



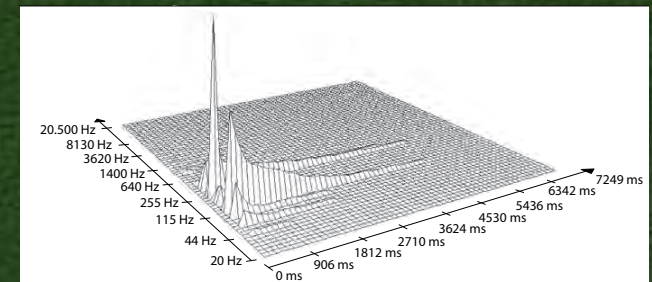
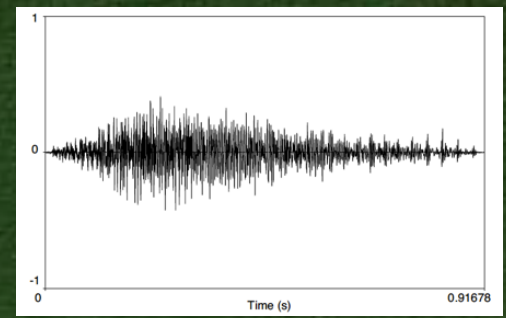
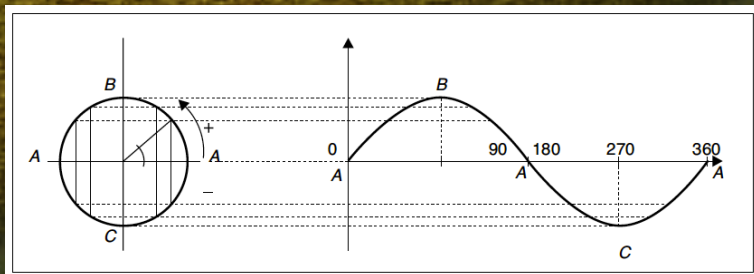
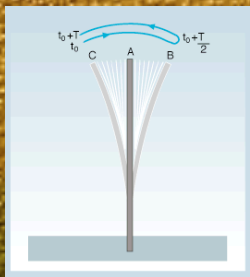
# Tecnologie digitali per il suono e l'immagine 2020/21

Vincenzo Lombardo  
Corso di Laurea in DAMS  
Università di Torino

Mutuato in parte da Elaborazione audio e musica  
(Laurea Magistrale di Informatica)

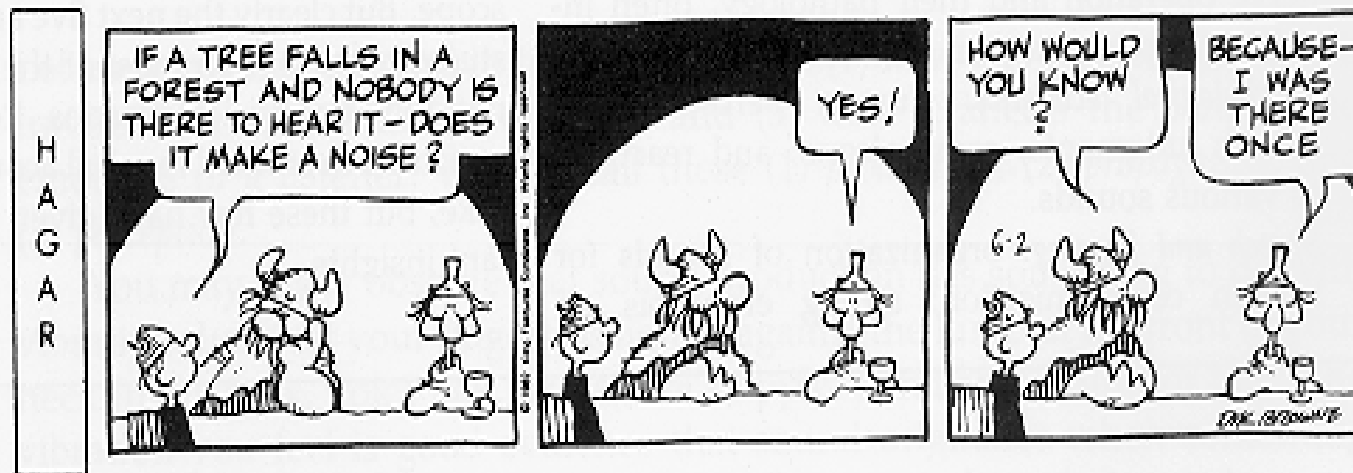


# Cenni di acustica





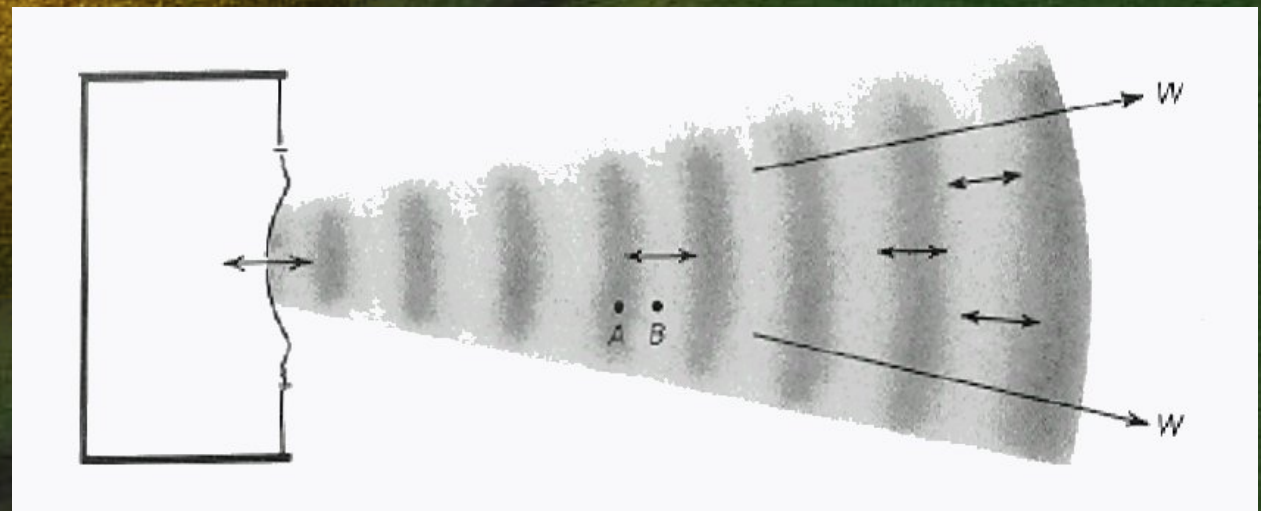
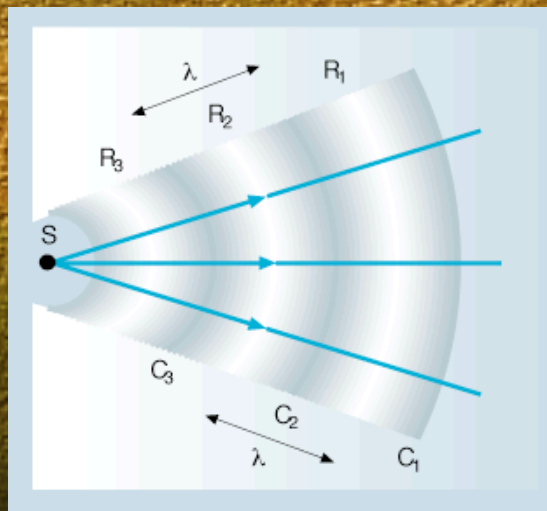
# La natura del suono





# La natura fisica del suono

onde che trasportano energia lontano dalla sorgente (oggetto che vibra)

