- Esso è caratterizzato da alcune grandezze fondamentali quali: **ampiezza, frequenza (o periodo di oscillazione), lunghezza d'onda e velocità di propagazione.**



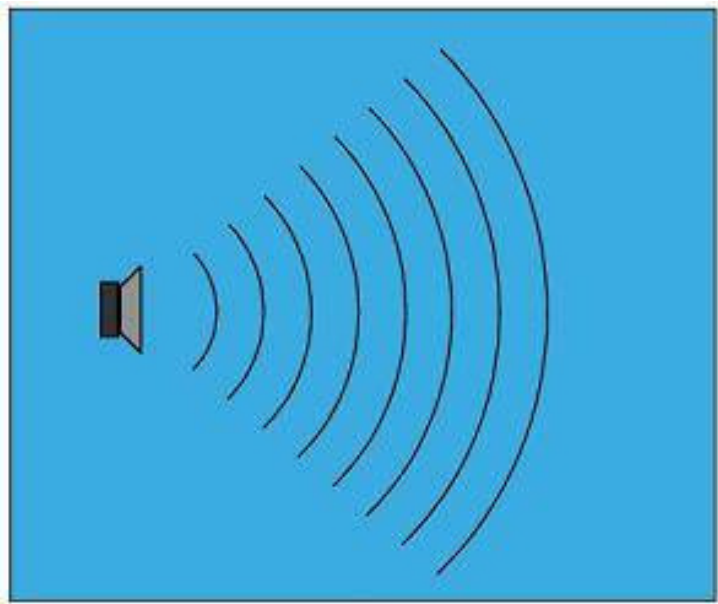
Il **segnale sonoro** è caratterizzato dalla propagazione di energia meccanica dovuta a compressioni ed espansioni di un **mezzo elastico**.



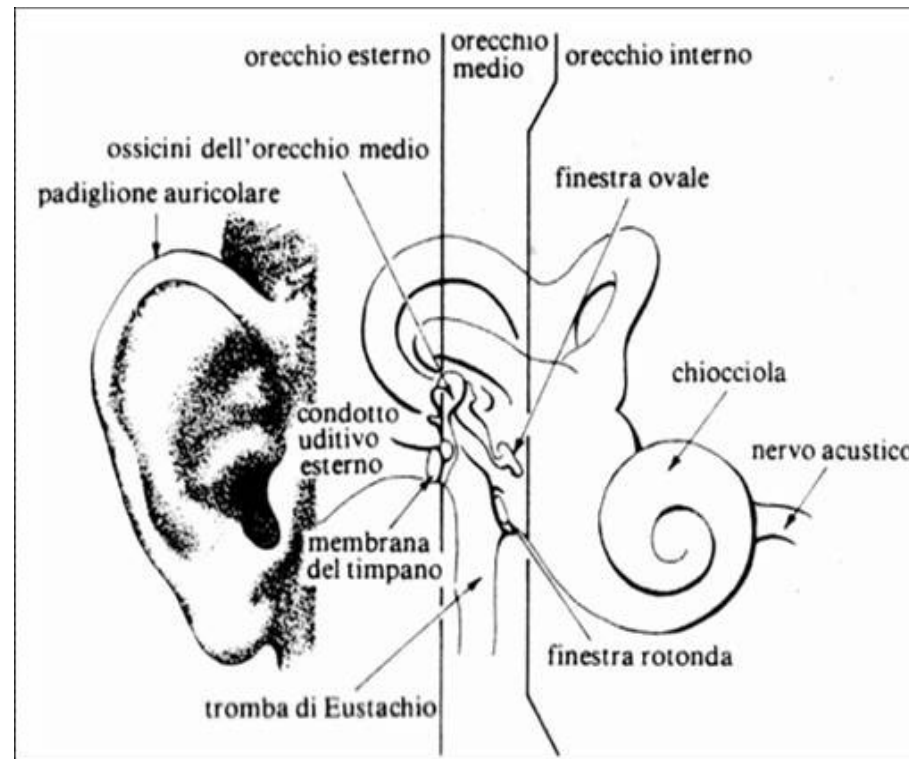
Tale energia, che ha origine in una **sorgente** sonora, si propaga nel mezzo stesso con onde di velocità finita.

Il suono in azione

- produzione: creato da una sorgente sonora.
- propagazione: trasmissione in un mezzo elastico.



- percezione: sensazioni su sensi (le orecchie che percepiscono il suono) ed emozioni (nervi e cervello che elaborano l'informazione sonora).
- Produzione e percezione non sono lineari.



