



Suono e ampiezza



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**.



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.
- 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 $dB_{\text{€}}$.
- 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 mW . A quanti **decibel assoluti** corrisponde questa potenza prendendo come riferimento i laser da 5 mW ?

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

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



Ampiezza – Decibel SPL

L'ampiezza di un'onda sonora viene tipicamente misurata in decibel SPL (Sound Pressure Level), simbolo **dB_{SPL}**.

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 μ Pa. Questa grandezza non è casuale, ma rappresenta la **soglia minima di udibilità per un tono puro a 1000 Hz**.



Ampiezza – Pressione

Soglie di udibilità

Calcolate grazie a
un tono puro da
1000Hz

- Da studi statistici si è scoperto che
 - La soglia MIN di udibilità è circa $2,5 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ (**=25 μPa**)
 - La soglia MAX di udibilità è circa 30 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

Un'unità di misura con questa
proprietà è il **Decibel**



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
Dolore fisico	130
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
Soglia dell'udito (a 1000 Hz)	0
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 25×10^{-6} Pa a 100 Pa, ossia di parecchi ordini di grandezza.



Ampiezza – Decibel SIL

L'ampiezza di un'onda sonora può anche 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_{SIL}**.

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.



Legge dell'inverso del quadrato (dal testo)

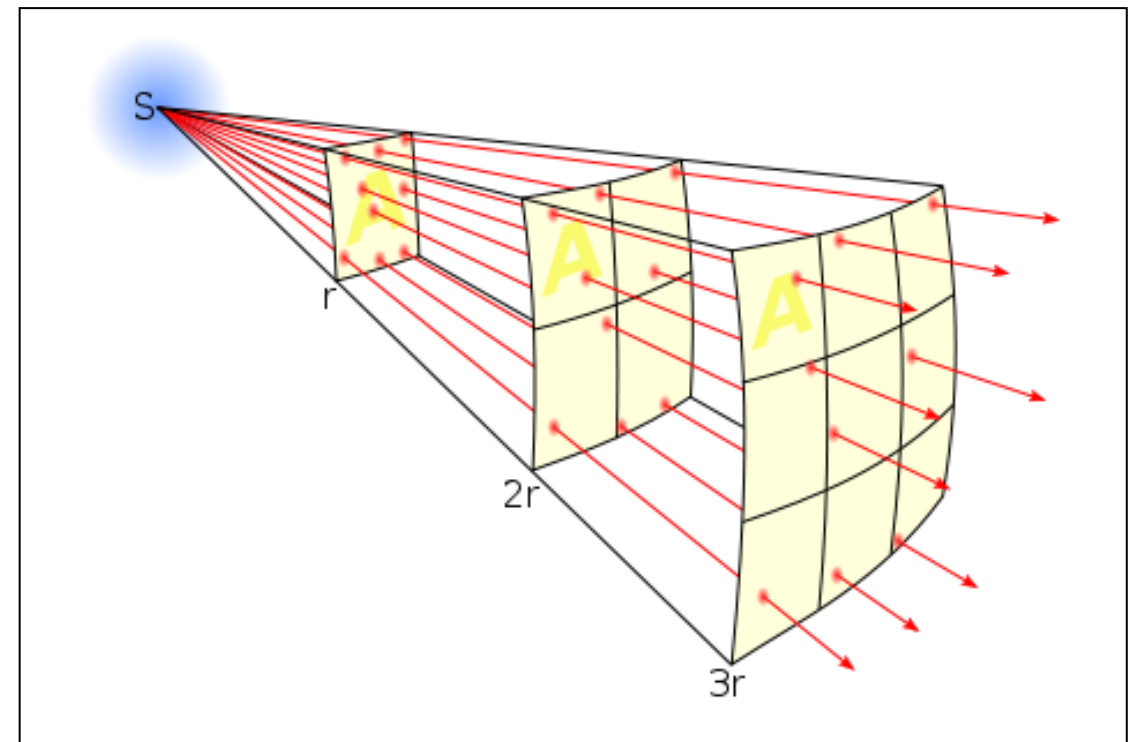
- Mentre l'onda si propaga in forma sferica dalla sorgente, l'intensità sonora diminuisce secondo la *Legge dell'inverso del quadrato*
- L'intensità si distribuisce su tutta la superficie della sfera man mano che il suono si allontana dalla sorgente
- Poiché la superficie della sfera è data da $4\pi r^2$, l'intensità diminuisce con il quadrato della distanza dalla sorgente



Legge dell'inverso del quadrato

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

- 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.