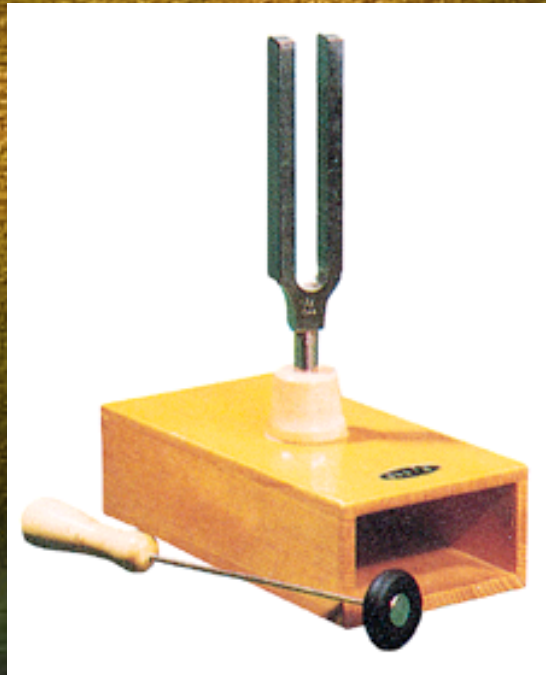


[da CD Vicino alla Musica – Federico Tibone]

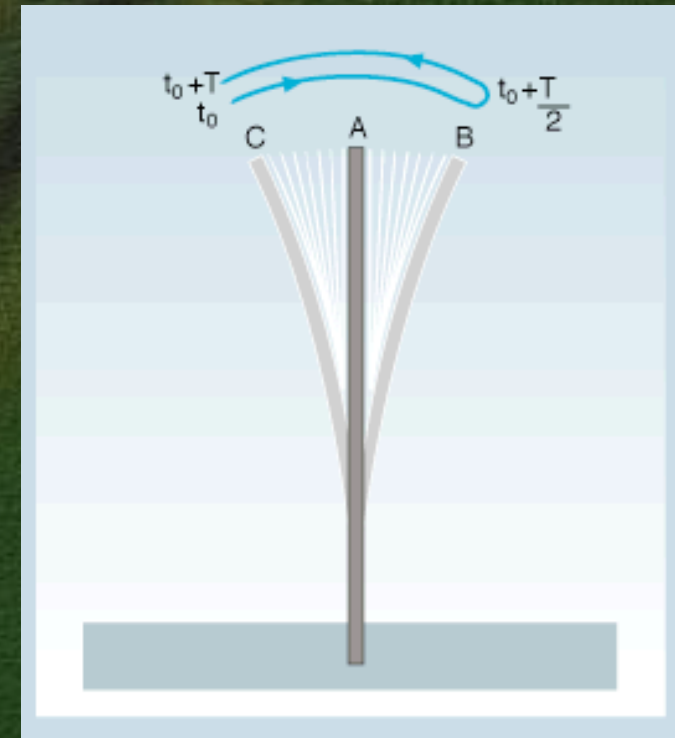


# Vibrazione

movimento rapido avanti e indietro di un oggetto o di una sua parte  
(punta del diapason)



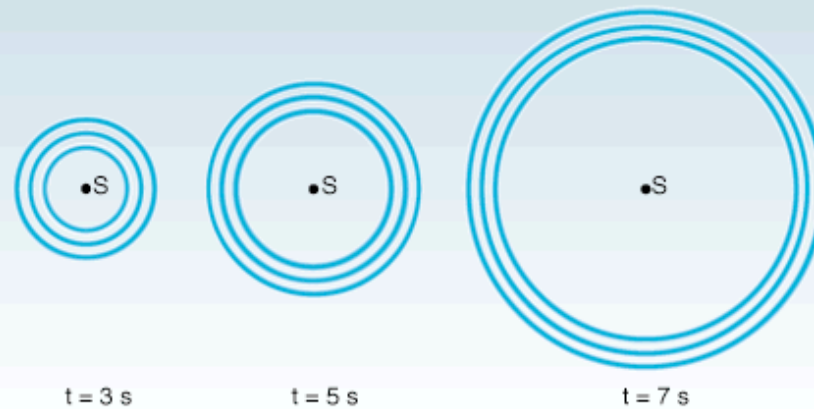
[da CD Vicino alla Musica –  
Federico Tibone]





# Onda

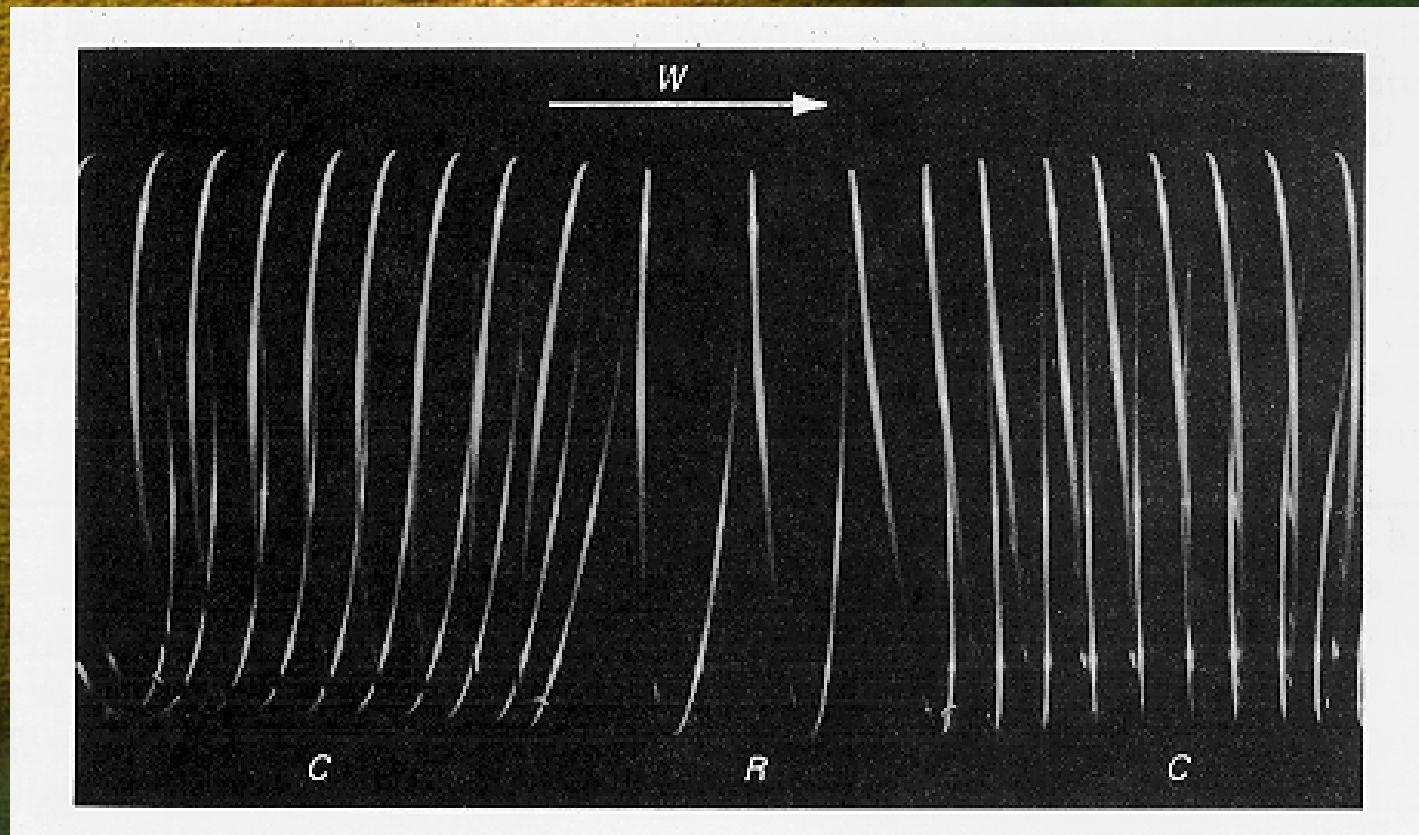
Disturbo, non materiale, viaggia lontano dalla sorgente in tutte le direzioni (onde sull'acqua)