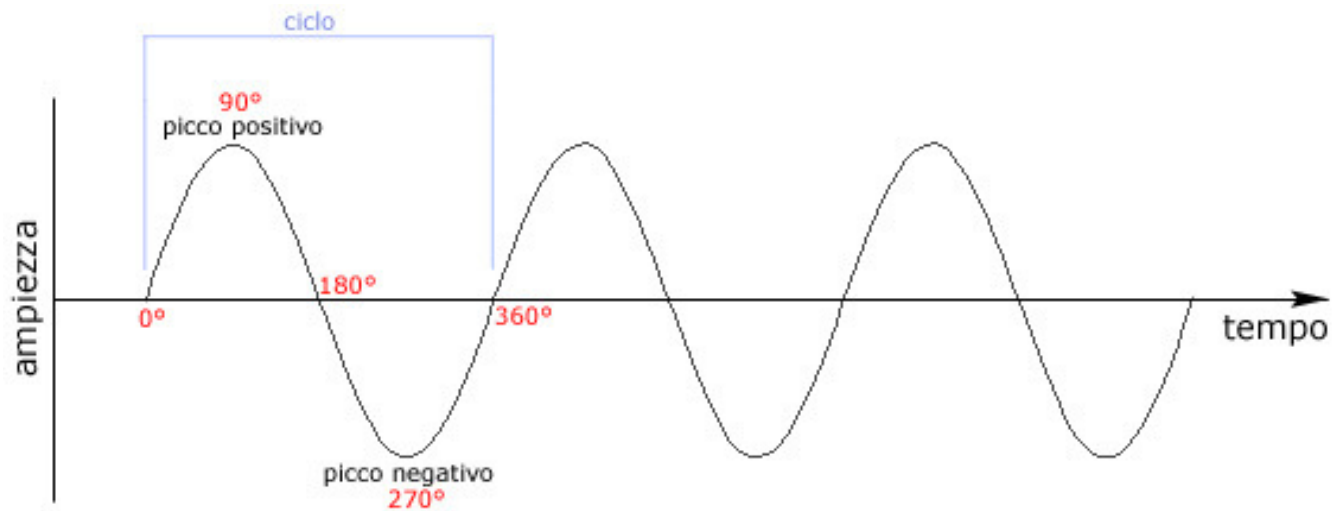
Produzione del suono

- tutte le sorgenti sonore oscillano, ad esempio:
 - la colonna d'aria in un flauto;
 - la corda di una chitarra.
- ogni vibrazione è detta ciclo.
- ogni segnale sonoro comprende molte vibrazioni
→ molti cicli.



Il moto armonico semplice

- Rappresenta la vibrazione che corrisponde al suono più semplice: onda sinusoidale.
- La scienza delle onde sonore è costruita su combinazioni di onde sinusoidali.
- Equazione generica onde sinusoidali: $y = y_0 \sin(\omega t + kx)$



