



# Acustica

## Parte 1

---

Prof. Filippo Milotta  
milotta@dmi.unict.it



# Suono e Audio

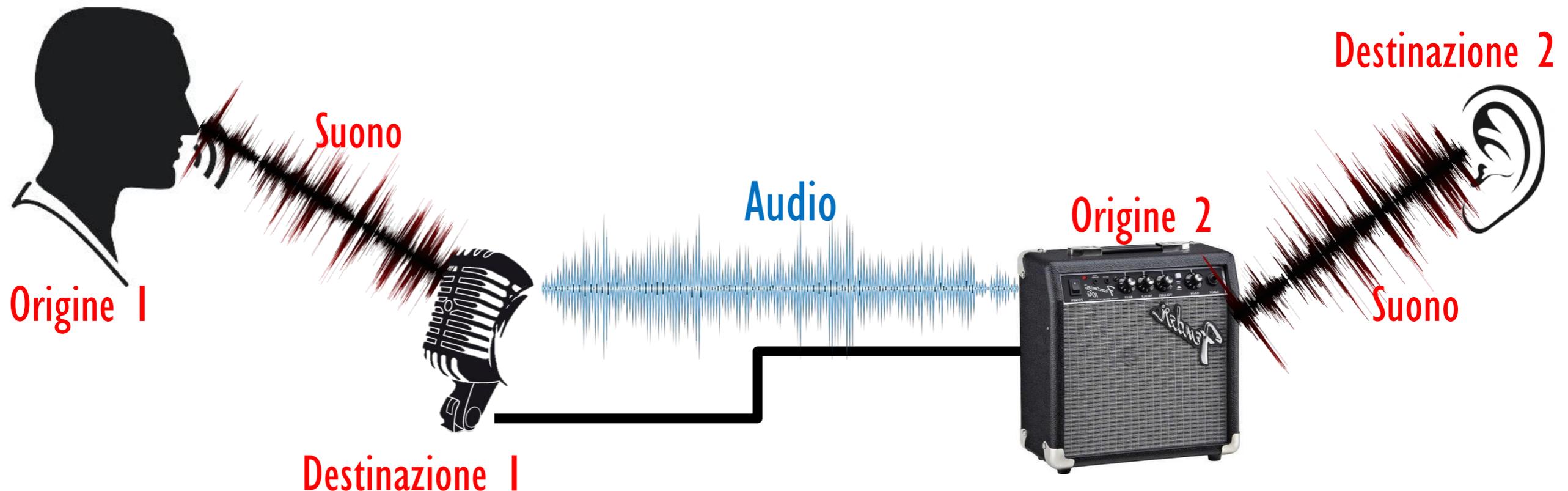
Il **suono** è un insieme di onde meccaniche longitudinali. L'oggetto che origina il suono produce una vibrazione che si propaga attraverso un mezzo modificando nel tempo la pressione locale delle particelle che lo costituiscono.





# Suono e Audio

L'audio è un **segnale elettromagnetico** che rappresenta e trasporta informazione sonora. L'audio e il suono sono quindi fisicamente differenti, in particolare il primo permette di trasmettere il secondo facendolo viaggiare attraverso apparecchiature elettroniche.



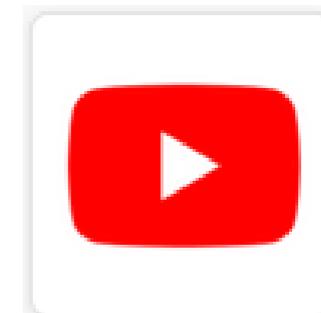
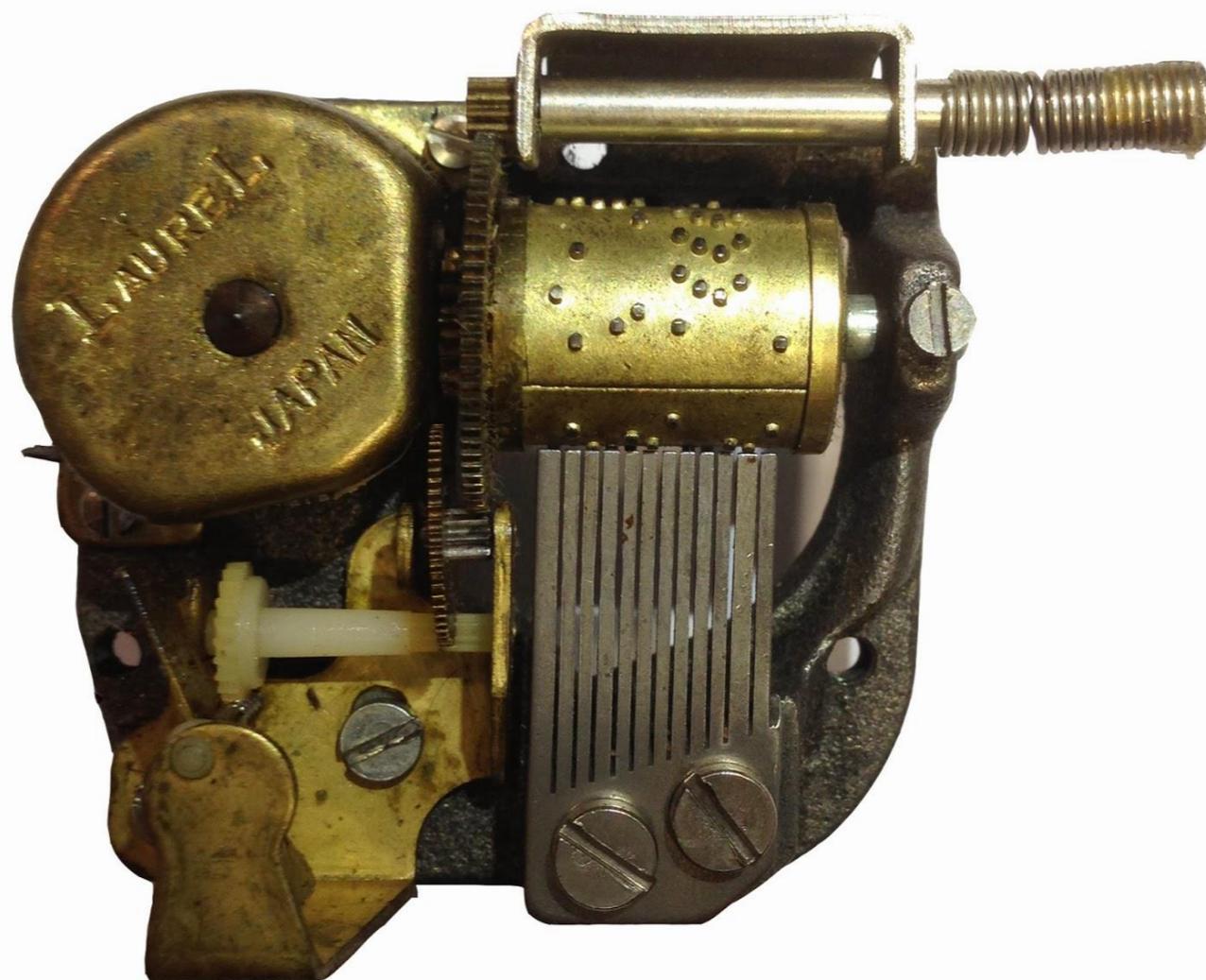


# Storia

- Riproduzione di suoni pre-registrati e registrazione non automatica (IX secolo).
- Registrazione automatica di suoni arbitrari, ma impossibili da riprodurre (1857).
- Riproduzione e registrazione di suoni arbitrari (1877).