[da CD Vicino alla Musica –  
Federico Tibone]



# Onda longitudinale (vs. trasversale)

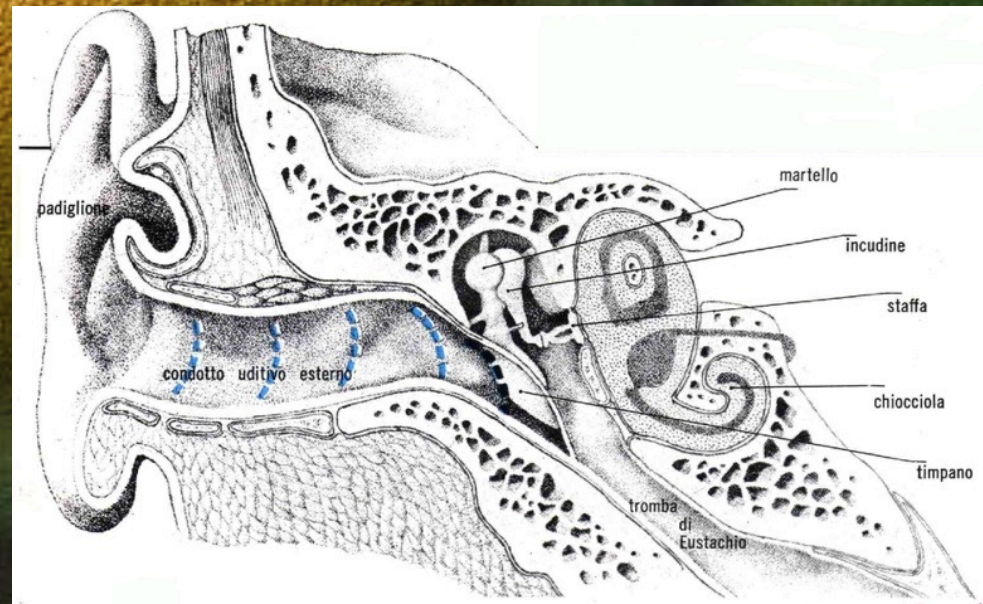


[da Peirce  
Scienza del suono]



# L'orecchio

- sulla traiettoria può esserci il timpano
- riconoscimento della voce di una persona nota
- riconoscimento del suono di uno strumento (addirittura dello strumentista)





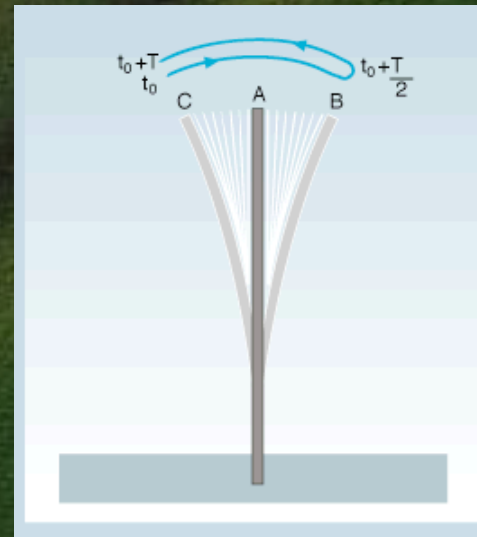
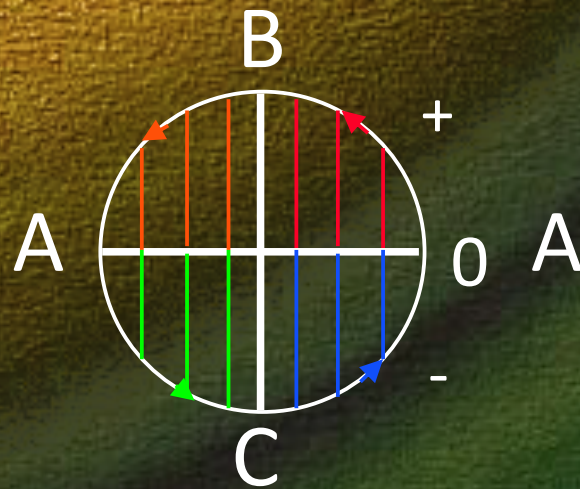
# Come ci arrivano i suoni

- Musica: combinazione intenzionale (disciplinata) di suoni con obiettivo di fruizione estetica
- Linguaggio: comunicazioni mediante parole piuttosto che emozioni direttamente
- Rumore: termine usato in modo vago per indicare tutti gli altri suoni (non organizzati, non piacevoli, o non voluti)



# Produzione del suono

- tutte le sorgenti sonore (musicali) oscillano
- ogni vibrazione è detta ciclo
- ogni segnale sonoro comprende molti cicli