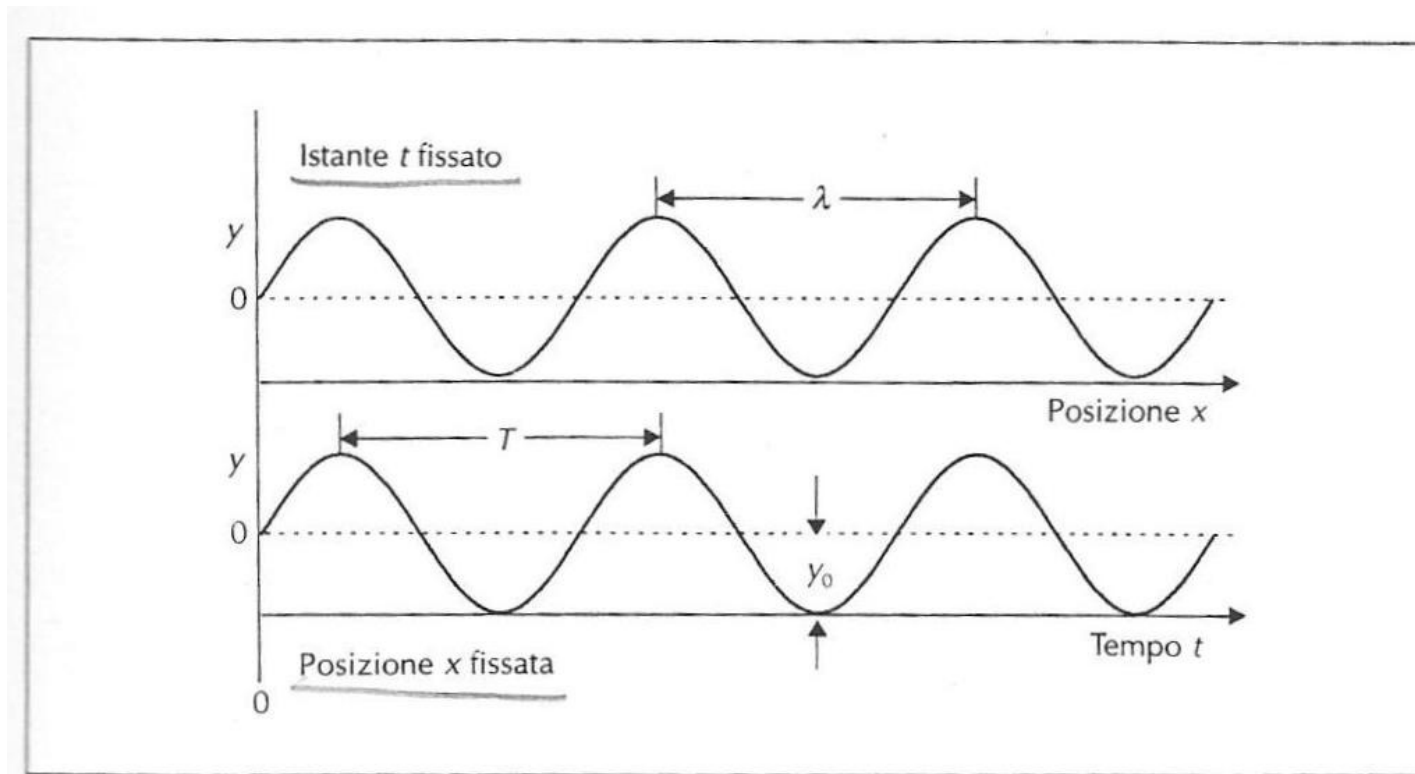
la fase è misurata in gradi

Parametri delle onde sinusoidali

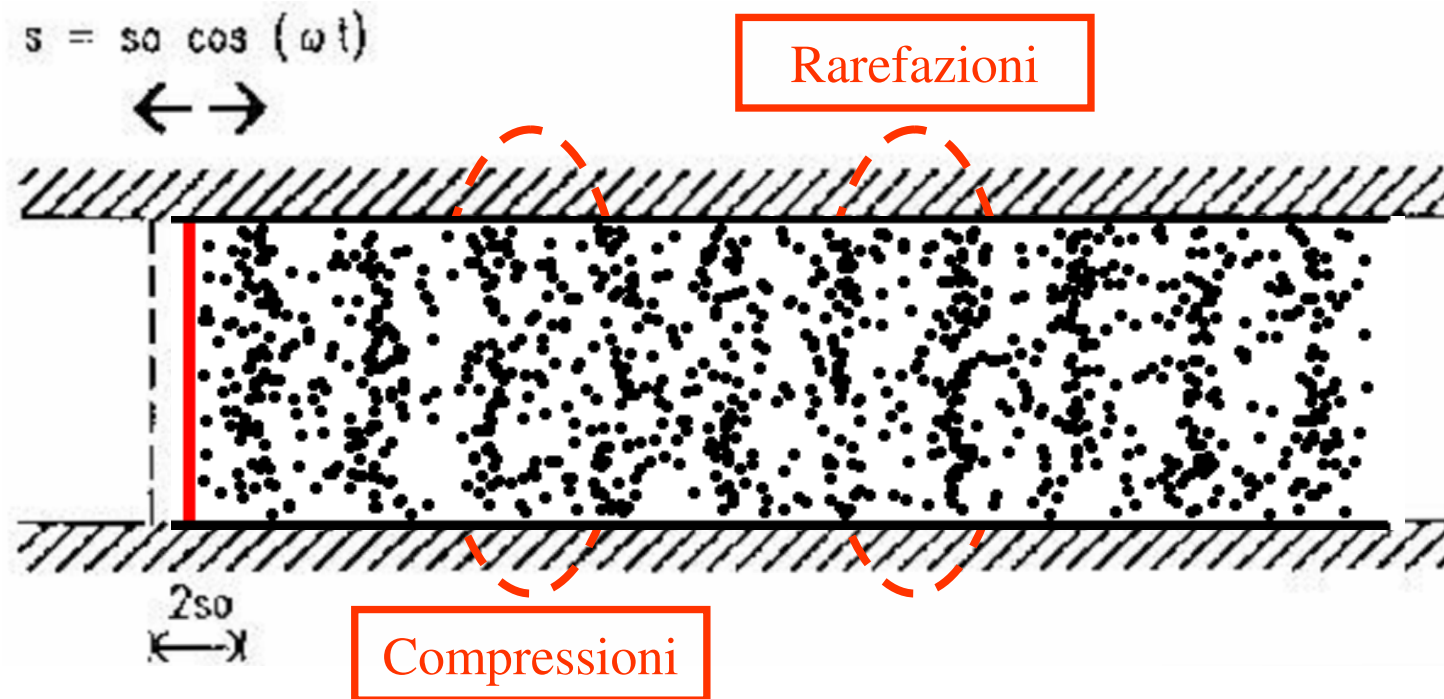
- Lunghezza d'onda λ : distanza tra 2 massimi consecutivi dell'onda;
- Periodo T: tempo necessario per compiere un'intera oscillazione (ciclo);
- Frequenza f: numero di oscillazioni in un secondo ($f = 1/T$);
- Ampiezza y_0 : massima deviazione dalla posizione di equilibrio;
- Fase φ : posizione dell'onda rispetto ad un istante (si può esprimere in termini di angolo in relazione all'inizio dell'onda);
- Pulsazione o velocità angolare ω : $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$.
- Numero d'onda k: $k = 2\pi/\lambda$.