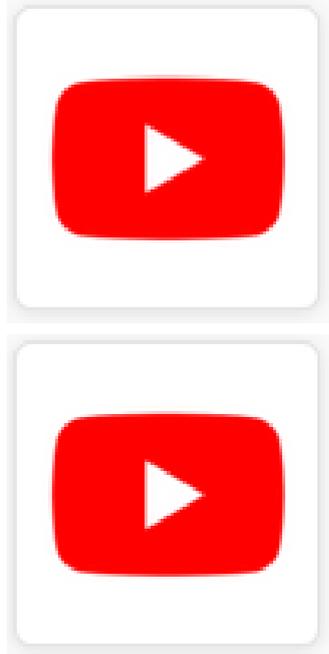
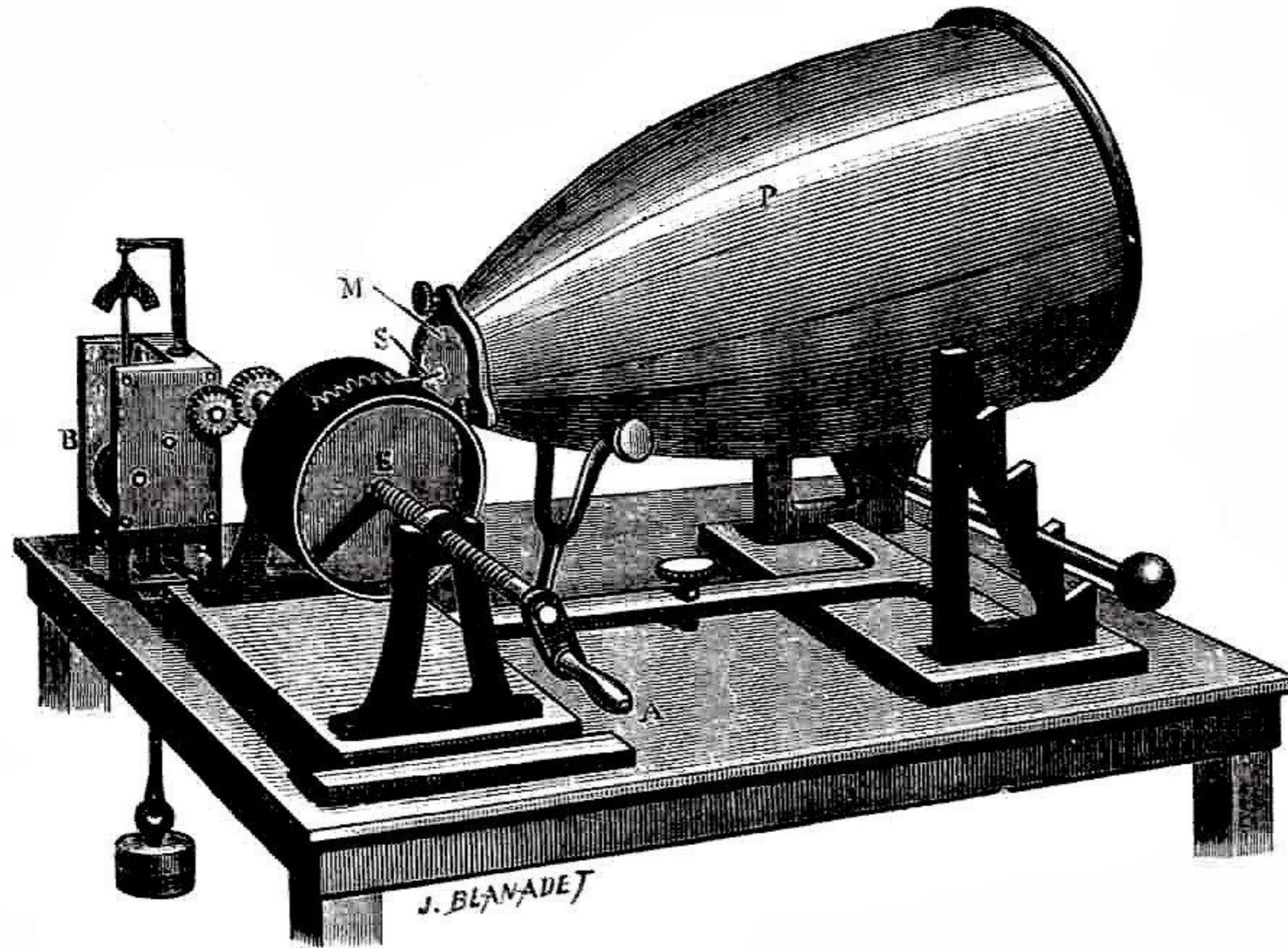
# Storia – Carillon (XIV secolo)



<https://www.youtube.com/watch?v=OsjG1aEdogw>



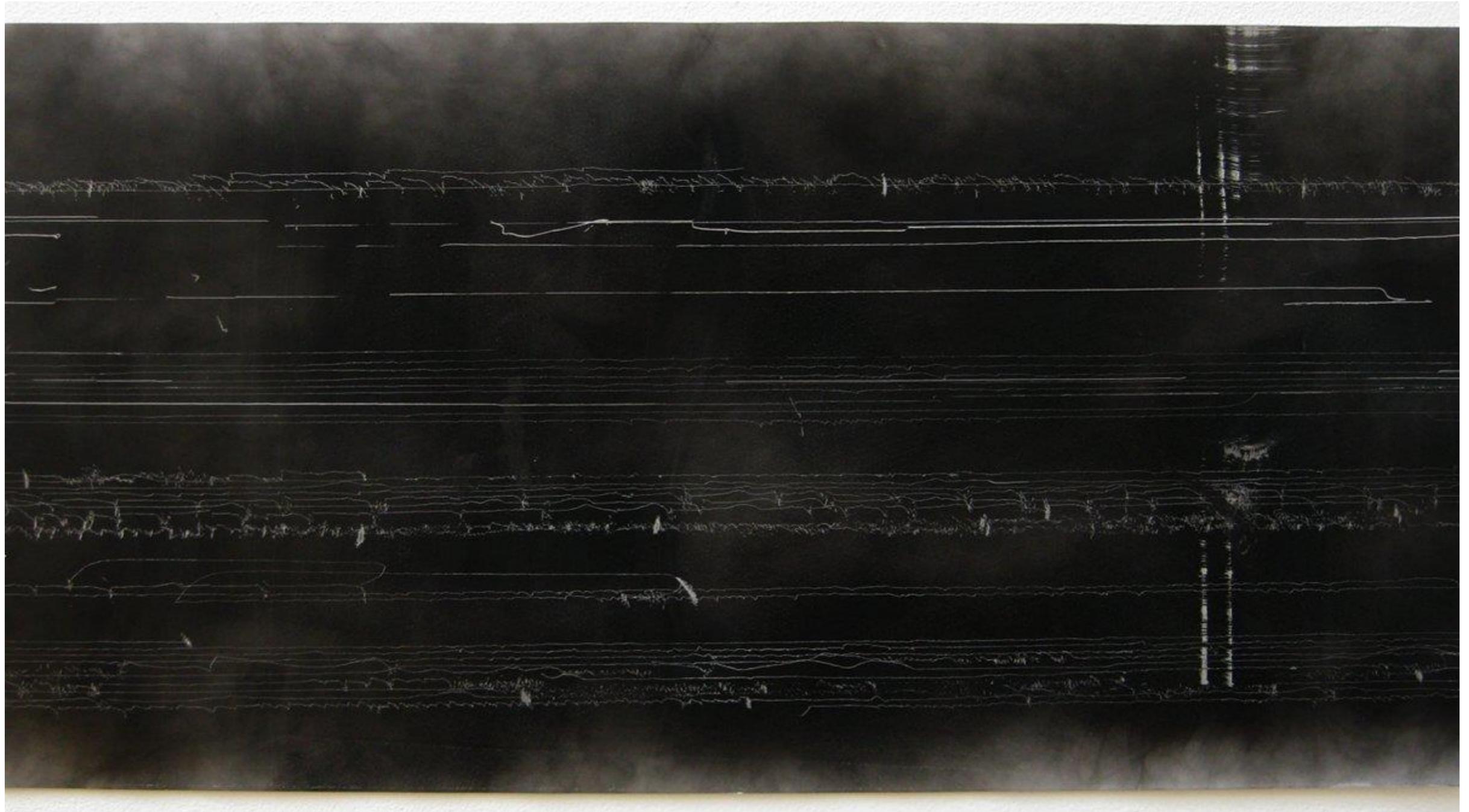
# Storia – Fonautografo (1857)

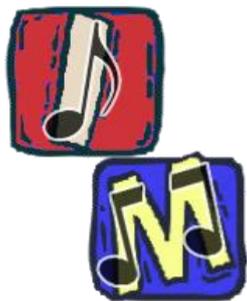


<https://www.youtube.com/watch?v=znKNQXo58pE>

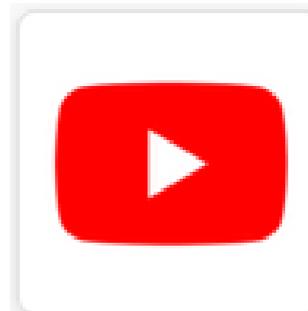
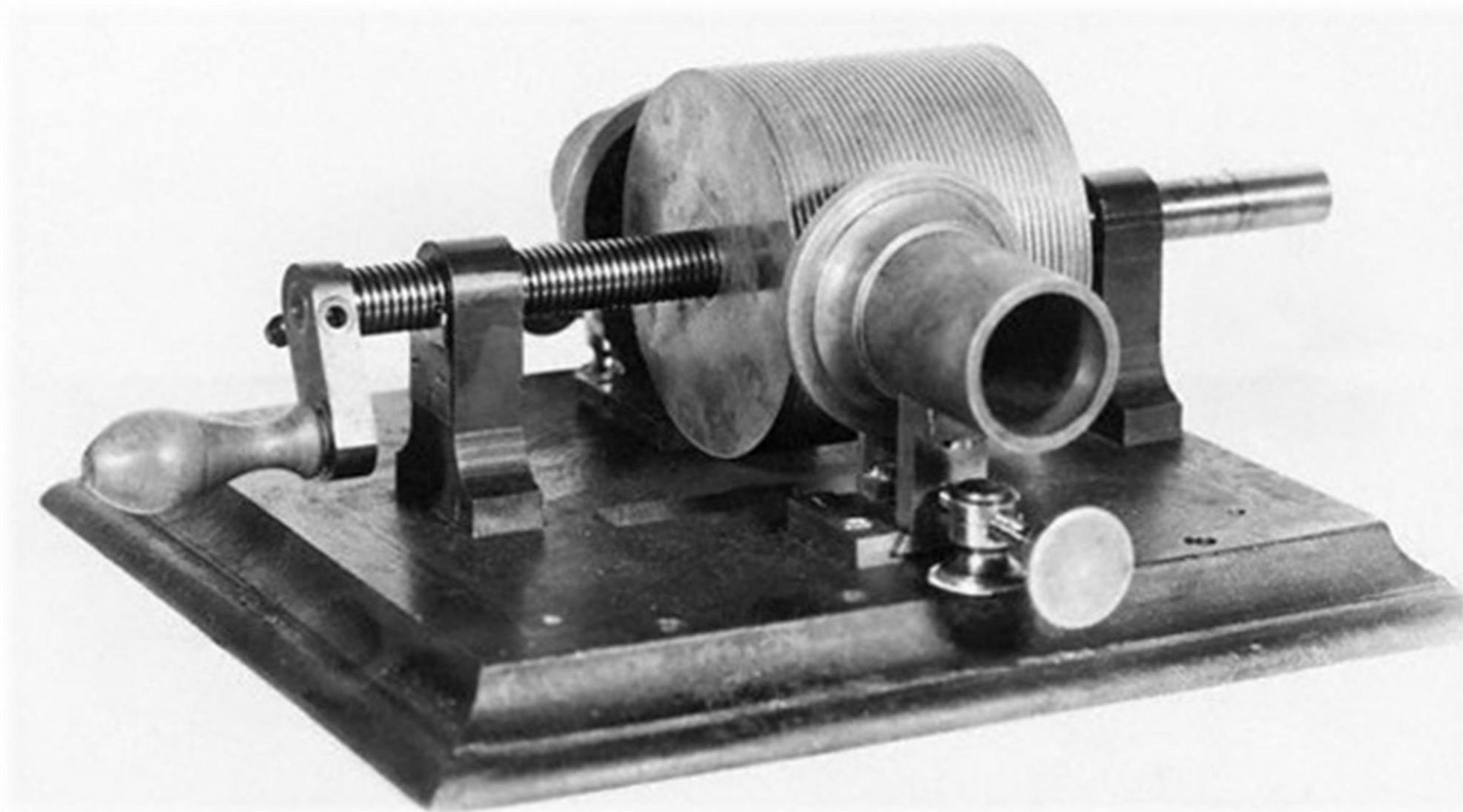