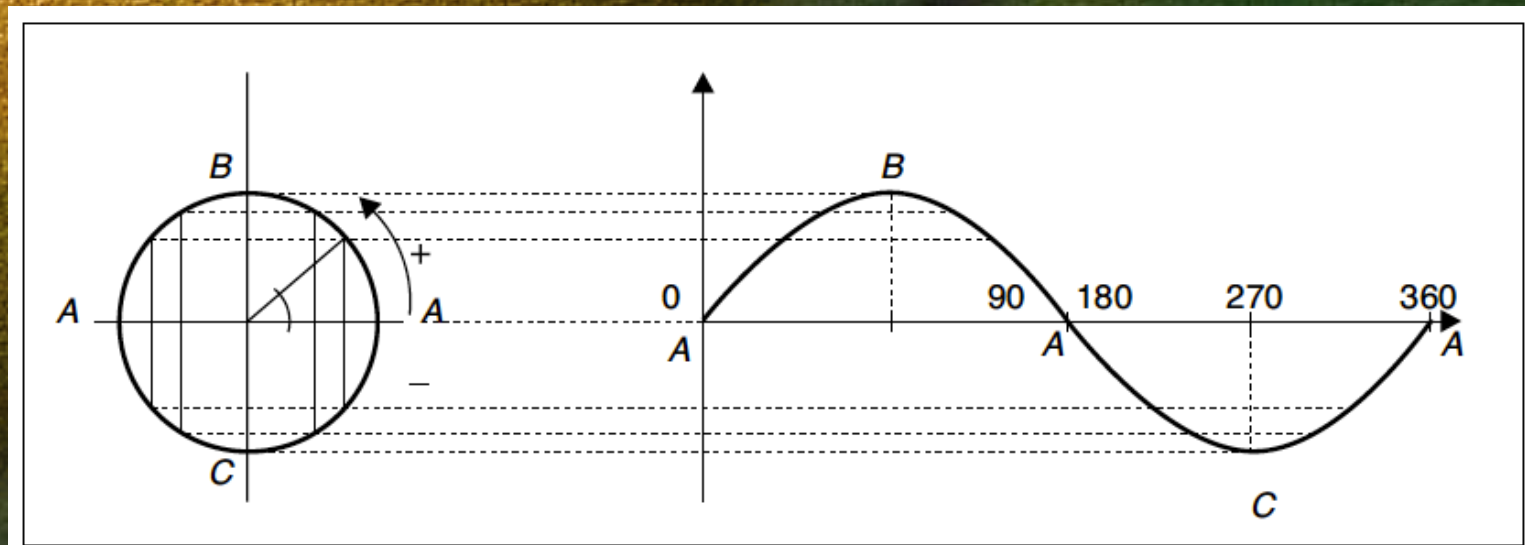




# Il moto armonico semplice

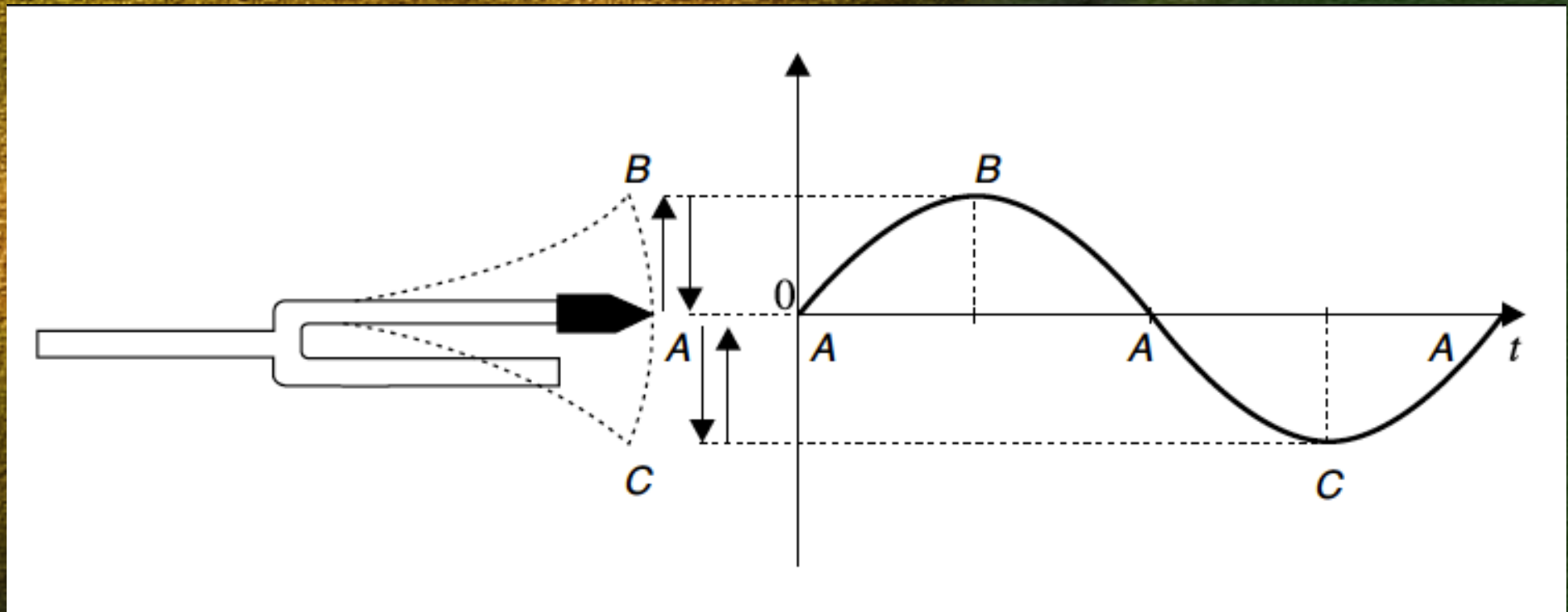
- rappresenta la vibrazione corrispondente al suono più semplice
- movimento *sinusoidale* e onda *seno*

Scienza delle onde sonore è costruita sulle onde sinusoidali



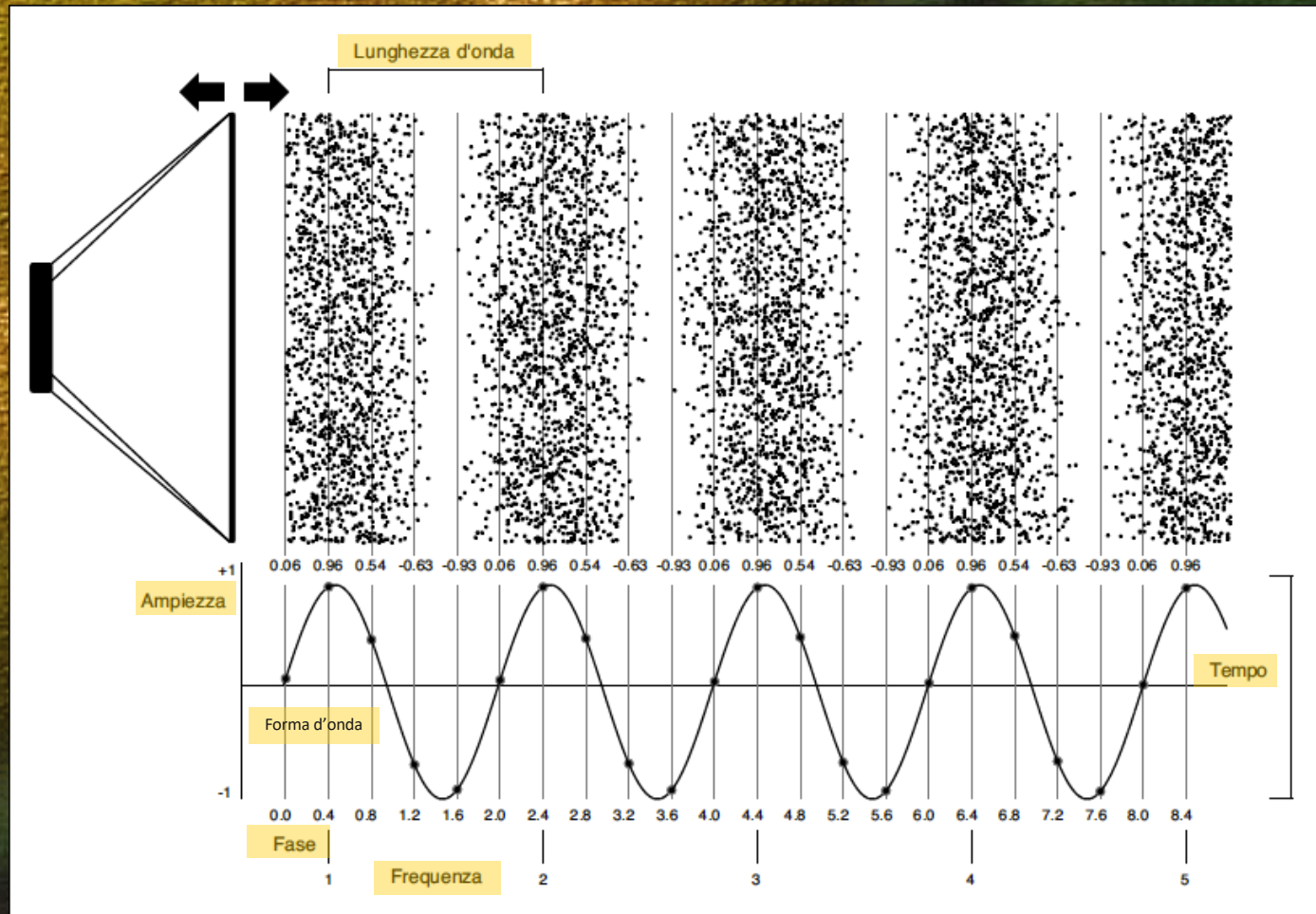


# Vibrazione del diapason





# Parametri moto armonico







L'ampiezza



# La forza del suono

- ampiezza dello spostamento
- misura dello spostamento di ogni unità d'aria dalla posizione a riposo durante la vibrazione
- misura molto piccola per suoni ordinari (ordine di  $1 \mu$ )



## Due tipi di misura

- pressione sonora dell'aria dovuta alla compressione e rarefazione delle particelle
- Sound Pressure Level – SPL
  
- intensità sonora, cioè energia trasportata dall'onda sonora
- Sound Intensity Level – SIL