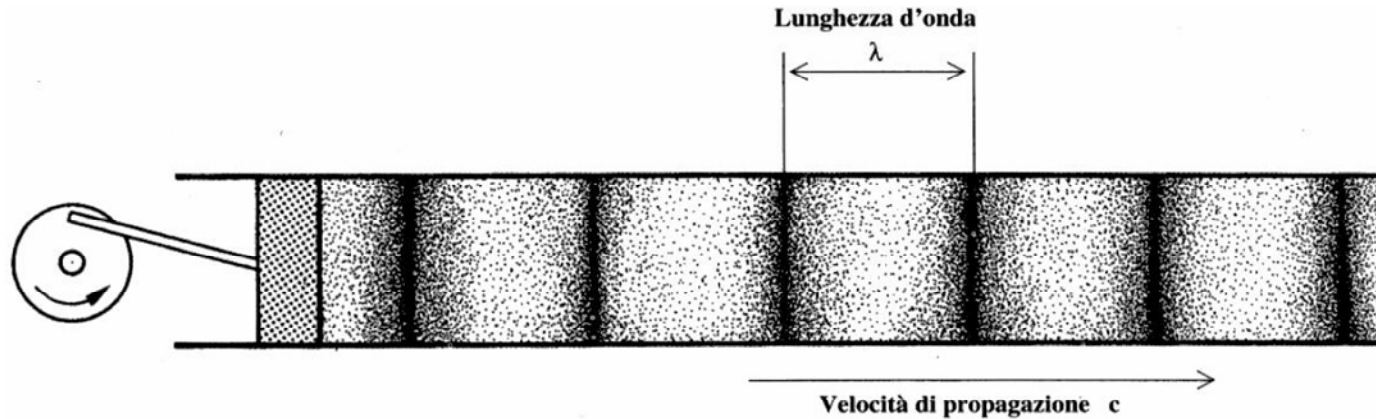
Esempi di onda piana sinusoidale pura, rappresentata in funzione:

- della posizione ad un tempo t fissato;
- del tempo ad una posizione x fissata.



Esempio di sorgente sonora: superficie piana (es. pistone) che si muove di moto armonico semplice ad una estremità di un condotto di lunghezza infinita nel quale si trova un mezzo elastico (es. aria) in quiete.





Il moto armonico del pistone è caratterizzato dalla **frequenza f** con cui la superficie piana si muove.

- **f = frequenza**, numero di cicli compiuti dalla superficie piana in un secondo, si misura in Hz;
- **T = periodo**, tempo necessario a compiere un ciclo, si misura in s;
- **ω = velocità angolare o pulsazione**, si misura in rad/s.

Relazioni tra le grandezze: $f = 1/T$ e $f = \omega/2\pi$

Se la frequenza f del fenomeno è compresa tra 20 Hz e 20000 Hz, la perturbazione è percepita dall'orecchio dell'uomo e si parlerà di fenomeno acustico o sonoro.

Velocità di propagazione delle onde sinusoidali

La perturbazione, generata nel mezzo elastico dal movimento delle particelle a contatto con la superficie vibrante della sorgente, si propaga con una **velocità c** che, nel caso di aria con umidità relativa al 50% e temperatura t ($^{\circ}\text{C}$), vale:

- $c = 332 + 0.551 \cdot t$ [m/s]

la **lunghezza d'onda λ** , fissata la frequenza f del moto armonico della sorgente, dipende dal valore della velocità c secondo la relazione:

- $\lambda = \frac{c}{f} = cT$ [m]

Alcuni esempi di velocità di propagazione delle onde

- Velocità del suono in aria a 20°C con umidità relativa al 50%:

≈ **343 m/s**

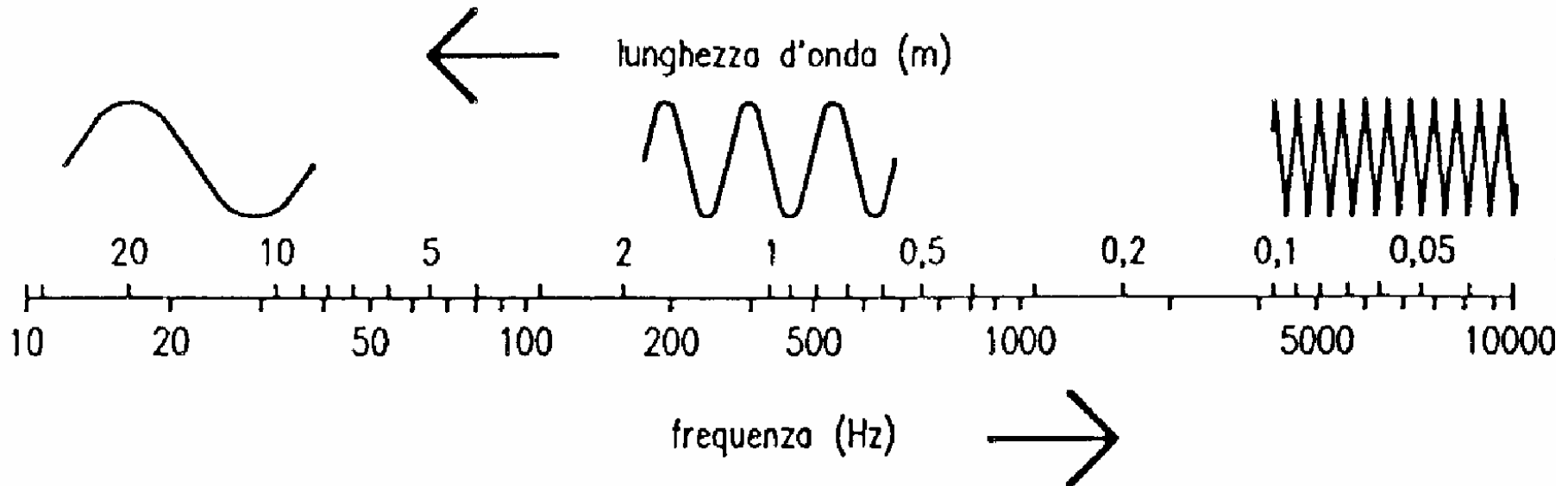
- Velocità del suono in acqua distillata:

Temperatura T_c [°C]	Velocità del suono c [m/s]
0	1407
10	1449
20	1484
30	1510

- Velocità del suono in mezzi diversi:

Materiale	Densità ρ_0 [kg/m ³]	Velocità del suono c [m/s]
Acciaio	7800	5000
Alluminio	2700	5820
Calcestruzzo	2000 – 2600	3500 – 5000
Gomma	1010 – 1250	35 – 230
Legno	400 – 700	3300
Marmo	2600	3800
Mattoni pieni	2100	3600
Piombo	11300	1260
Rame	8900	4500
Sabbia	1600	1400 – 2600
Stagno	7280	4900
Sughero	240	480
Vetro	2300 – 5000	4000 – 5000
Zinco	7100	3750

Legame tra lunghezza d'onda e frequenza



All'aumentare della frequenza si riduce la lunghezza d'onda della perturbazione sonora!

I suoni puri

I suoni puri simili al suono prodotto da un diapason.
Ad esempio:



Onda sinusoidale a 220 Hz



Onda sinusoidale a 440 Hz



Onda sinusoidale a 660 Hz

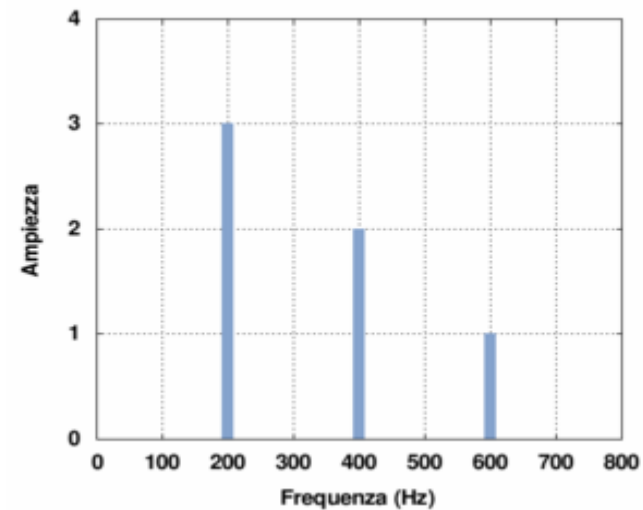
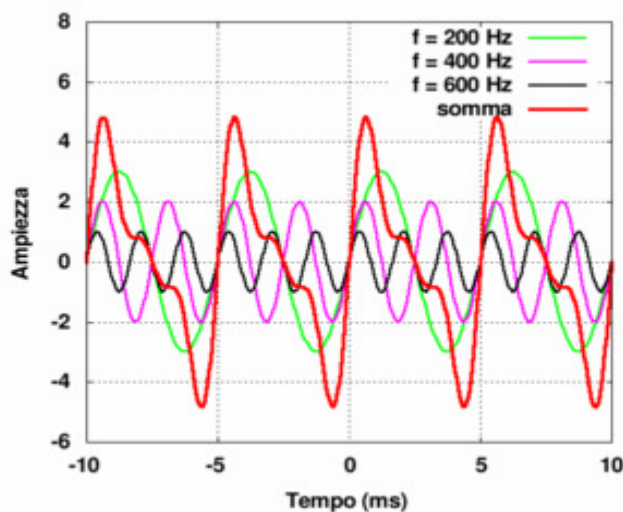
I suoni complessi: analisi con Teorema di Fourier

- La **serie di Fourier** è uno strumento matematico che consente di dare una rappresentazione di un qualsiasi segnale periodico attraverso la somma di un numero molto grande di componenti sinusoidali, caratterizzate ciascuna dalla propria ampiezza e fase iniziale, e le cui frequenze sono armoniche della frequenza fondamentale del segnale.
- Anziché disegnare il grafico della funzione periodica, ne rappresenta direttamente il contenuto mediante **spettrogrammi**, cioè un sistema di assi cartesiani avente in ascissa le frequenze delle armoniche (tutte multiple della frequenza della fondamentale) e in ordinata l'ampiezza di ciascuna armonica.

Esempio di grafico e contenuto spettrale

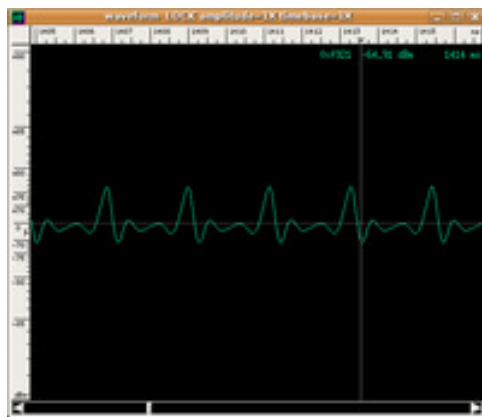
$$y(t) = 3 \cdot \sin(400\pi t) + 2 \cdot \sin(800\pi t) + \sin(1200\pi t)$$

- Equazione costituita dalla sovrapposizione di tre parziali armoniche di ampiezze 3,2,1 e frequenze 200, 400, 600 Hz.
- Il contenuto spettrale dell'onda periodica, disegnato per un intervallo di periodicità della funzione $y(t)$ pari a $T = 5$ ms (cioè frequenza pari a 200 Hz, che è quella della fondamentale) appare, nel dominio delle frequenze, costituito da una serie di linee verticali.