# Storia - Fonautogramma





# Storia – Fonografo (1877)

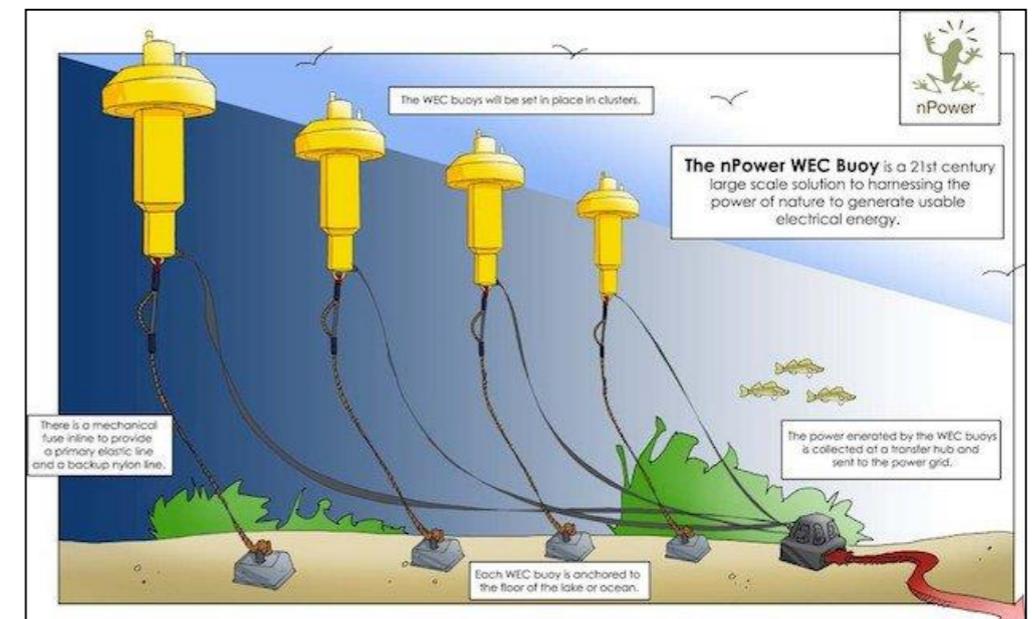
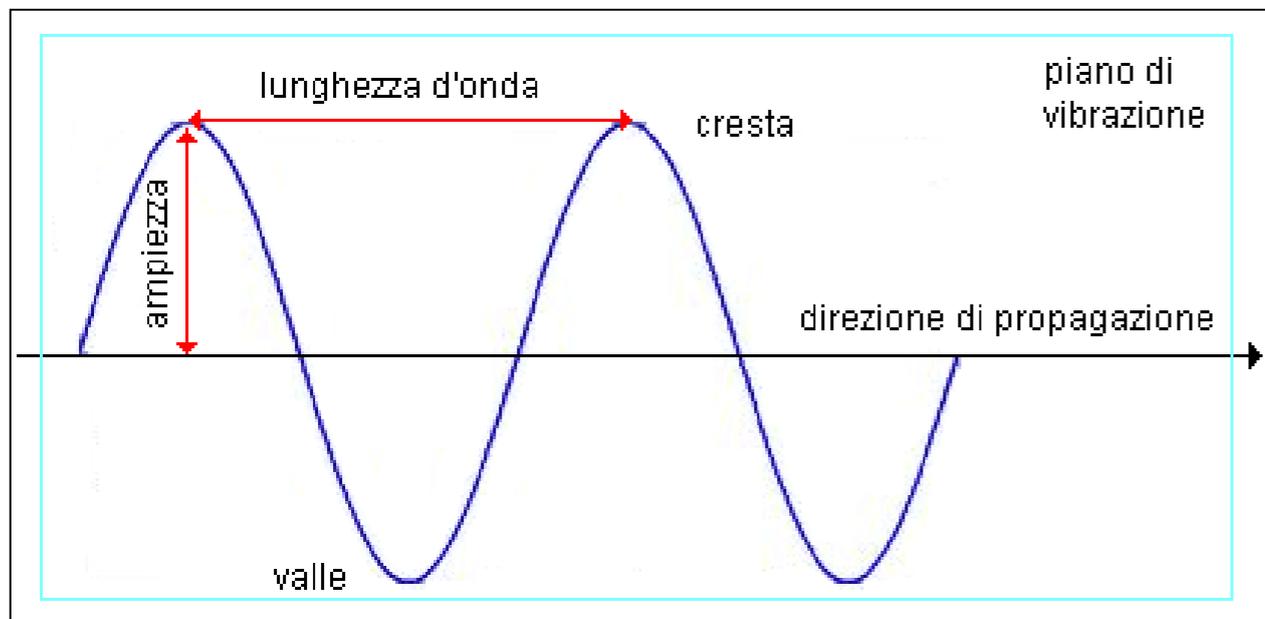


<https://www.youtube.com/watch?v=YBXyuY2J20o>



# Definizione di onda

- Spostamento di energia a cui non è associato spostamento di materia





# Cenni sulle onde

Un'onda è una perturbazione di una grandezza fisica che si propaga nel tempo trasportando energia o quantità di moto.

## Classificazione:

- Rispetto al mezzo di propagazione.
- Rispetto alla **direzione** di movimento delle particelle.
- Rispetto alla **forma**.
- Rispetto alla **periodicità**.

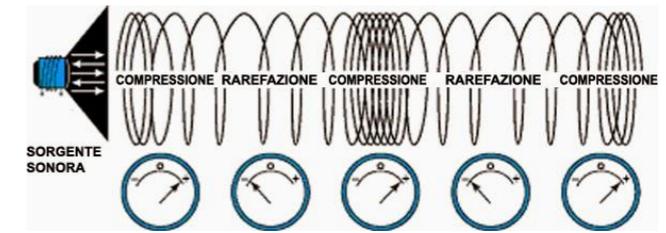
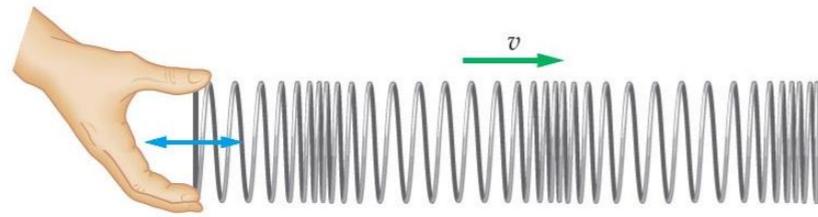


# Classificazione onde - Mezzo

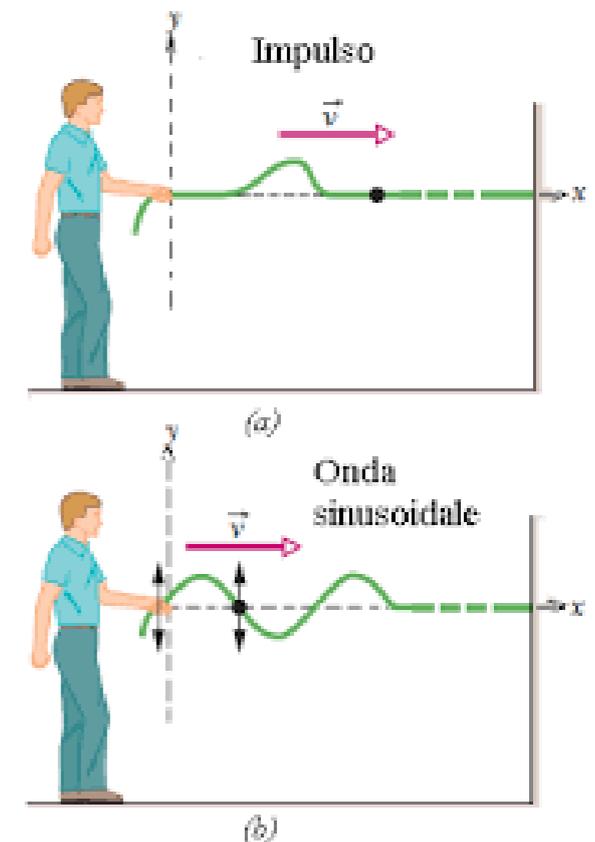
- **Onda meccanica:** la perturbazione interessa particelle di materia. Affinché avvenga la propagazione serve quindi un mezzo materiale in forma gassosa, liquida o solida.
- **Onda elettromagnetica:** la perturbazione interessa grandezze elettromagnetiche, in particolare la variazione di campi elettrici e magnetici. Si può propagare nel vuoto.