# Pressione sonora

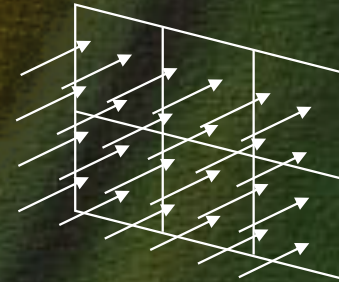
- max incremento della pressione dell'aria (rispetto alla pressione atmosferica) in una compressione
- misura piccola ( $1/10^6$  della pressione atmosferica)
- misurabile con i diaframmi dei microfoni



# Pressione

- forza
  - unità di misura: newton ( $1/2 \text{ Kg} \sim 5 \text{ N}$ : un flauto)
  - direzione della forza
- pressione: forza applicata a una superficie
  - $p=F/S$  (forza per unità di superficie -  $\text{N}/\text{m}^2$ )
  - unità di misura comune: atmosfera ( $10^5 \text{ N}/\text{m}^2$  - pressione esercitata dall'aria su ogni superficie)

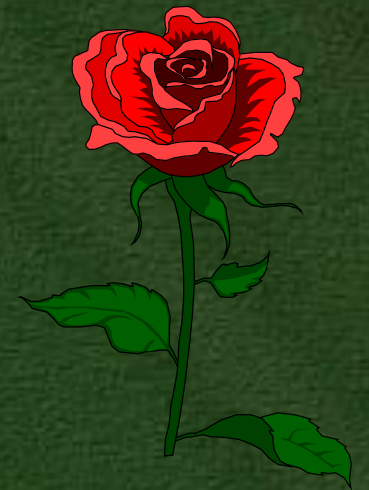
Una forza di 24 N esercitata su un'area di  $6 \text{ m}^2$ .





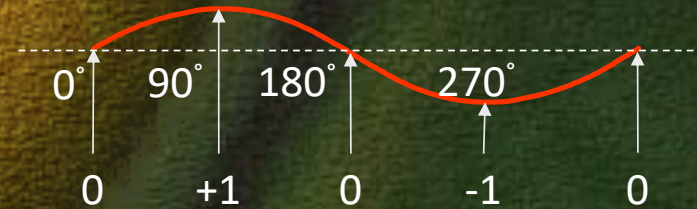
## Esempio: peso donna con tacco sottile

- 50 Kg (500 N) distribuiti su un'area di 2 cm<sup>2</sup> (0,0002 m<sup>2</sup>)
- può ammaccare un pavimento più di una zampa di elefante (10.000 N su 0,1 m<sup>2</sup>)
- pressione
  - elefante:  $10.000 / 0,1 = 100.000 \text{ N/m}^2$
  - donna:  $500 / 0,0002 = 2.500.000 \text{ N/m}^2$  (25 volte in più)





# Attenzione: Root Mean Square



- Variazione media della pressione rispetto alla pressione atmosferica
- Problema: media di valori + e valori - tende a 0
- Pressione quadratica media e pRMS
- Esempio intuitivo
  - 4 valori equispaziati: 0 a 0°, +1 a 90°, 0 a 180°, -1 a 270°

$$RMS = \sqrt{\frac{0^2 + 1^2 + 0^2 + (-1)^2}{4}} = \sqrt{\frac{2}{4}} = \sqrt{0,5} = 0,707$$



# L'ampiezza quotidiana

- Suono più debole (soglie di udibilità)
  - soglia minima =  $0,000025 \text{ N/m}^2$  ( $2,5 \times 10^{-5}$ )
  - dipende dalla frequenza (tono puro di 1000 Hz)
  - $\text{pa} = 100.000 \text{ N/m}^2$ , % irrisoria ( $0,000000025 \%$ )
- Suono più forte (soglia del dolore)
  - pressione di circa  $30 \text{ N/m}^2$
  - un milione ( $10^6$ ) di volte la soglia minima
  - % della pressione atmosferica irrisoria (circa  $0,03\%$ )



# Intensità sonora

- $I$  = energia (joule) al secondo (Watt) al  $m^2$  ( $W/m^2$ )
- Relazione tra intensità sonora e pressione sonora

$$I = p^2 / (\rho c)$$

dove

- $\rho$  è la densità del mezzo
- $c$  è la velocità del suono
- Es. aria (condizioni medie)
  - $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 340 \text{ m/s}$ ,  $p_0 = 0,000025 \text{ N/m}^2$
  - $I_0 = p_0^2 / (\rho c) = (0,000025)^2 / (1,2 \times 340) = 0,000000000001532$ , circa  $10^{-12} \text{ W/m}^2$



# Variabilità intensità sonora

- $I_{MAX}$  suono che produce dolore fisico
- $I_0$  suono appena udibile
- Rapporto  $I_{MAX} / I_0$  oltre  $10^{12}$
- Conviene introdurre i decibel (SIL)



# Il logaritmo





# Bel e decibel

- Bel come relazione tra due suoni!
- 1 bel = rapporto tra due intensità
- 1 dB = 1/10 bel
  
- SIL e SPL si misurano in dB



# I decibel assoluti

- Livello di intensità sonora (SIL)
  - $SIL = 10 \log (I / I_0)$   
con  $I_0 = 0.000000000001 \text{ W/m}^2$
- Cosa vuol dire “quel suono è oltre 75 dB” ?
  - Si ha un'intensità  $I$  tale che  $10 \log (I / I_0) = 75$
  - $I_0 =$  intensità di riferimento ( $0,000000000001 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ )
  - $I =$  intensità sonora in esame ( $0,000031622776602 = 10^{-4,5} \text{ W/m}^2$ )



## Esempio: suono di 90 dB

- Suono di 90 dB = intensità  $10^9$  volte più forte di  $I_0$  ( $10^{-12}$ ) =  $10^{-3}$  W/m<sup>2</sup>
- Intensità della luce solare
  - intensità tipica =  $10^{+3}$  W/m<sup>2</sup>
  - 1 milione di volte in più ( $10^{+3}$  VS  $10^{-3}$ )
  - 90 dB è una piccolissima energia (è un suono forte!)
- Le nostre orecchie sono potentissimi rilevatori!!!



# Intensità caratteristiche

	Suono	SPL (dB)	Reazione
Massimo rumore prodotto in laboratorio		210	Suono insopportabile
Lancio di un missile (a 50 m)		200	
Rottura del timpano		160	Dolore fisico
Jet al decollo (a 50 m)		130	
Suono al limite del dolore		120	
Complesso rock in locale chiuso		110	
Schianto di fulmine		110	
Urlo (a 1,5 m)		100	Suoni utili
Martello pneumatico (a 3 m)		90	
Traffico cittadino diurno		70-80	
Ufficio o ristorante (affollati)		60-65	
Conversazione (a 1 m)		50	
Teatro o chiesa (vuoti)		25-30	
Bisbiglio (a 1 m)		15	
Fruscio di foglie		10	
Zanzara vicino all'orecchio		10	
Soglia dell'udito (a 1000 Hz)		0	