Legge dell'inverso del quadrato

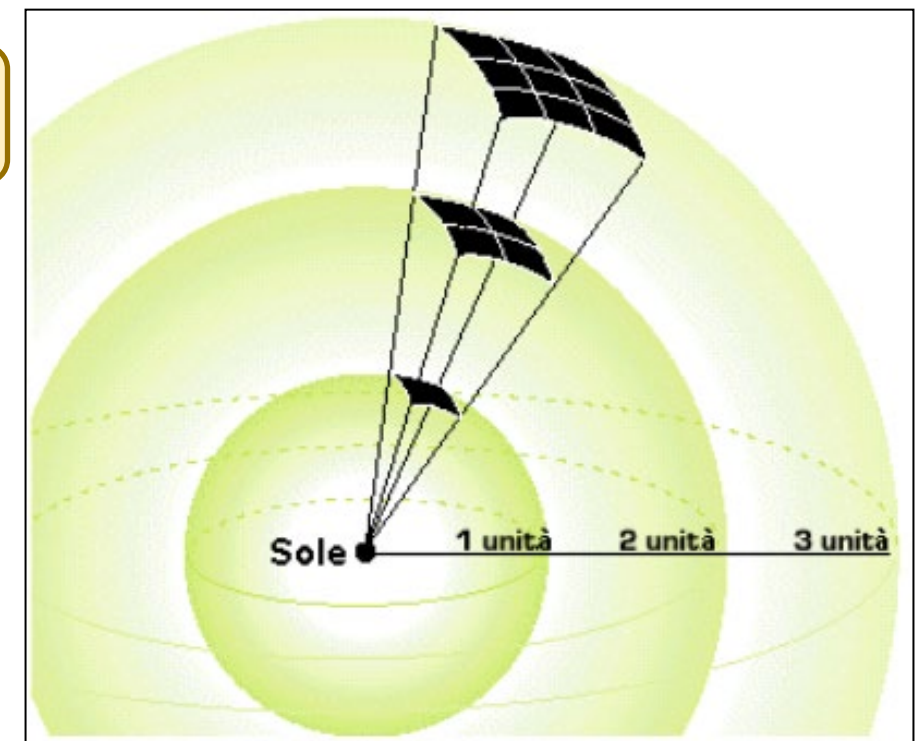
Un esempio con la luce

- Per calcolare l'intensità della luce ad una determinata distanza dalla sorgente, bisogna conoscere l'intensità ad una distanza di riferimento
- Intensità della luce solare che raggiunge la terra: $1370 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
- 1 Unità Astronomica $\simeq 150M$ Km
- Marte si trova a 1.5 UA dal Sole. L'intensità della luce su Marte rispetto alla Terra è