# Classificazione onde - Direzione



- **Onda longitudinale:** le particelle perturbate si muovono lungo la stessa direzione di propagazione dell'onda (parallelamente o longitudinalmente).
- **Onda trasversale:** le particelle perturbate si muovono lungo la direzione perpendicolare a quella di propagazione dell'onda (trasversalmente).





# Classificazione onde - Forma

La forma d'onda è il grafico che descrive l'ampiezza dell'onda in funzione del tempo.

- **Onda sinusoidale:** la relazione tra il tempo e l'intensità dell'onda è descritta dalla funzione seno. Dunque la forma d'onda corrisponde al grafico della funzione seno.
- **Altre onde:** nonostante per alcune sia nota la funzione che le descrive, la maggior parte delle onde ha una forma generica.



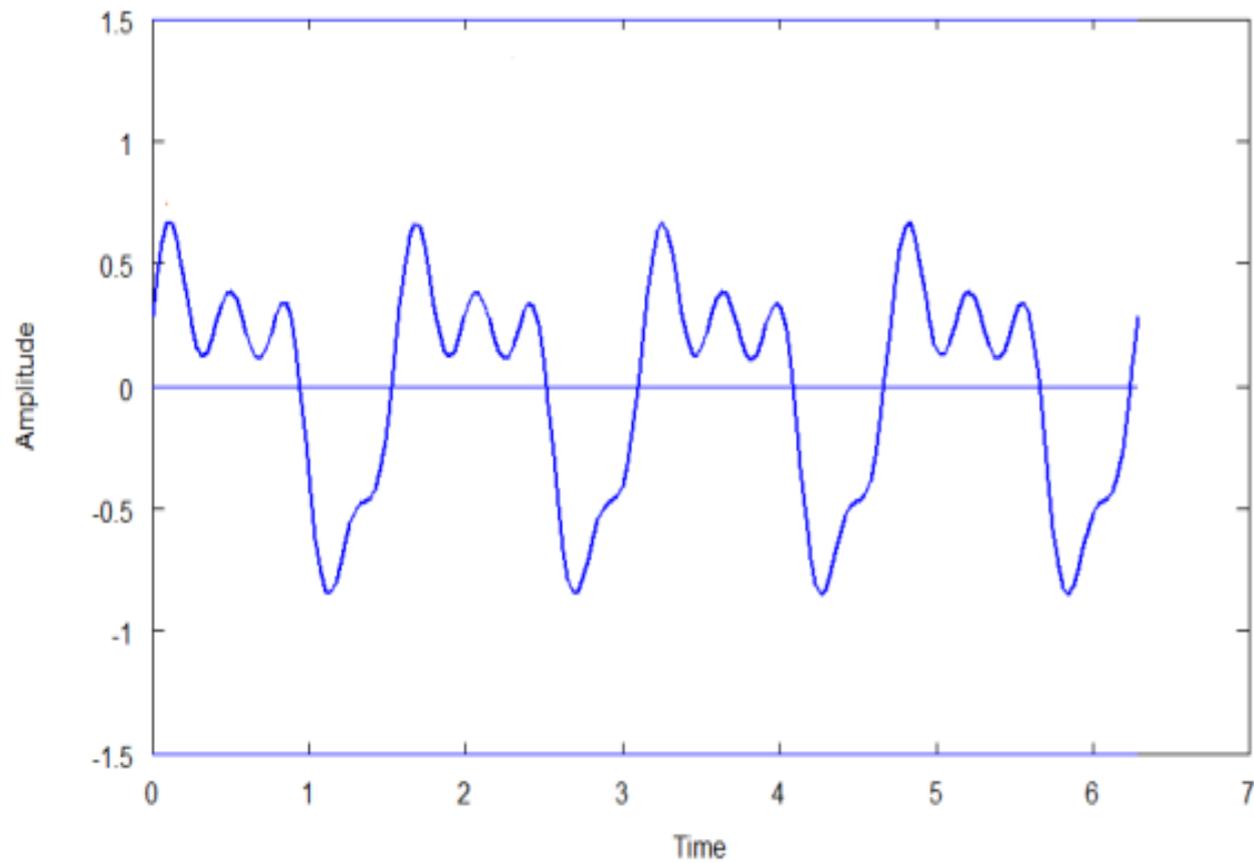
# Classificazione - Periodicità

- Un'onda si dice **periodica** e di periodo  $T$  se è costituita da una sequenza di oscillazioni che si ripetono ad intervalli di tempo regolari e pari a  $T$ . Si può descrivere matematicamente tramite una funzione periodica di periodo  $T$ .
- Un'onda si dice **aperiodica** o **non periodica** se non si può individuare una regolarità nelle oscillazioni. Spesso è difficile da descrivere tramite una funzione matematica, ma quando ciò accade si utilizza una funzione non periodica.