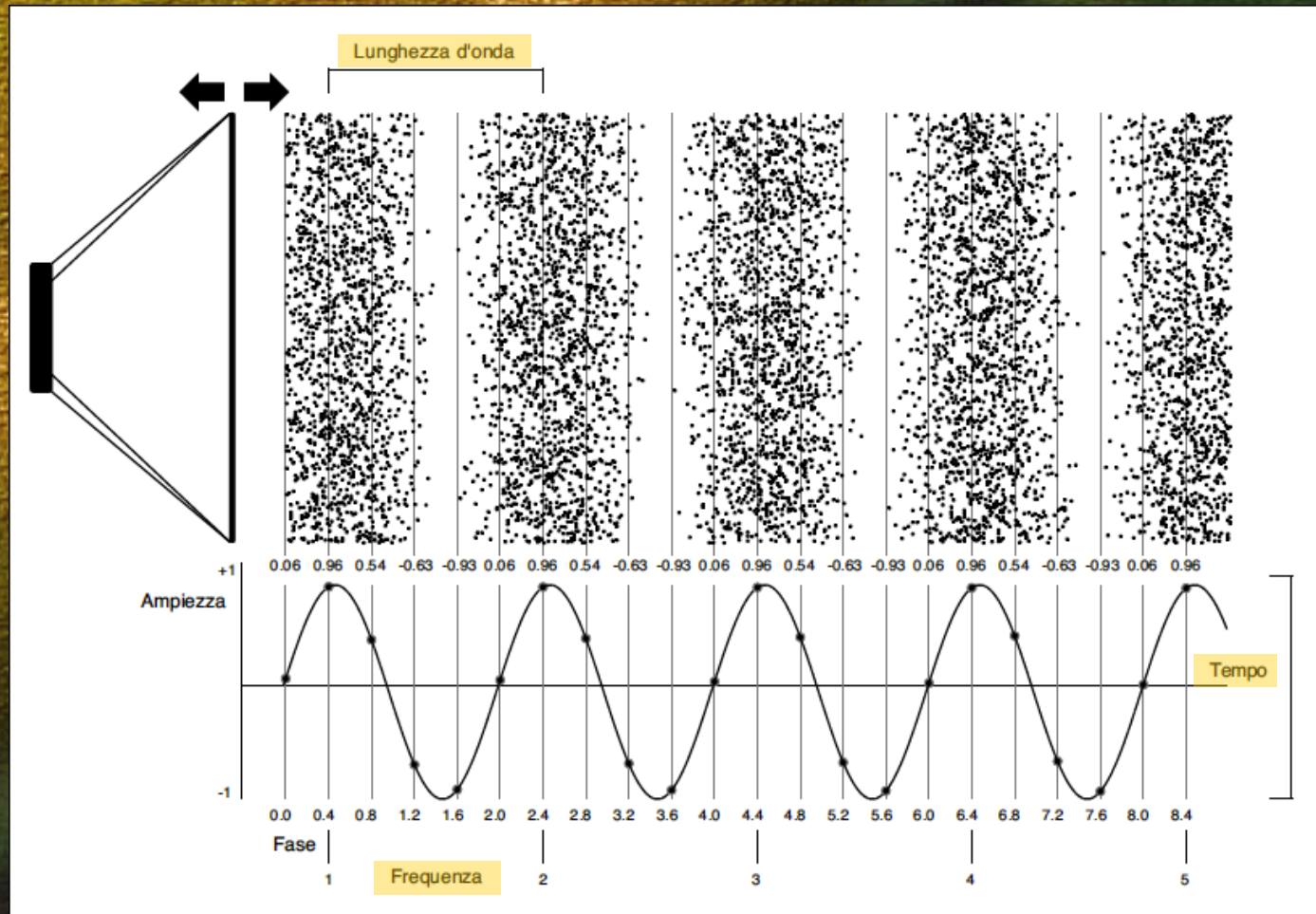


# Intensità in musica

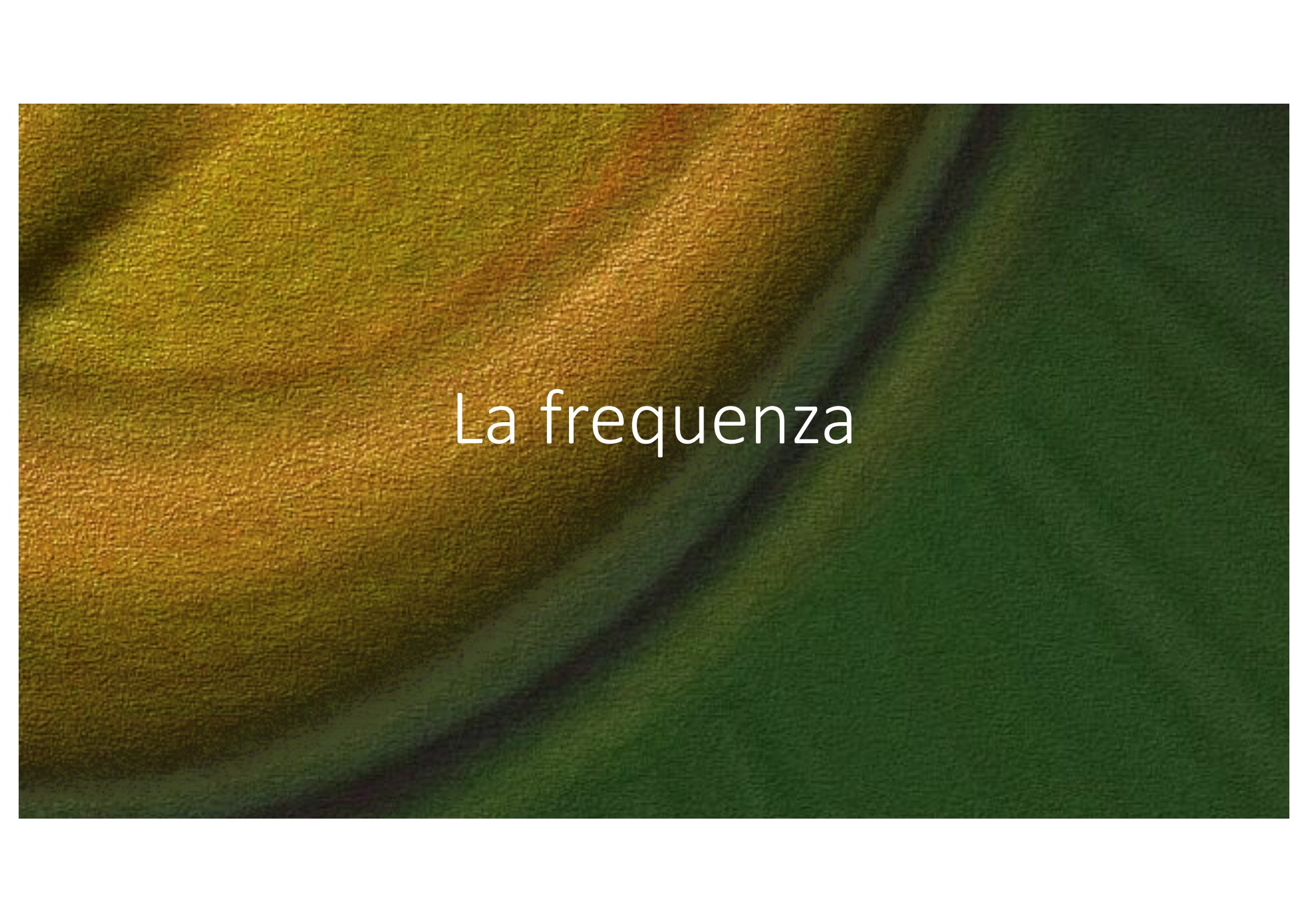
- Sotto i 50 dB raramente utili
- Sopra i 100 dB dannosa (~115 dB concerti rock)
  - 70 dB tipica intensità media (mf o mp)
  - 60, 50, 40 per p, pp, ppp
  - 80, 90, 100 per f, ff, fff
- Sono valori che esagerano le differenze