$$\frac{1}{r^2} = \frac{1}{1.5^2} = \frac{1}{2.25} = 0.44 (= 44\%)$$

$$0.44 \times 1370 \frac{W}{m^2} = 603 \frac{W}{m^2}$$

1UA è la distanza
Terra-Sole

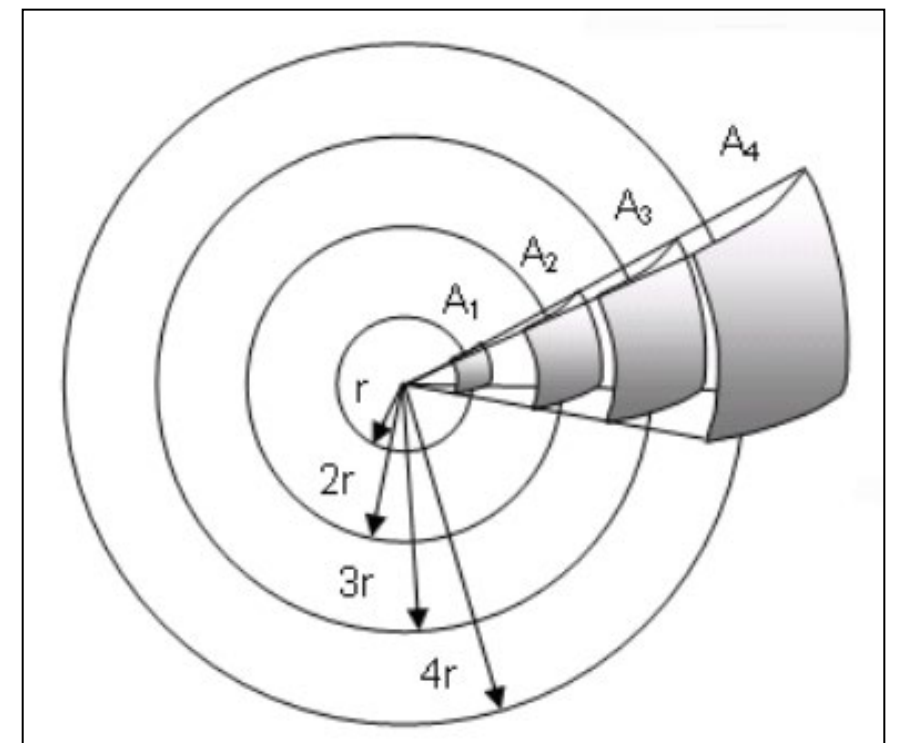




Legge dell'inverso del quadrato

Un esempio con il suono

- La stessa potenza sonora passa attraverso A_1 , A_2 , A_3 e A_4 , ma le aree aumentano proporzionalmente al quadrato del raggio
- Questo significa che la *potenza del suono per unità di area (intensità sonora)* diminuisce proporzionalmente al quadrato del raggio
- L'intensità del suono in campo libero è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente
- Distanza: $2 \times r \rightarrow$ Intensità: $1/4 \times \text{Intensità}_0$
- Distanza: $3 \times r \rightarrow$ Intensità: $1/9 \times \text{Intensità}_0$
- Distanza: $4 \times r \rightarrow$ Intensità: $1/16 \times \text{Intensità}_0$

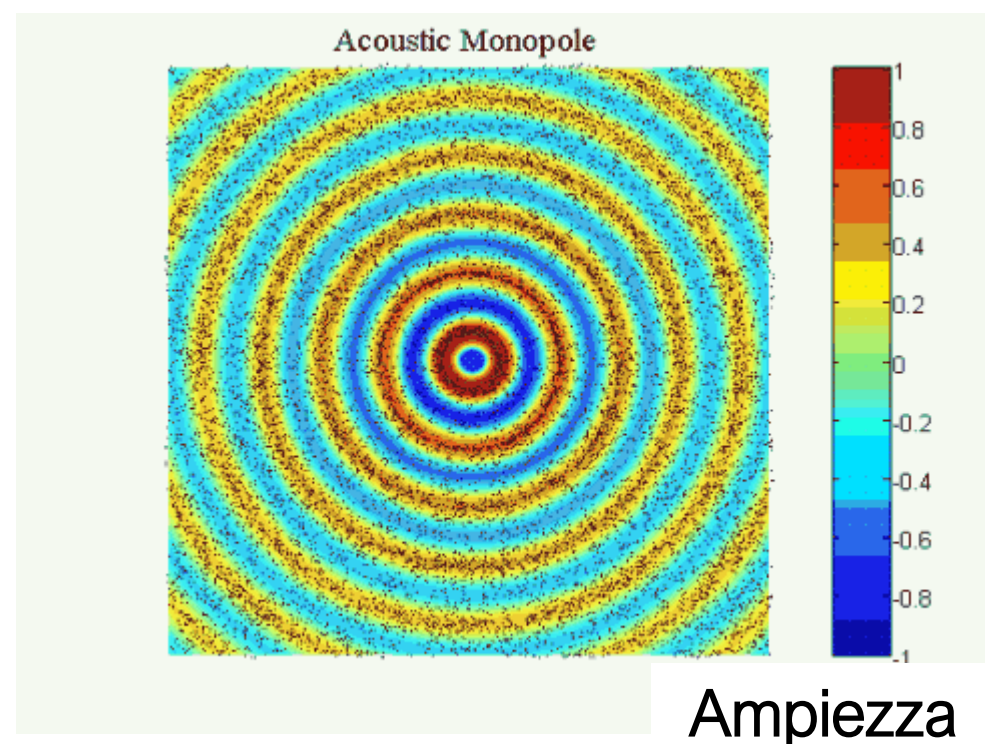




Legge dell'inverso del quadrato

Ancora un esempio

- Il caso del **monopolo acustico** riassume la legge dell'inverso del quadrato. Il monopolo, considerato come sorgente puntiforme (si definisce sorgente puntiforme quando quest'ultima ha dimensioni molto più piccole della lunghezza d'onda in gioco) emette onde sferiche nell'ambiente circostante in assenza di ostacoli. **Il suono che si andrà ad irradiare sarà uniforme in tutte le direzioni e l'intensità sonora diminuirà sempre più all'aumentare della distanza.**





Legge dell'inverso del quadrato

→ Perché proprio il quadrato?