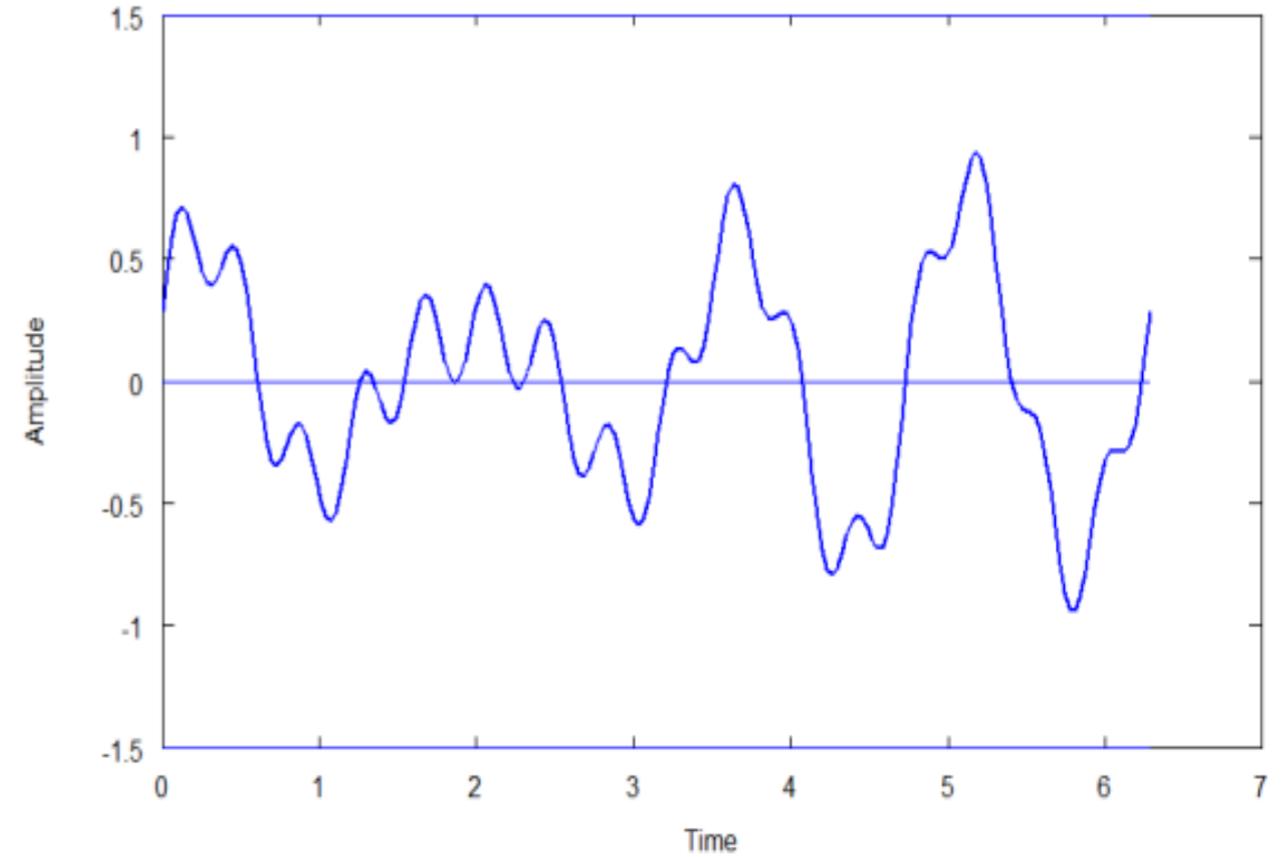


# Periodicità - Esempio

Onda periodica



Onda aperiodica





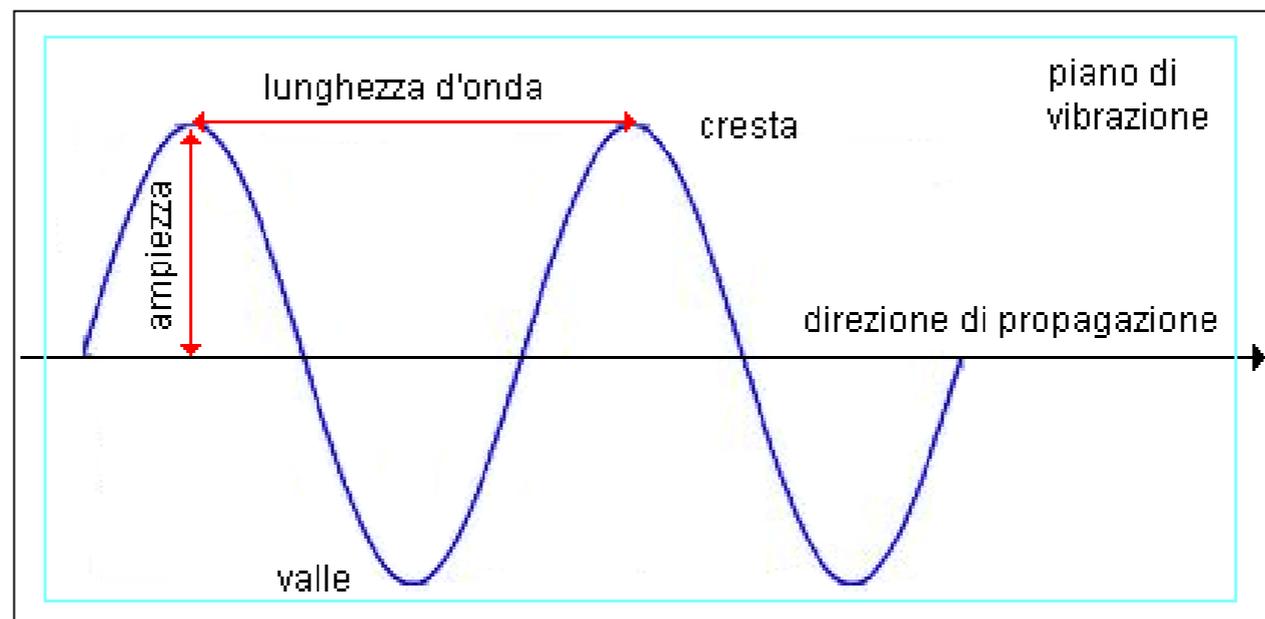
# Vibrazione, Propagazione, Rivelazione





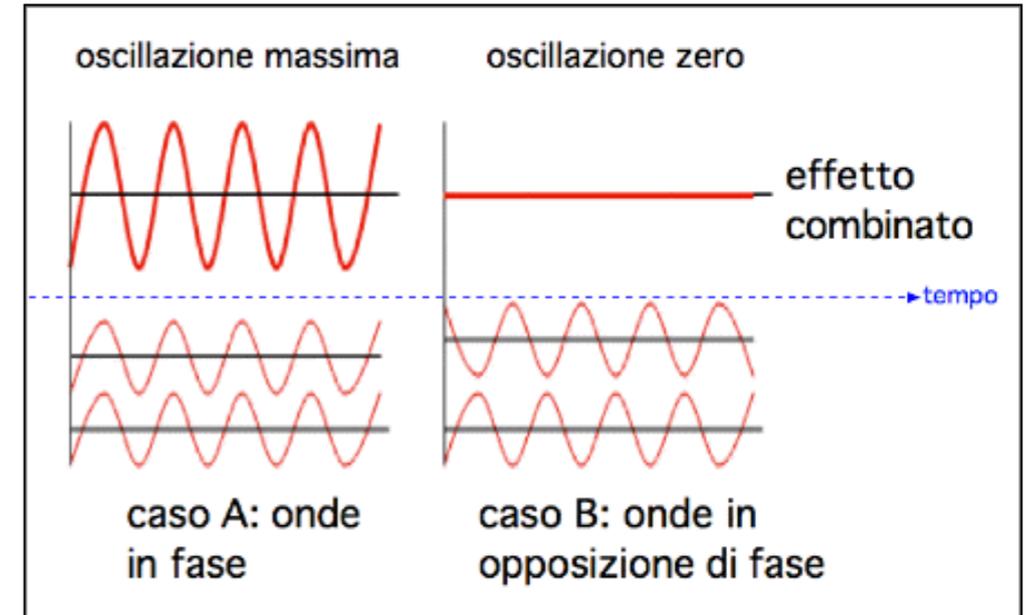
# Ampiezza, Periodo, Frequenza, Fase, Lunghezza d'onda

- Ampiezza: intensità del suono
  - Volume del suono (bisbiglio VS urlo)
  - Proporzionale all'energia trasportata dall'onda
- Frequenza: altezza di un suono
  - Suono acuto VS grave
- Fase: spazializzazione del suono





# Ampiezza, Periodo, Frequenza, Fase, Lunghezza d'onda



- **Onde in fase:**
  - Due o più onde con la stessa frequenza raggiungono l'ampiezza max nello stesso istante
- **Onde in opposizione di fase:**
  - Due o più onde con la stessa frequenza raggiungono rispettivamente l'ampiezza max e min nello stesso istante
  - Presentano una differenza di fase di  $180^\circ$



# Esercitazione Pratica

## (dal testo)

### ■ 1.8.2 – Nozione di fase

In un editor audio generare due onde sinusoidali identiche.

- Invertire la fase di una delle due.
- Mixare le due tracce verificando di aver ottenuto il silenzio.



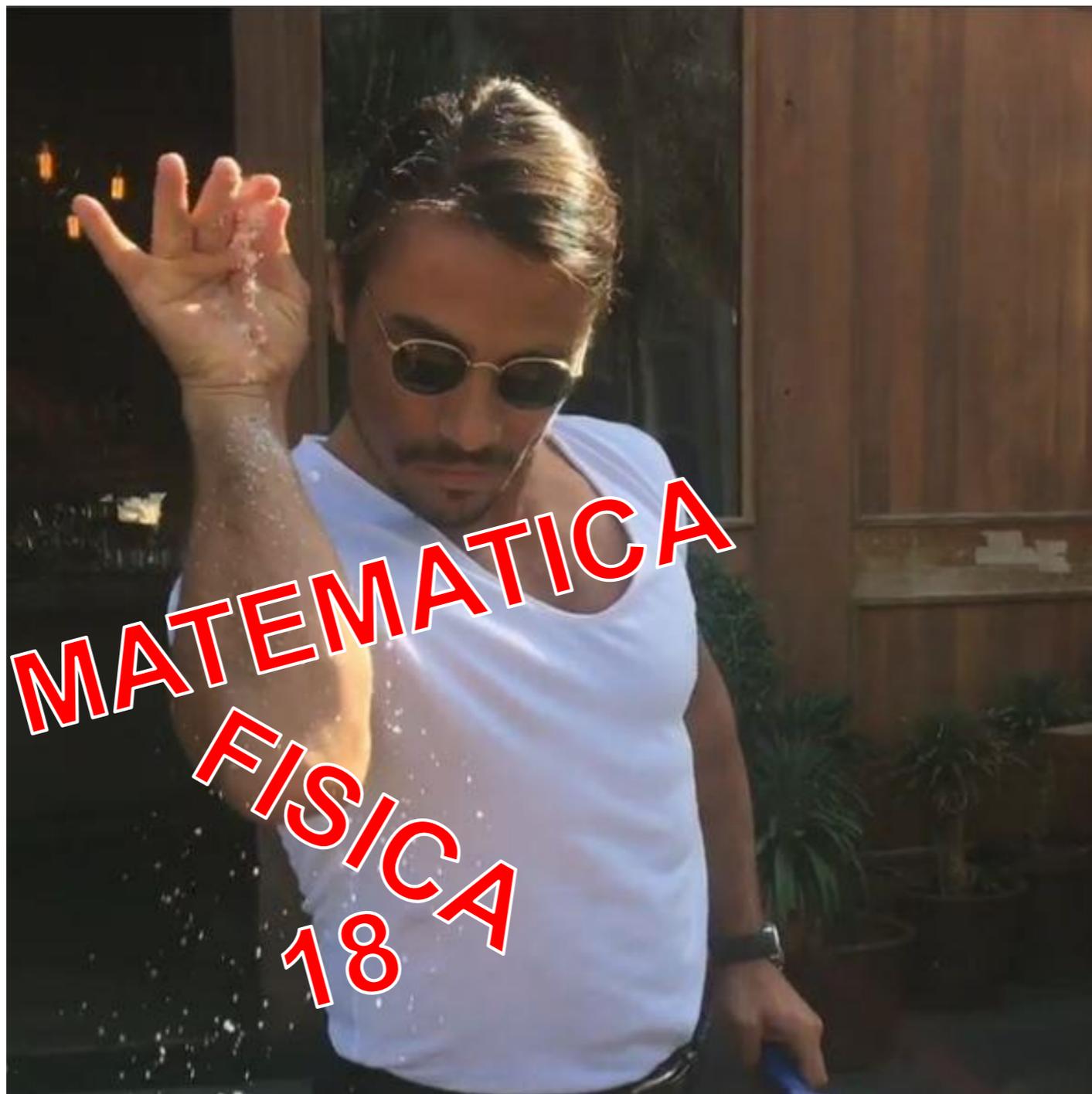
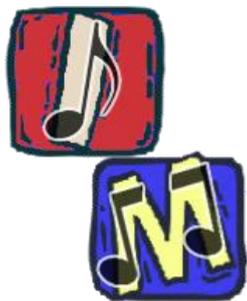
# Esercitazione Pratica – I battimenti

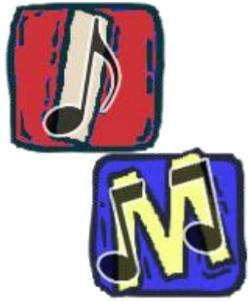
(dal testo)

## ■ 1.8.6 – Forma d'onda: i battimenti

In un editor audio generare due onde sinusoidali con frequenze vicine

- 300 Hz e 302 Hz, con ampiezza 0,5
- Mixare le due tracce
- Verificare che la frequenza del segnale mixato coincida con quella del segnale a 110 Hz





# Onda periodica – Funzione matematica

Una funzione  $f$  si dice *periodica* e di periodo  $T$  quando:

$$\exists T > 0 : \forall t \in \mathbb{R} \quad f(t) = f(t + T)$$

**Esempio:** un tipico esempio è quello delle funzioni trigonometriche, come seno o coseno. Infatti:

$$\sin(x) = \sin(x + T) \quad \text{per} \quad T = 2\pi$$

Lo stesso vale per la funzione coseno.