# Parametri moto armonico



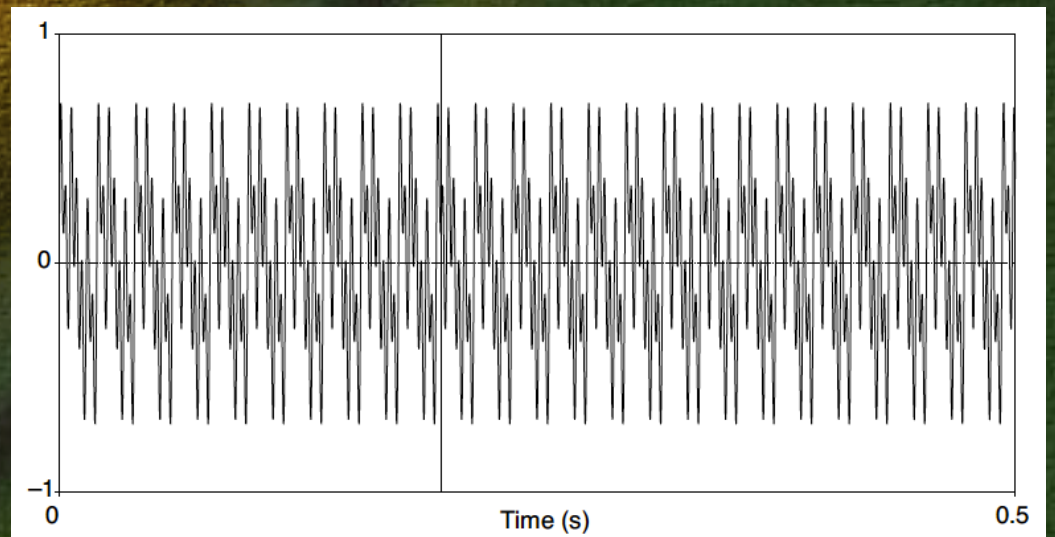
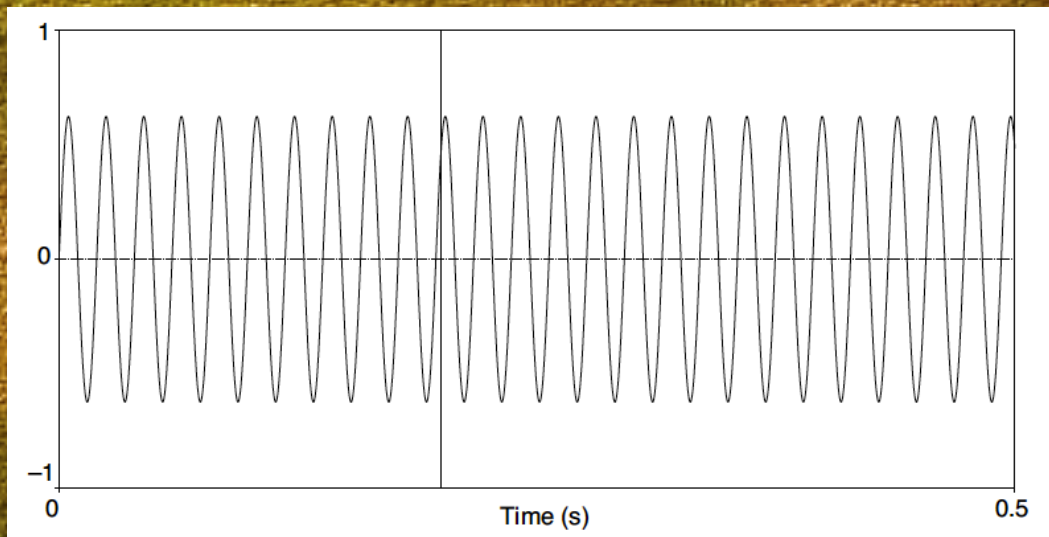




La frequenza

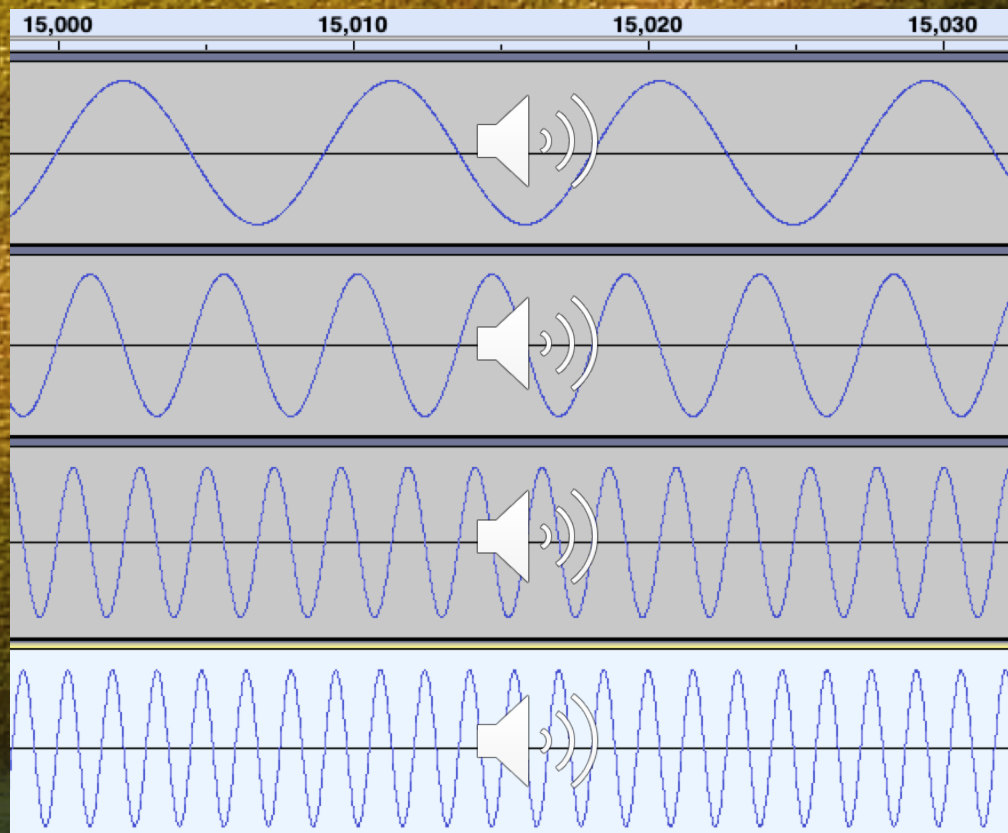


# Suoni di 50,72 Hz





# La frequenza: i suoni puri



Onda sinusoidale a 110 Hz

Onda sinusoidale a 220 Hz

Onda sinusoidale a 440 Hz

Onda sinusoidale a 660 Hz

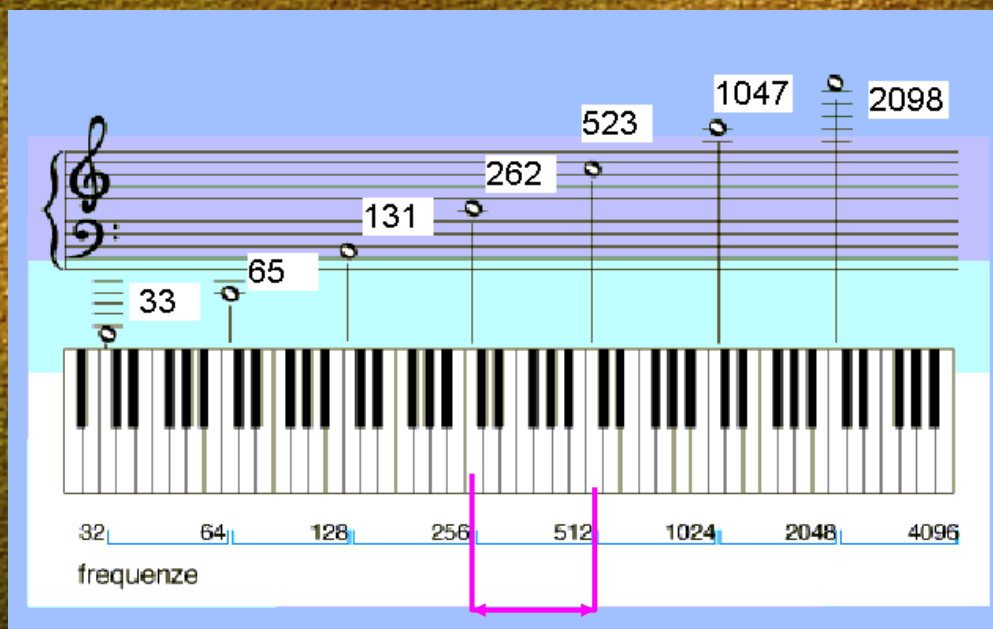


# Frequenze caratteristiche

<b><i>Suono</i></b>	<b><i>Frequenza (Hz)</i></b>
La nota più bassa di un pianoforte	27,5
La nota più bassa di un cantante basso	100
La nota più bassa di un clarinetto	104,8
Il do centrale del pianoforte	261,6
Il la oltre il do centrale	440
L'estensione superiore di un soprano	1000
La nota più alta di un pianoforte	4180
L'armonica superiore degli strumenti musicali	10000
Il limite dell'udito nelle persone anziane	12000
Il limite dell'udito	16000-20000