L'intensità sonora è uguale a

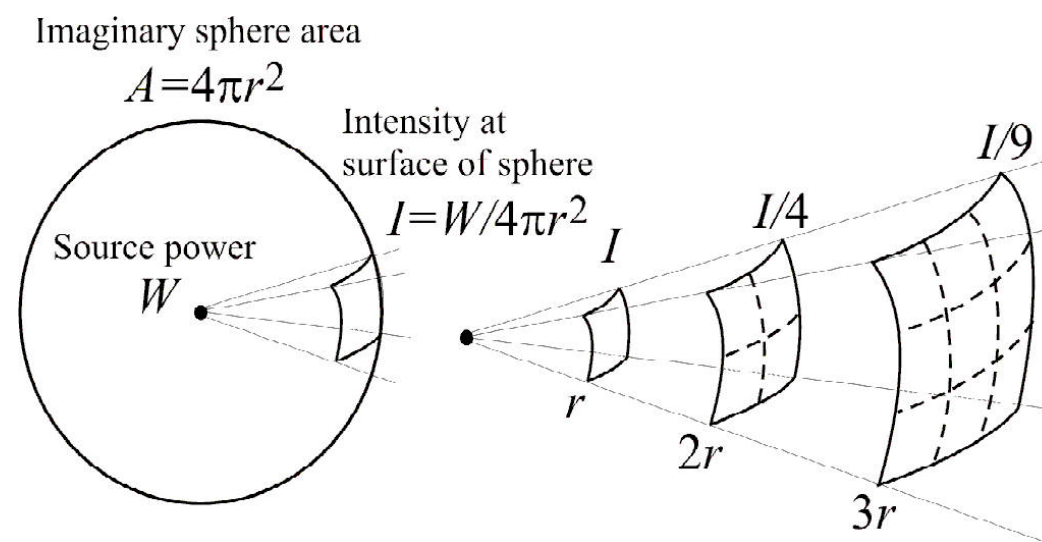
$$I = W/A$$

Dove W =potenza sonora, e A =area

Ipotesizzando che l'onda sia libera di propagarsi senza incontrare alcun ostacolo, ad una certa distanza r dalla sorgente, avremo che l'onda sferica si andrà a sviluppare proprio su una superficie $A = 4\pi r^2$. Sostituendo quest'ultima alla precedente si otterrà:

$$I = W/4\pi r^2$$

La precedente conferma che l'intensità ha un andamento inversamente proporzionale alla distanza decrescendo come $1/r^2$





Legge dell'inverso del quadrato

Limitazioni

- Si applica solo a sorgenti puntiformi
 - E' approssimata per sorgenti che non si irradiano in maniera uniforme
- Il suono tende a decadere anche per le caratteristiche di assorbimento dell'aria e dei materiali riflettenti (*coefficiente di assorbimento*)
 - L'assorbimento dipende dalla frequenza
 - Nell'aria le frequenze $< 1\text{kHz}$ viaggiano più distante rispetto a quelle $> 1\text{kHz}$



Legge dell'inverso del quadrato

- Un suono viene percepito con intensità 90 W/m^2 a distanza 5 metri. Quale sarà la sua intensità percepita a distanza 15 metri?