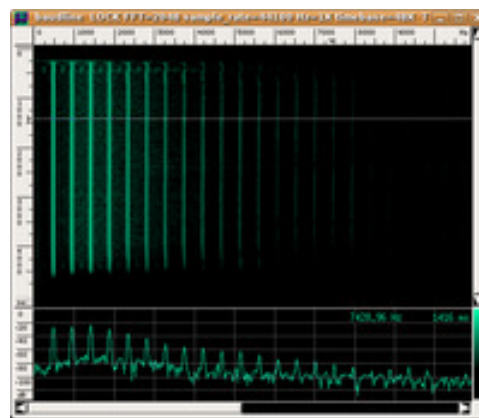


Trasformata di Fourier

- La Trasformata di Fourier, di cui la serie di Fourier può ritenersi un caso particolare, consente di dare una rappresentazione nel dominio delle frequenze anche di un segnale non periodico: una funzione non periodica può essere "ricostruita" a partire da onde sinusoidali di **qualsiasi frequenza**.
- In questo caso il grafico del contenuto spettrale anziché essere rappresentato da picchi verticali netti, sarà formato da una distribuzione continua, che comunque permette di cogliere gli intervalli di frequenze che più contribuiscono alla formazione della funzione non periodica.
- Le onde reali, ad esempio il suono degli strumenti musicali, non sono periodiche ed evolvono, insieme ai loro contenuti spettrali, nel tempo.



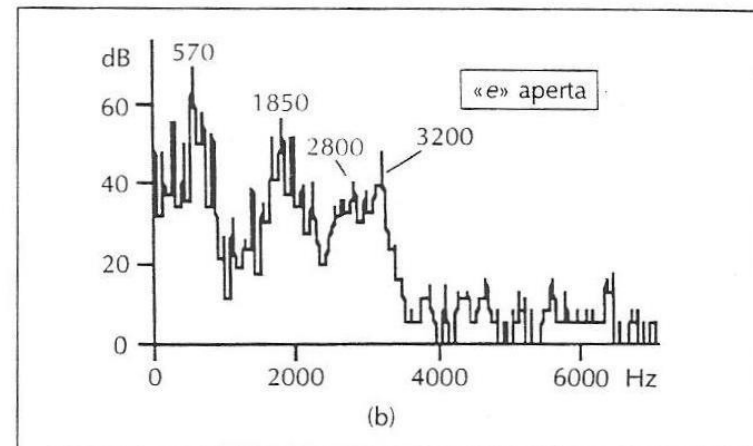
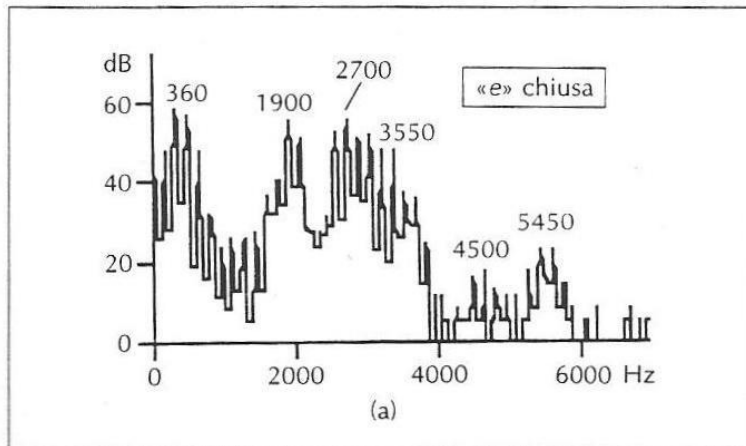
Forma d'onda



Spettrogramma

2 esempi di spettrogramma

(figura tratta dal testo “Fisica nella musica” di Andrea Frova).






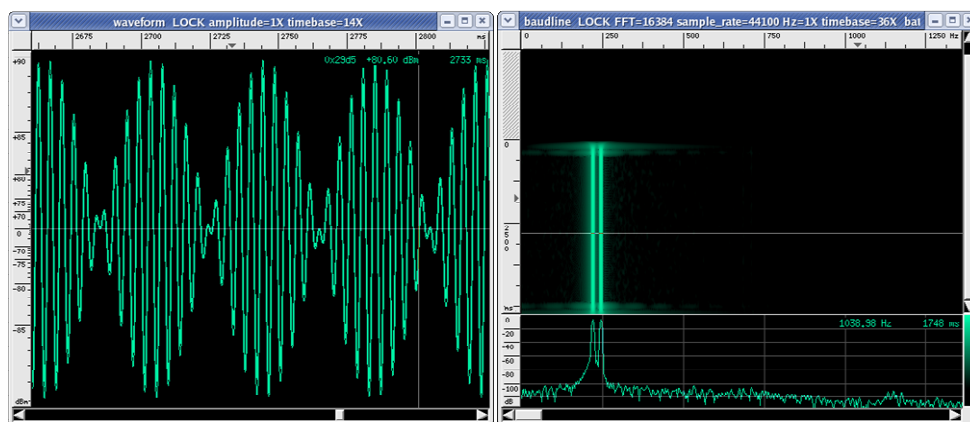
- Spettrogramma della vocale “e” chiusa emessa da una voce maschile (figura a sinistra).
- Spettrogramma della vocale “e” aperta emessa dalla stessa voce (figura a destra).