# Grandezze fisiche - Onda periodica

- **Frequenza:** indica il numero di oscillazioni complete nell'unità di tempo. Si misura in Hertz [Hz] ([1/s]).
- **Periodo:** indica il tempo necessario per compiere un'oscillazione completa. Si misura in secondi [s]. Se  $f$  è la frequenza, il periodo  $T$  vale:

$$T = \frac{1}{f}$$

- **Ampiezza:** serve a descrivere il range massimo di oscillazione. L'unità di misura dipende dalla grandezza fisica perturbata



# Grandezze fisiche - Onda periodica

- **Fase:** rappresenta una generica parte di periodo trascorso rispetto ad un istante di tempo fissato. Può avere altri significati che dipendono dallo specifico tipo di onda.
- **Fase iniziale:** rappresenta il periodo trascorso rispetto all'istante di tempo 0.
- **Pulsazione:** numero di oscillazioni complete in un tempo pari a  $2\pi$ . Si misura tipicamente in radianti al secondo [rad/s]. Se  $f$  è la frequenza ( e  $T$  il periodo), la pulsazione  $\omega$  vale:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

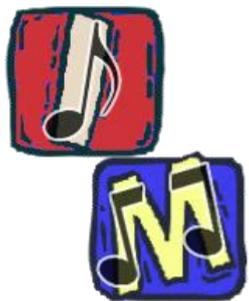
Queste **tre** grandezze possono avere diversi significati in base al tipo di onda. Per semplicità riferiamoci ad esse con il significato che hanno per le **onde sinusoidali**.



# Grandezze fisiche - Onda periodica

- **Velocità d'onda:** è lo spazio percorso dalla perturbazione nel tempo. Si misura in metri al secondo [m/s]. Dipende dal mezzo in cui l'onda si propaga.
- **Lunghezza d'onda:** è la distanza percorsa dall'onda, nel tempo necessario a passare da un punto di massimo o di minimo al corrispondente punto di massimo o di minimo dell'oscillazione successiva, chiamati rispettivamente **creste** e **ventri**. Si misura in metri [m]. Se  $v$  è la velocità dell'onda

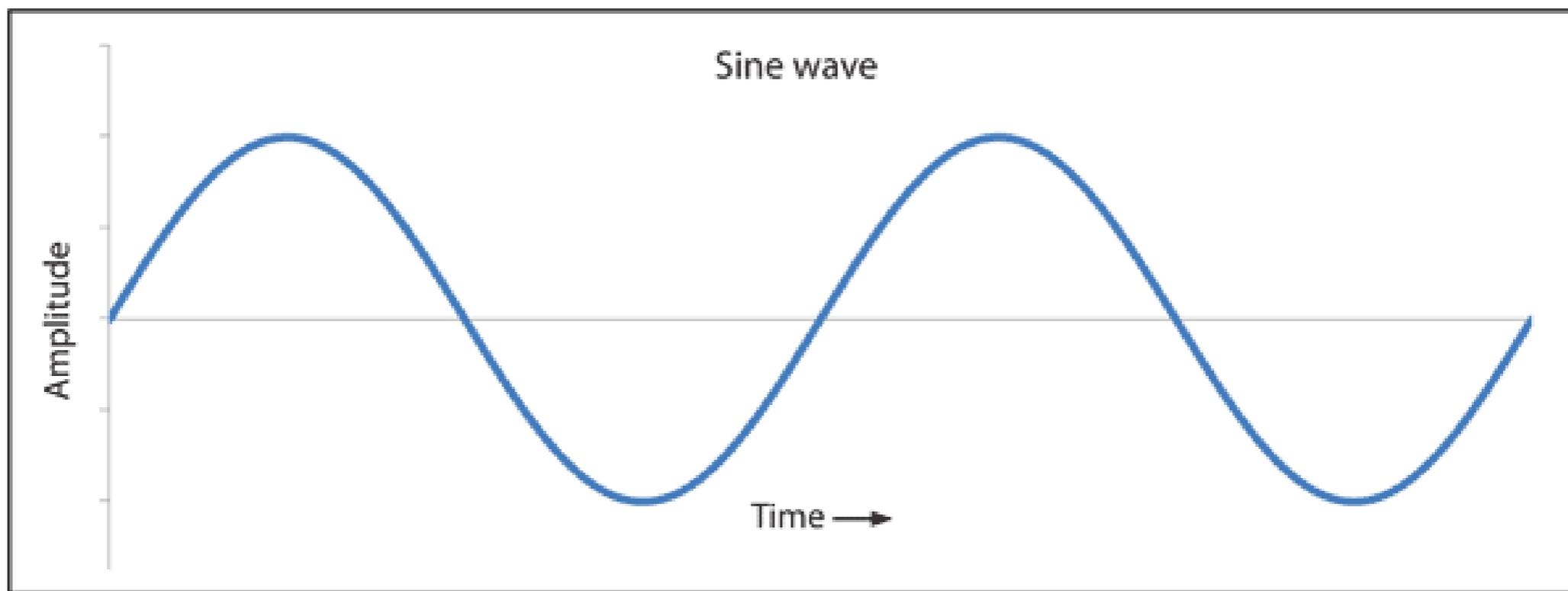
$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$



# Esempio – Onda sinusoidale

Un'onda sinusoidale può essere descritta matematicamente dalla seguente funzione periodica:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi_0)$$

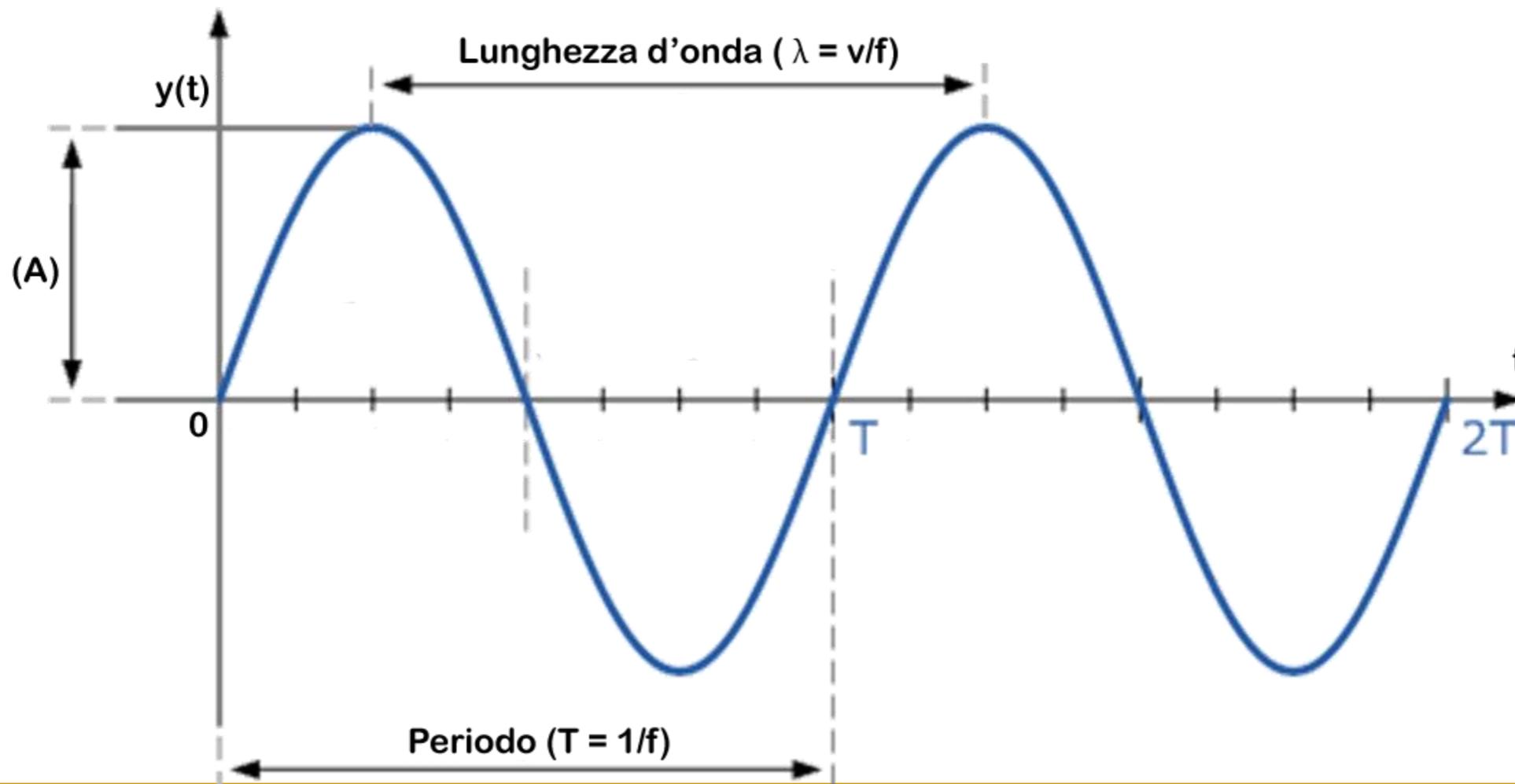




# Esempio – Onda sinusoidale

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi_0)$$

Dove  $A$  è la metà dell'ampiezza,  $f$  la frequenza. In questo caso, il termine  $2\pi f t + \varphi_0$  è la fase, mentre  $\varphi_0$  è la fase iniziale