- $r_0 = 5, r_1 = 15$

$$r_1/r_0 = 15/5 = 3$$

Il quadrato di 3 è 9

$$\rightarrow 90/9 = 10 \text{ W/m}^2$$



Ampiezza – Inviluppo

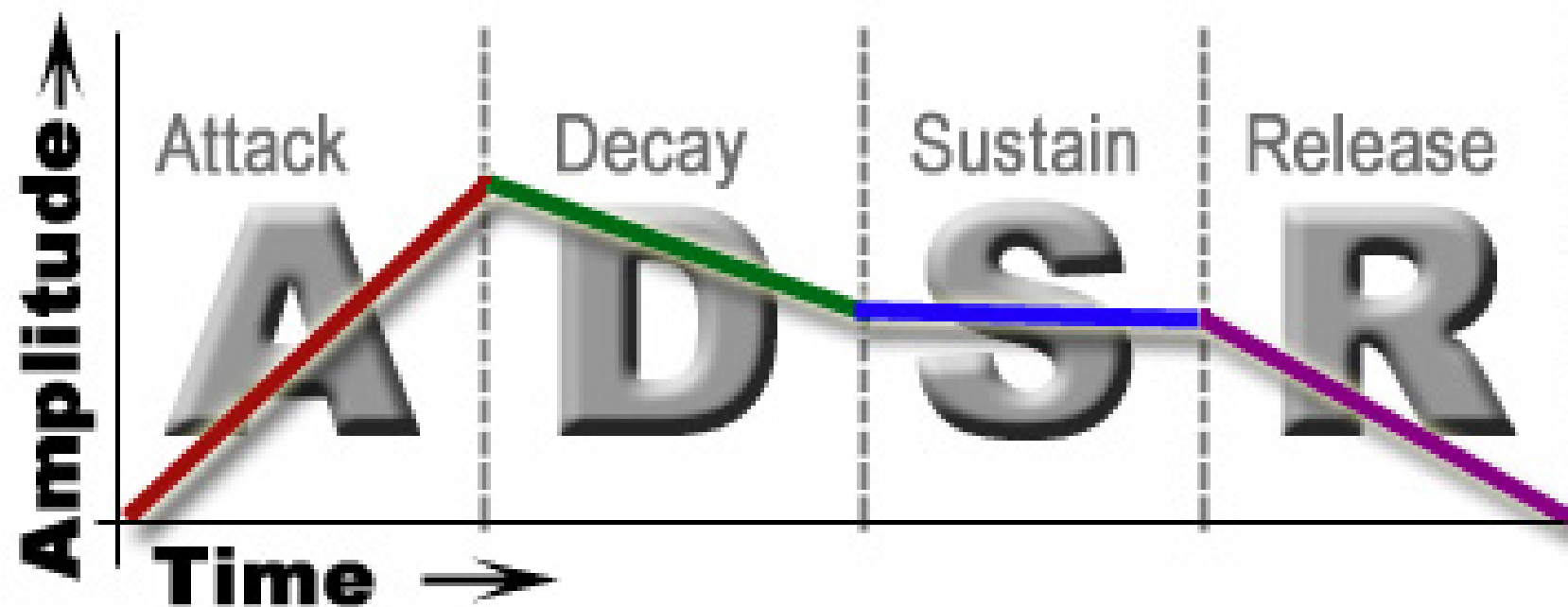
- Normalmente un suono inizia in un certo istante di tempo e termina in un altro. Prima e dopo troviamo silenzio.
- Come si comporta il volume di un suono durante il suo tempo di vita?
- In generale la variazione dell'ampiezza segue un certo andamento, detto **inviluppo**.



Ampiezza – Inviluppo

L'inviluppo è l'andamento dell'ampiezza o volume di un suono dall'istante in cui esso viene generato al momento in cui si estingue.

Esistono vari tipi di inviluppo. Uno dei più famosi è quello che caratterizza le note suonate da strumenti musicali: **ADSR**.