Il rumore

- Il termine “rumore” nel linguaggio quotidiano indica qualcosa di indistinto e caotico, ed è usualmente utilizzato per indicare tutti i suoni non organizzati, non piacevoli, o non voluti.
- In ambito scientifico diversi tipi di rumore possono essere quantitativamente caratterizzati studiandone il contenuto spettrale.
- La classificazione del rumore è di fondamentale importanza nello studio di tutti quei segnali che contengono delle componenti casuali, e trova impiego nella tecnologia del suono.

Suono o rumore?

- Suono puro a 220 Hz: 
- Suono puro a 245 Hz: 
- Sovrapposizione di 2 suoni puri a 220 Hz e 245 Hz: 

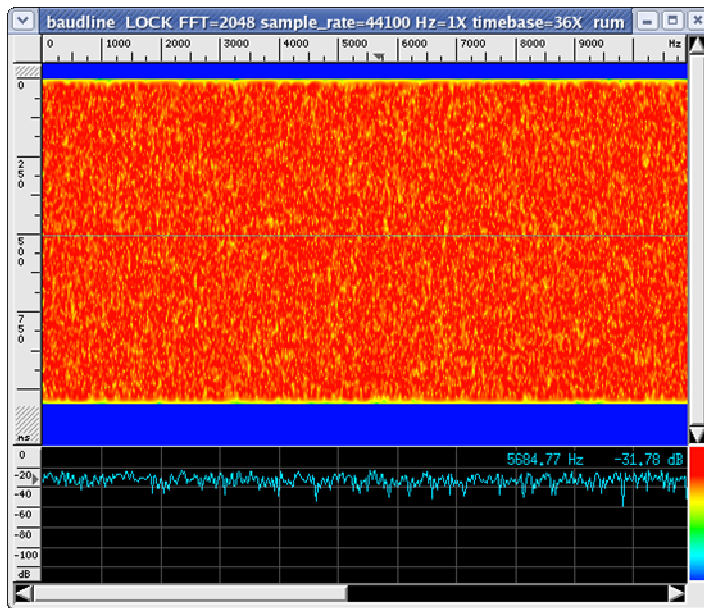


Forma d'onda e spettrogramma
sovrapposizione di 2 suoni puri
a 220 Hz e 245 Hz

- Grazie a questo esempio verificiamo all'ascolto che la periodicità di un'onda non è condizione sufficiente per chiamare suono ciò che udiamo.
- Dal grafico si vede che abbiamo un'onda periodica, però all'ascolto percepiamo una sensazione di rumore.
- In acustica tale sovrapposizione di 2 suoni puri a frequenze vicine si chiama battimento.
- In questo caso la sensazione di rumore, pur in presenza di onde periodiche, è dovuta al fatto che il nostro udito viene “confuso” se investito da suoni di frequenze troppo vicine, e, incapace di discriminare la loro singola altezza, percepisce un suono di altezza intermedia, ma dal carattere “ruvido”, rumoroso.

Tipi di rumore: Rumore bianco

- Analogamente alla luce bianca, formata dalla sovrapposizione di onde elettromagnetiche di tutte le frequenze visibili, il rumore bianco è costituito da uno spettrogramma sostanzialmente "piatto" con onde di tutte le frequenze e d'intensità simile per ogni frequenza.
- Il rumore bianco, ricco di alte frequenze, suona stridulo, dovuto a un eccesso di brillantezza.