# Ampiezza dei suoni

- Perché non misurarla in metri?
- Sound Pressure Level (SPL)
  - Variazione della pressione dell'aria
  - Il silenzio corrisponde alla pressione atmosferica
  - Le variazioni si aggirano attorno a  $1/1.000.000$ 
    - Sono comunque rilevabili dai diaframmi dei microfoni (e dal nostro timpano)
- Sound Intensity Level (SIL)



# Ampiezza dei suoni

L'ampiezza o intensità di un'onda sonora determina il volume a cui questa viene percepita.

In particolare:

- ad un'ampiezza elevata corrisponde un volume alto;
- viceversa il suono risulterà più debole.

L'ampiezza o intensità è il parametro fisico che descrive il contenuto energetico trasportato dall'onda. Nel caso delle onde sonore questa energia è legata in maniera direttamente proporzionale alla variazione di pressione locale.



# Ampiezza – Unità di misura

- Poiché nel caso dei suoni descrive una pressione, nulla vieta di utilizzare il **pascal**  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
- Tuttavia, a causa dell'enorme range in cui le quantità possono variare, si preferisce un'unità di misura basata su logaritmo.
- Un'unità di misura con questa proprietà è il **decibel**.



# Ampiezza

## Pressione, un esempio classico



### ■ Donna:

- Peso: 50Kg
- Area del tacco:  $2\text{cm}^2$
- Pressione
  - $500/0,0002=2.500.000\text{ N/m}^2$



### ■ Elefante:

- Peso: 1.000Kg
- Area ricoperta:  $0,1\text{m}^2$
- Pressione
  - $10.000/0,1=100.000\text{ N/m}^2$



# Ampiezza – Pressione

- Pressione atmosferica: 100.000 Newton/m<sup>2</sup>
- Per misurare l'ampiezza della pressione si dovrebbe misurare la sua differenza media rispetto alla pressione atmosferica, tuttavia...
  - La media di valori positivi e negativi tenderebbe a 0
- Consideriamo la Radice Quadrata della Pressione Quadratica Media (**Root Mean Square, RMS**)
  - Tipicamente calcolata su un ciclo completo dell'onda



# Ampiezza – Pressione

## Soglie di udibilità

- Da studi statistici si è scoperto che
  - La soglia MIN di udibilità è circa  $2,5 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$  (=25  $\mu \text{ Pa}$ )
  - La soglia MAX di udibilità è circa  $30 \text{ N/m}^2$
  - La soglia MAX è 1.000.000 di volte più grande della MIN
- Poiché il loro rapporto è così elevato conviene schiacciare la scala di riferimento
- -> Scala logaritmica



# Nota sui logaritmi (dal testo)

- Il logaritmo di un numero  $x$  in base  $b$  è l'esponente a cui deve essere elevata  $b$  per ottenere  $x$ 
  - $\text{Log}_b x = a$  se  $x = b^a$
- Un valore di una scala logaritmica quindi aumenta di 1 quando aumenta di 1 l'esponente
  - Passare da  $a$  ad  $a+1$  su una scala logaritmica significa passare da  $x = b^a$  a  $x = b^{a+1}$  sulla scala lineare corrispondente.
- Esempio:
  - Se  $b=10$ , passare da  $x_1=100$  a  $x_2=1000$  sulla scala lineare, corrisponde ad aumentare di 1 sulla scala logaritmica ( $100=10^2$  e  $1000=10^3$ )
  - Si noti che aumenta di 1 anche a passare da 1.000 a 10.000
- Per cui la scala logaritmica tende ad appiattare gli incrementi per valori elevati



# Decibel

Il **decibel (dB)** è una unità di misura *relativa* che sfrutta il logaritmo per comprimere il range di variazione della grandezza fisica che descrive. Corrisponde ad un decimo di **bel**.

- E' un'unità di misura *relativa* poiché serve a misurare il *rapporto* tra grandezze *omogenee*.
- Infatti, siano  $x_1$  e  $x_2$  grandezze omogenee, si definisce il loro ***rapporto espresso in decibel come:***

$$R_{dB} = 10 \log_{10} \frac{x_1}{x_2}$$



# Decibel ... e grandezze simili

Sono unità di misura *relative* basate su logaritmo:

Nome	Simbolo	Definizione
Bel	B	$R_B = \log_{10} \frac{x_1}{x_2}$
Decibel	dB	$R_{dB} = 10 \log_{10} \frac{x_1}{x_2}$
Neper	Np	$R_{Np} = \log_e \frac{x_1}{x_2}$



# Decibel - Caratteristiche

Le caratteristiche del decibel si possono riassumere nei seguenti punti:

- E' adimensionale, infatti il rapporto tra le due grandezze omogenee è sempre un numero puro.
- L'unità di misura originaria va spesso specificata, per poter capire cosa effettivamente si sta misurando.
- Il logaritmo comprime il range di variazione delle grandezze, trasformando gli aumenti *moltiplicativi* in aumenti *additivi*, cioè i prodotti in somme.  
$$\log_b (a \cdot c) = \log_b (a) + \log_b (c)$$
- Un aumento di 10 **dB** corrisponde ad un aumento della grandezza originale di un fattore 10. Ad un raddoppio corrisponde invece un aumento di circa 3 **dB**.



# Decibel - Esempio

Supponiamo di aver investito 5.000€, ed aver aumentato il nostro capitale fino a 200.000€. Quanti decibel abbiamo guadagnato?

$$G_{dB} = 10 \log_{10} \frac{x_1}{x_2} = 10 \log_{10} \frac{200000\text{€}}{5000\text{€}} \cong 16 \text{ dB}$$

Quindi ad un aumento di un fattore 40, corrisponde un guadagno di 16 dB.



# Decibel - Uso

- L'unità di misura originale di solito si specifica come **pedice**. Nell'esempio precedente abbiamo quindi misurato  $dB_{\epsilon}$ .
- Sarebbe comodo usare il decibel come unità di misura **assoluta**. Per farlo, basta fissare il denominatore del rapporto ad un valore di riferimento.
- In effetti nel caso dell'intensità sonora si userà questo stratagemma.



# Decibel assoluto

Come scegliere le grandezze di riferimento? Ci sono due possibilità:

- 1) Scegliamo come valore di riferimento l'unità della grandezza originale.
- 2) Scegliamo un valore che sia significativo per una qualche motivazione teorica o pratica. Nel caso delle onde sonore la scelta sarà di questo tipo.

In ogni caso, nulla ci vieta di scegliere arbitrariamente il valore di riferimento.



# Decibel assoluto - Esempio

Il puntatore laser che stiamo utilizzando ha una potenza di  $5mW$  (milli Watt). A quanti decibel assoluti corrisponde questa potenza?

Poiché ci viene richiesta una misura in decibel assoluti per un potenza espressa in Watt, prendiamo come valore di riferimento l'unità, ossia  $1 W$ . Quindi  $x_2 = 1 W$

$$P_{dB_W} = 10 \log_{10} \frac{x_1}{1 W} = 10 \log_{10} \frac{5 mW}{1 W} \cong -23 dB_W$$



# Decibel assoluto - Esempio

Il puntatore laser che stiamo utilizzando ha una potenza di  $500 \text{ mW}$ . A quanti decibel assoluti corrisponde questa potenza prendendo come riferimento i laser da  $5 \text{ mW}$ ?