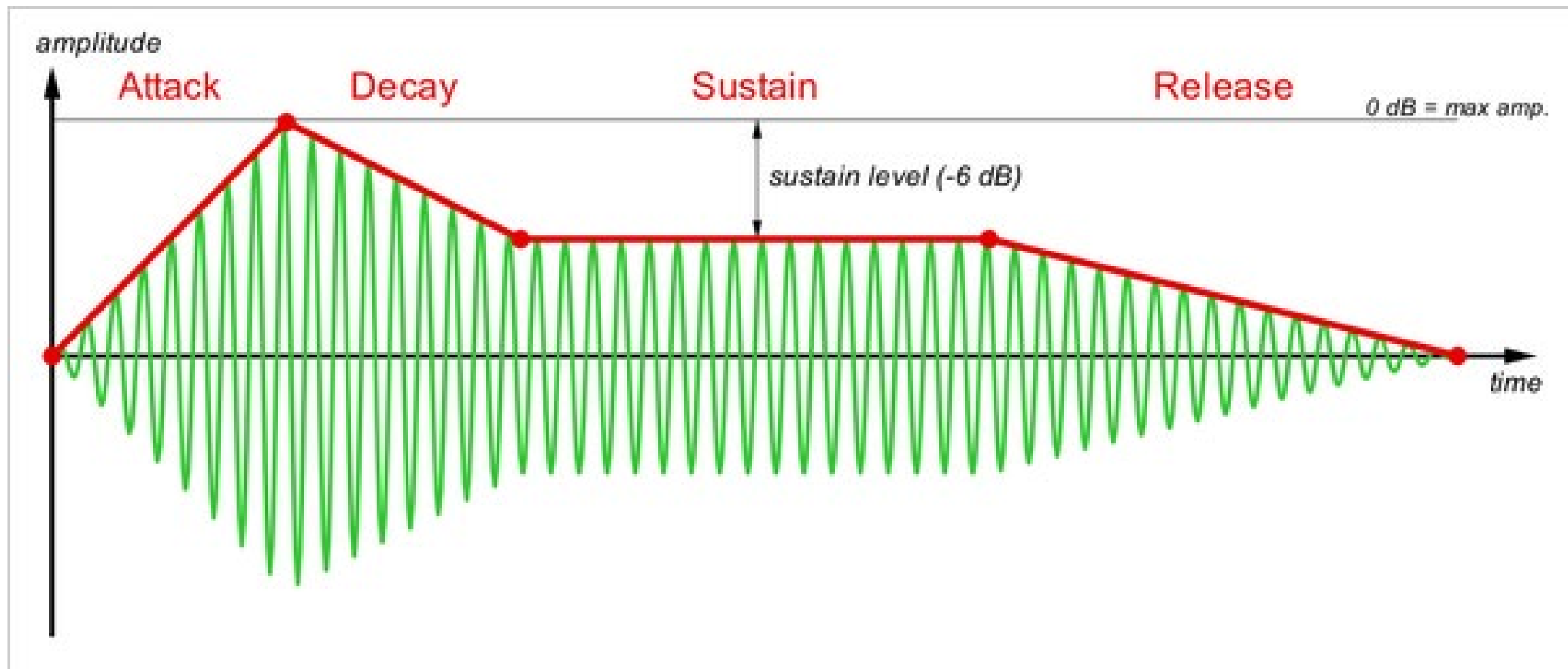


Ampiezza – Inviluppo ADSR

- **Attack:** è la prima fase, e rappresenta l'intervallo di tempo che il suono impiega a passare da ampiezza nulla ad ampiezza massima.
- **Decay:** successiva all'Attack, è l'intervallo di tempo necessario a raggiungere un'ampiezza costante.
- **Sustain:** in questa fase l'ampiezza rimane pressoché costante
- **Release:** nell'ultima fase l'ampiezza, da costante, cala fino ad arrivare a zero.



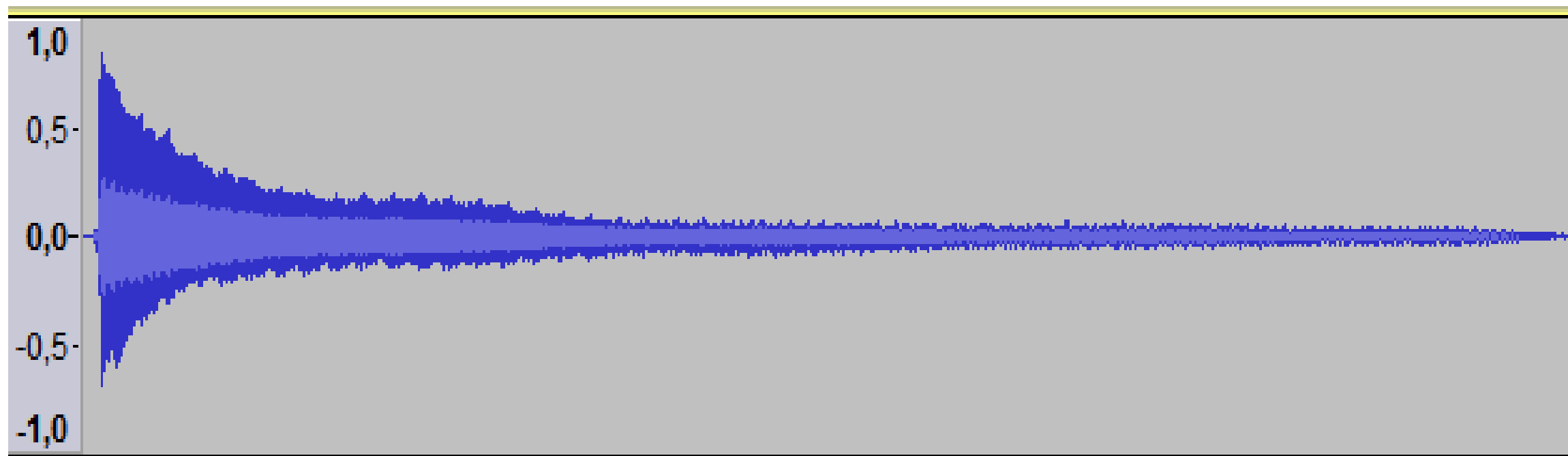
Ampiezza – Inviluppo ADSR



Ogni strumento musicale ha un inviluppo ADSR caratteristico, in cui variano i tempi di Attack-Decay-Sustain-Release.