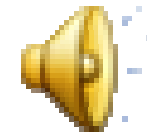
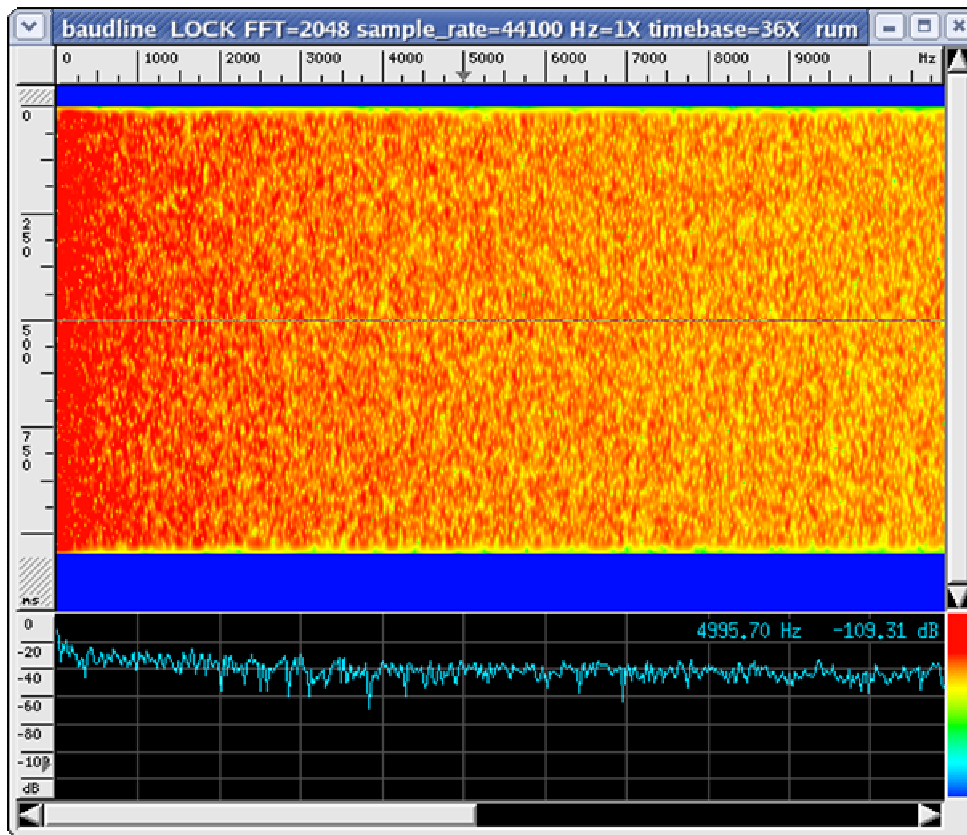


Rumore bianco

Rumore rosa

- Esistono vari tipi di rumore, detti colorati, caratterizzati dal fatto di avere alcune componenti spettrali prevalenti sulle altre.
- Il rumore rosa ha una prevalenza dell'ampiezza, e quindi dell'intensità, delle onde a bassa frequenza.
- Si può ottenere dal rumore bianco con un'apposita azione di filtraggio delle alte frequenze.
- L'intensità, decresce, da un'ottava all'altra, con l'inverso della frequenza (si ha un'attenuazione, in scala logaritmica, di 3 dB/ottava).
- Il rumore rosa trova applicazione anche negli ambienti di registrazione per dare corpo al suono a basse frequenze, poiché a tali frequenze il nostro orecchio soffre di calo di prestazioni.
- Questo tipo di rumore è strutturato in modo tale da compensare la differente sensibilità dell'orecchio umano alle varie frequenze, e viene utilizzato per equalizzare il suono in ambito professionale, in modo tale da conferire al segnale sonoro la stessa energia percepita per ogni ottava.

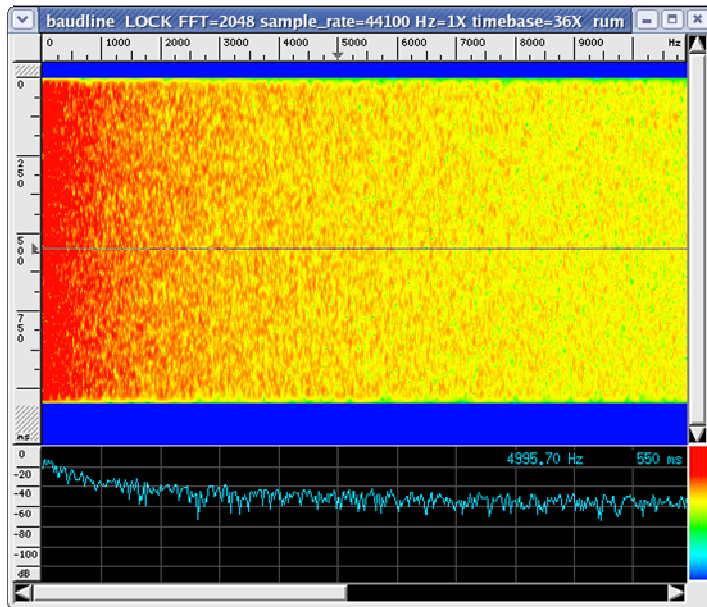
Rumore rosa



Rumore rosa

Rumore marrone

- In questo tipo di rumore vi è un'accentuazione ancora maggiore, rispetto al rumore rosa, della presenza di basse frequenze.
- L'ampiezza delle onde, e quindi l'intensità, decresce, da un'ottava all'altra, con l'inverso del quadrato della frequenza (si ha un'attenuazione, in scala logaritmica, di 6 dB/ottava).
- Il rumore marrone assomiglia ad un rombo di tuono.



Rumore marrone

Bibliografia

- Frova Andrea, “Fisica nella musica”, Zanichelli editore.
- Farina Angelo, dispense in PowerPoint del corso di “Acustica applicata”, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma.
- Buccignone Giuseppe, “Corso di principi e modelli della percezione”, Dipartimento di Scienze dell’Informazione, Università di Milano.
- “Fisica, Onde, Musica”, sito prodotto dal Dipartimento di Fisica dell’Università di Modena e Reggio Emilia:
<http://fisicaondemusica.unimore.it/>
- Wikipedia, enciclopedia libera online: <http://it.wikipedia.org>