Poiché ci viene richiesta una misura in decibel assoluti e come riferimento i laser di potenza  $5 \text{ mW}$ , prendiamo  $x_2 = 5 \text{ mW}$ .

$$P_{dB_W} = 10 \log_{10} \frac{x_1}{5 \text{ mW}} = 10 \log_{10} \frac{500 \text{ mW}}{5 \text{ mW}} \cong 20 \text{ dB}_W$$

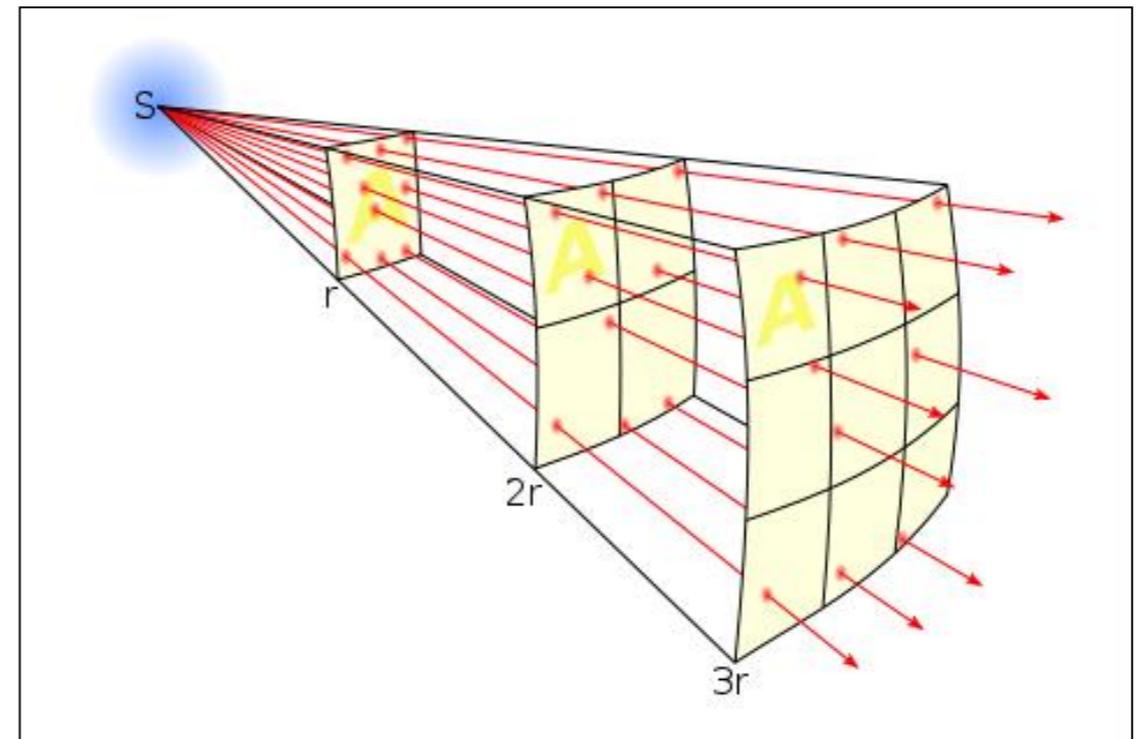


# Legge dell'inverso del quadrato

(approfondiremo nella prossima lezione)

*La potenza del suono per unità di area (intensità sonora) diminuisce proporzionalmente al quadrato del raggio.*

- Nell'aria libera il suono si propaga uniformemente in tutte le direzioni, e la sua intensità diminuisce all'aumentare della distanza dalla sorgente. La stessa potenza sonora passa attraverso ogni area, ma le aree aumentano proporzionalmente al quadrato del raggio.





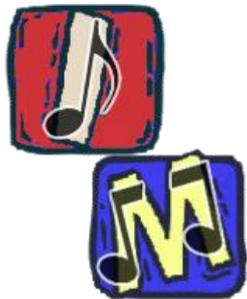
# Ampiezza – Decibel SPL

L'ampiezza di un'onda sonora viene tipicamente misurata in decibel SPL (Sound Pressure Level), simbolo **dB<sub>SPL</sub>**.

In particolare, sia  $p$  la pressione sonora (in pascal - Pa) di un suono, si definisce livello di pressione sonora:

$$SPL = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$$

Dove  $p_0$  è la pressione di riferimento, pari a  $25 \mu\text{Pa}$ . Questa grandezza non è casuale, ma rappresenta la **soglia minima di udibilità per un tono puro a 1000 Hz**.



# Ampiezza – Decibel SPL

Suono	SPL (dB)
Eruzione del Krakatoa (del 1883)	300
Interno di un tornado	250
Massimo rumore prodotto in laboratorio	210
Lancio di un missile (a 50 m)	200
Rottura istantanea del timpano	170
Jet al decollo (a 50 m)	130
<b>Dolore fisico</b>	<b>130</b>
Concerto rock al chiuso	110
Schianto del fulmine	110
Urlo	100
Martello pneumatico (3 m)	90
Traffico cittadino	70-80
Ufficio o ristorante (affollati)	60-65
Conversazione (1 m)	50
Teatro o chiesa (vuoti)	25-30
Bisbiglio (1 m)	15
Fruscio di foglie	10
Zanzara vicino all'orecchio	10
<b>Soglia dell'udito (a 1000 Hz)</b>	<b>0</b>
Camera anecoica	-10

La scelta di una scala logaritmica è motivata dall'enorme range in cui può variare la pressione sonora. Suoni fino a 100 Pa di pressione (che provocano dolore fisico al timpano) non sono rari in certi ambienti. Non è strano quindi, avere a che fare con variazioni da  $25 \times 10^{-6}$  Pa a 100 Pa, ossia di parecchi ordini di grandezza.



# Ampiezza – Decibel SIL

L'ampiezza di un'onda sonora può anche essere misurata in funzione dell'intensità attraverso una superficie di un metro quadro. In questo caso si utilizzano i decibel SIL (Sound Intensity Level), simbolo **dB<sub>SIL</sub>**

In particolare, sia  $I$  l'intensità di un suono ( $\frac{W}{m^2}$ ), si definisce livello di intensità sonora:

$$SIL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

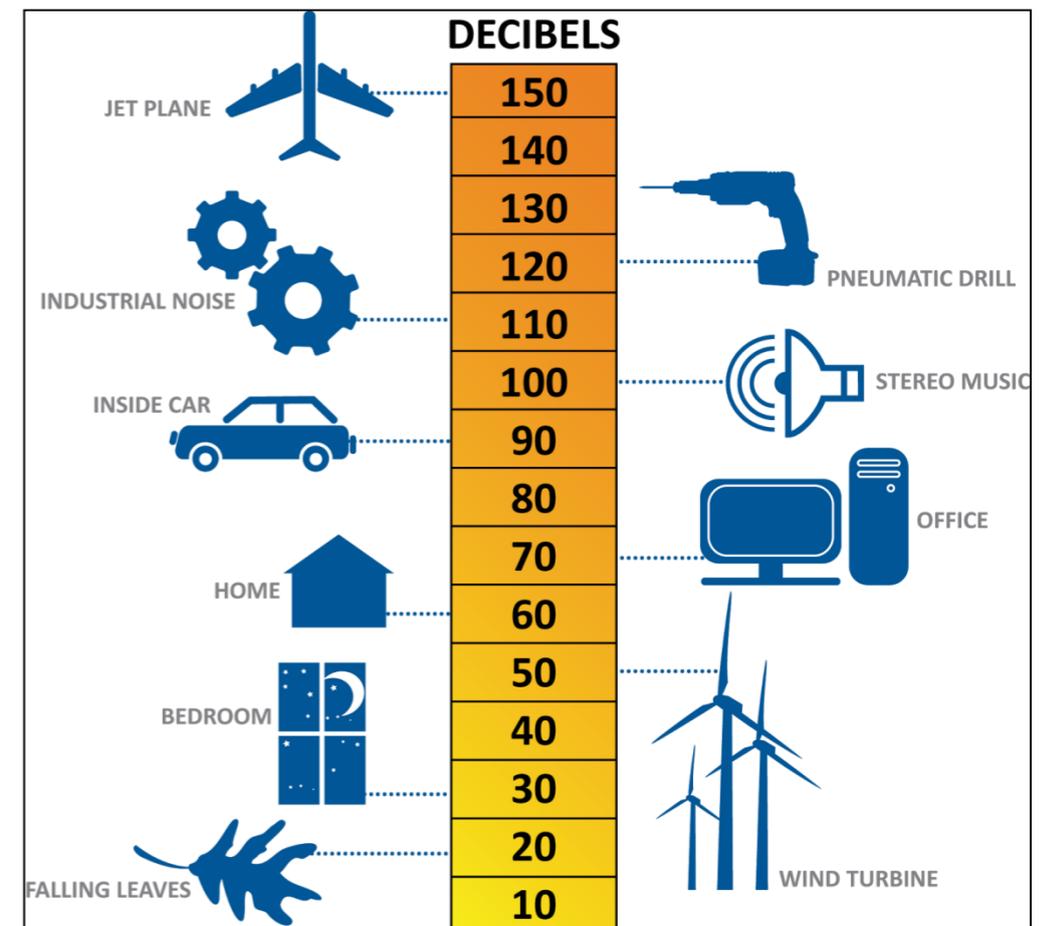
Dove  $I_0$  è l'intensità associata alla soglia minima di udibilità, pari a  $10^{-12} \frac{W}{m^2}$ . Sebbene in alcuni casi i valori SPL e SIL coincidano, essi hanno comunque un significato fisico differente.



# Ampiezza – Decibel

## Range di valori tipici

- Il rapporto tra l'intensità del suono alla soglia del dolore fisico e il minimo suono udibile è di circa 1000 miliardi, cioè  $10^{12}$ 
  - Quindi la scala dei decibel ha portato a una gamma di valori che andrà da 0 a 120dB circa
  - ( $>120\text{dB}$  se superiamo la soglia del dolore)





# Approfondimenti

- ***Il suono e le sue caratteristiche fisiche***

[http://www.academia.edu/23641480/IL\\_SUONO\\_E\\_LE\\_SUE\\_CARATTERISTICHE\\_FISICHE](http://www.academia.edu/23641480/IL_SUONO_E_LE_SUE_CARATTERISTICHE_FISICHE)

- ***Introduzione alla Musica Elettronica***

[https://www.itimarconinocera.org/sito/menu/dipartimenti/tecnico\\_scientifico\\_informatica/corso\\_musica\\_elettronica/index.htm](https://www.itimarconinocera.org/sito/menu/dipartimenti/tecnico_scientifico_informatica/corso_musica_elettronica/index.htm)