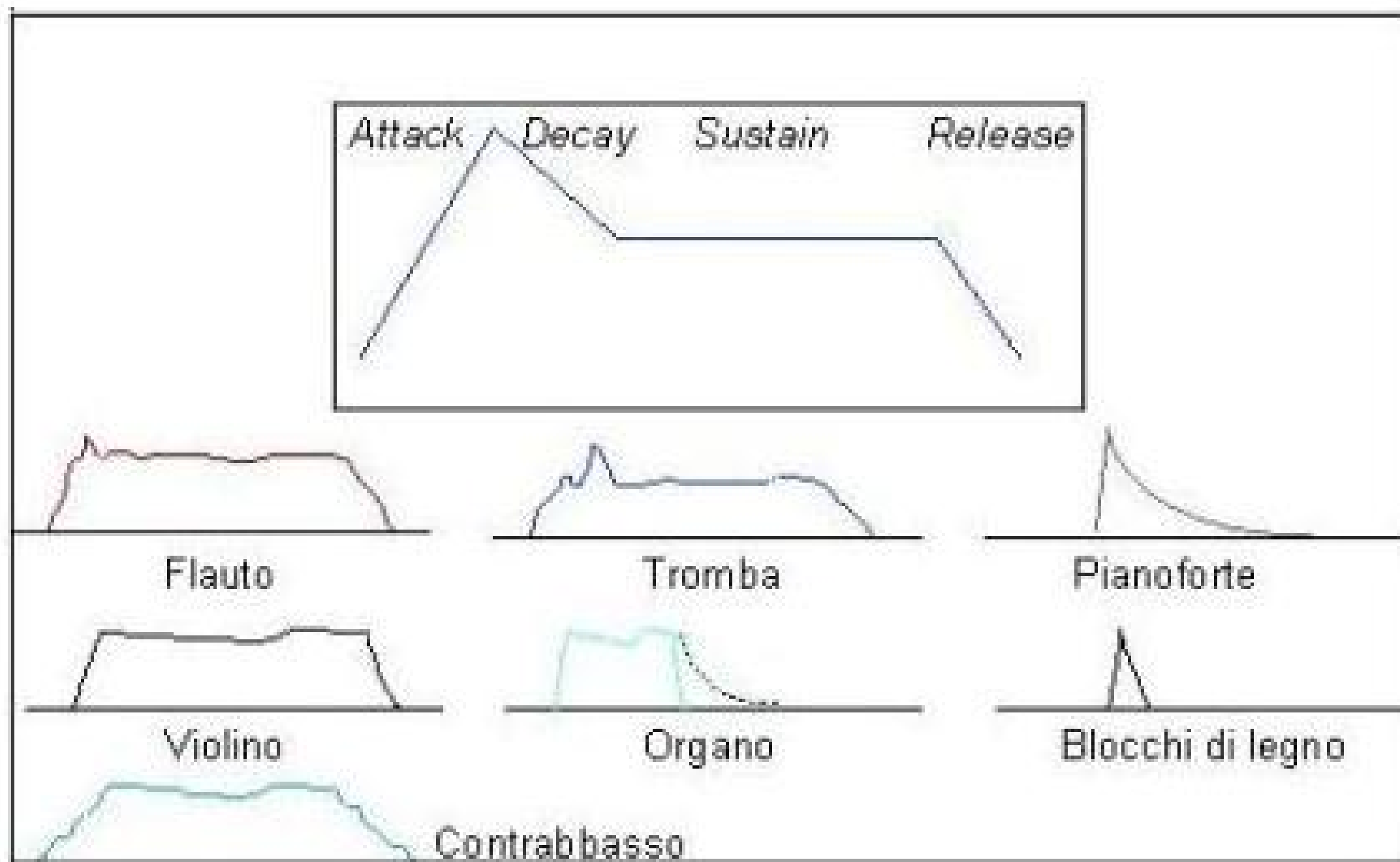
Ampiezza – Esempio inviluppo



Nell'esempio un **La** di chitarra. Si noti la breve durata della fase di Attack e la lunga durata della fase di Release.



Ampiezza – Esempi inviluppi





Ampiezza – Volume e frequenza

- Nonostante il **volume percepito** di un suono dipenda per lo più dall'ampiezza dell'onda sonora, anche la frequenza fa la sua parte.
- Infatti gli esseri umani sono più sensibili alle frequenze tra **1 KHz** e **5 KHz**, ciò vuol dire che a parità di ampiezza (energia), un suono a frequenza molto bassa o molto alta verrà percepito ad un volume più basso rispetto ad uno a frequenza media.



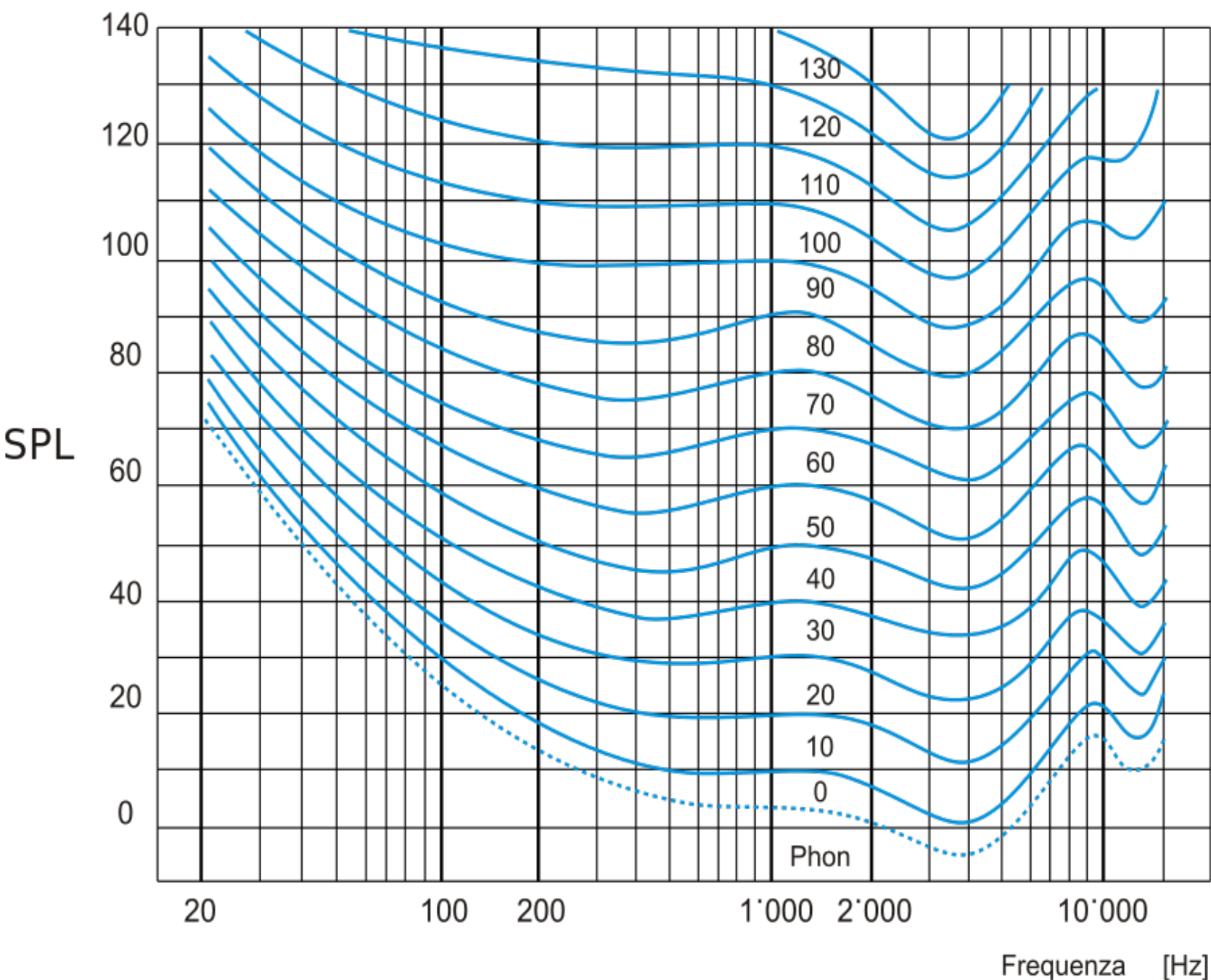
Ampiezza – Curve isofoniche

Poiché è più corretto parlare di **volume percepito**, sono stati definiti dei grafici che al variare della frequenza descrivano tale grandezza. Si tratta delle **curve isofoniche**.

- Questi grafici sono anche chiamati «audiogrammi di **Fletcher-Munson**», i primi a studiare il fenomeno. Tuttavia tali diagrammi furono standardizzati come **ISO 226:2003**.
- Viene definita un'unità di misura che descrive il volume percepito anziché l'energia fisica (es: intensità o pressione). Questa unità di misura prende il nome di **phon**.
- Il volume in **phon** ha un valore uguale ai decibel SPL per frequenze pari a 1000 Hz. Infatti viene definito a partire dal tono puro a 1000 Hz.



Ampiezza – Curve isofoniche



Ogni curva descrive l'intensità in decibel necessaria per percepire un suono allo stesso volume, pur variando la frequenza. Come si vede, basse e alte frequenze necessitano di più decibel per essere udite allo stesso volume di quelle centrali.

Ad ogni curva è associato un valore in **phon**. Ad esempio percepire un suono a 60 **phon** significa ricevere un suono a frequenza 1 KHz da 60 dB, oppure ricevere un suono da 30Hz a 90 dB.



Harvey Fletcher

(1884 – 1981)

- Noto come *Il padre della Stereofonia*
- Fisico, contribuì agli studi sulla percezione sonora. Lavorò nei Bell Labs, dove fu autore della prima trasmissione stereofonica dal vivo.





Stereofonia: Localizzazione delle sorgenti sonore → ITD e IID

- Interaural Time Difference (ITD)
- Interaural Intensity/Level Difference (IID o ILD)