# Le frequenze (approssimate) dei Do nel pianoforte



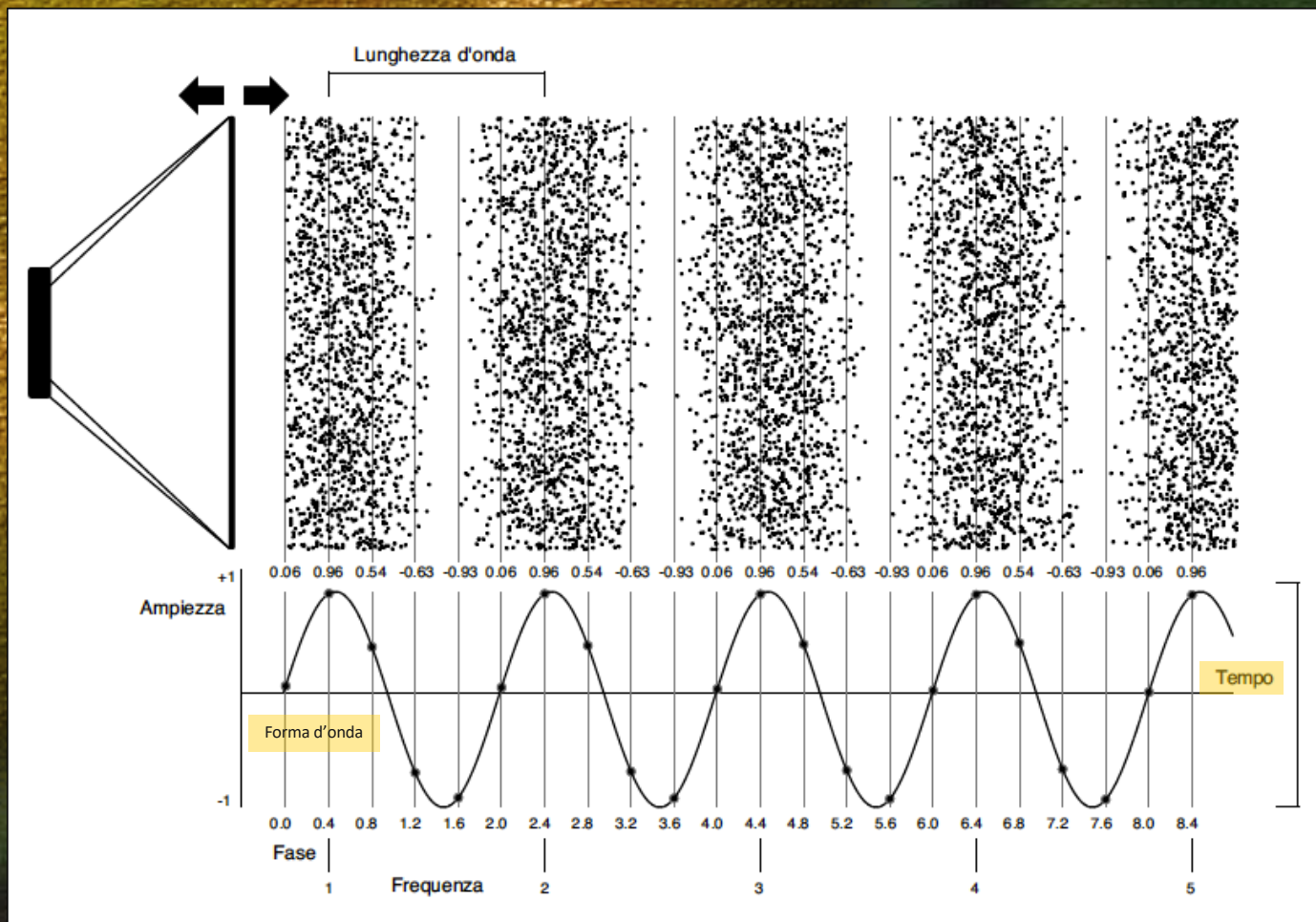
frequenze delle note

della quarta ottava (include il do centrale)

do4	261,60	re4	293,66
mi4	329,63	fa4	349,23
sol4	392,00	la4	<u>440,00</u>
si4	493,88	do5	523,20



# Parametri moto armonico





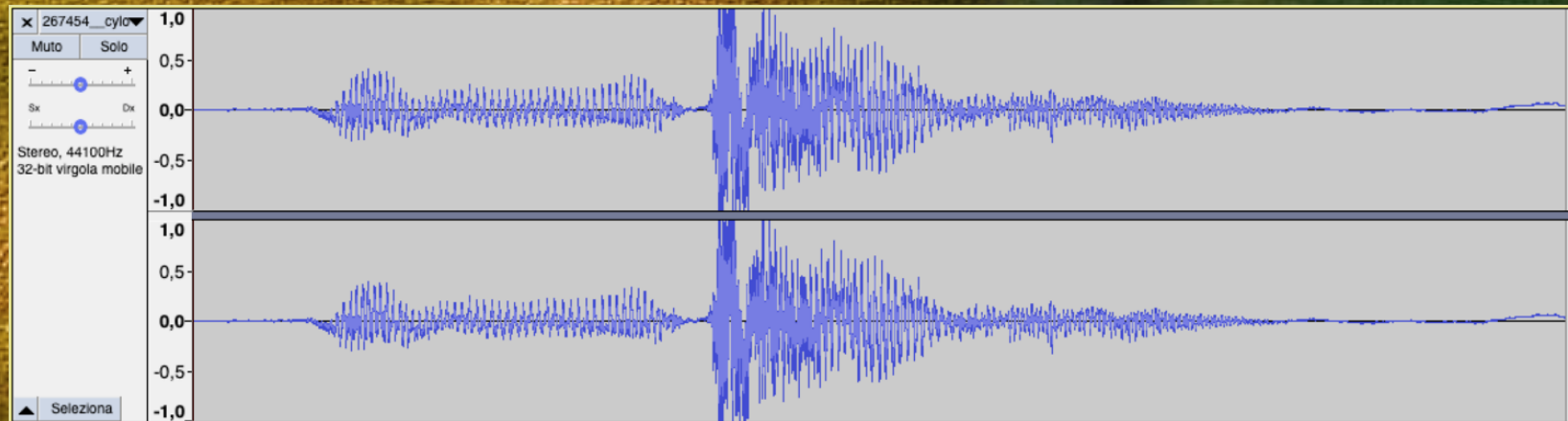
The background of the slide features a large, abstract wave pattern. The wave is oriented diagonally, moving from the top-left towards the bottom-right. The color of the wave transitions from a bright yellow on the left side to a dark green on the right side. The overall texture is grainy and organic, resembling a natural wave or perhaps a microscopic view of a material's surface.

Forma dell'onda



# I suoni in natura

Ruggito di un leone

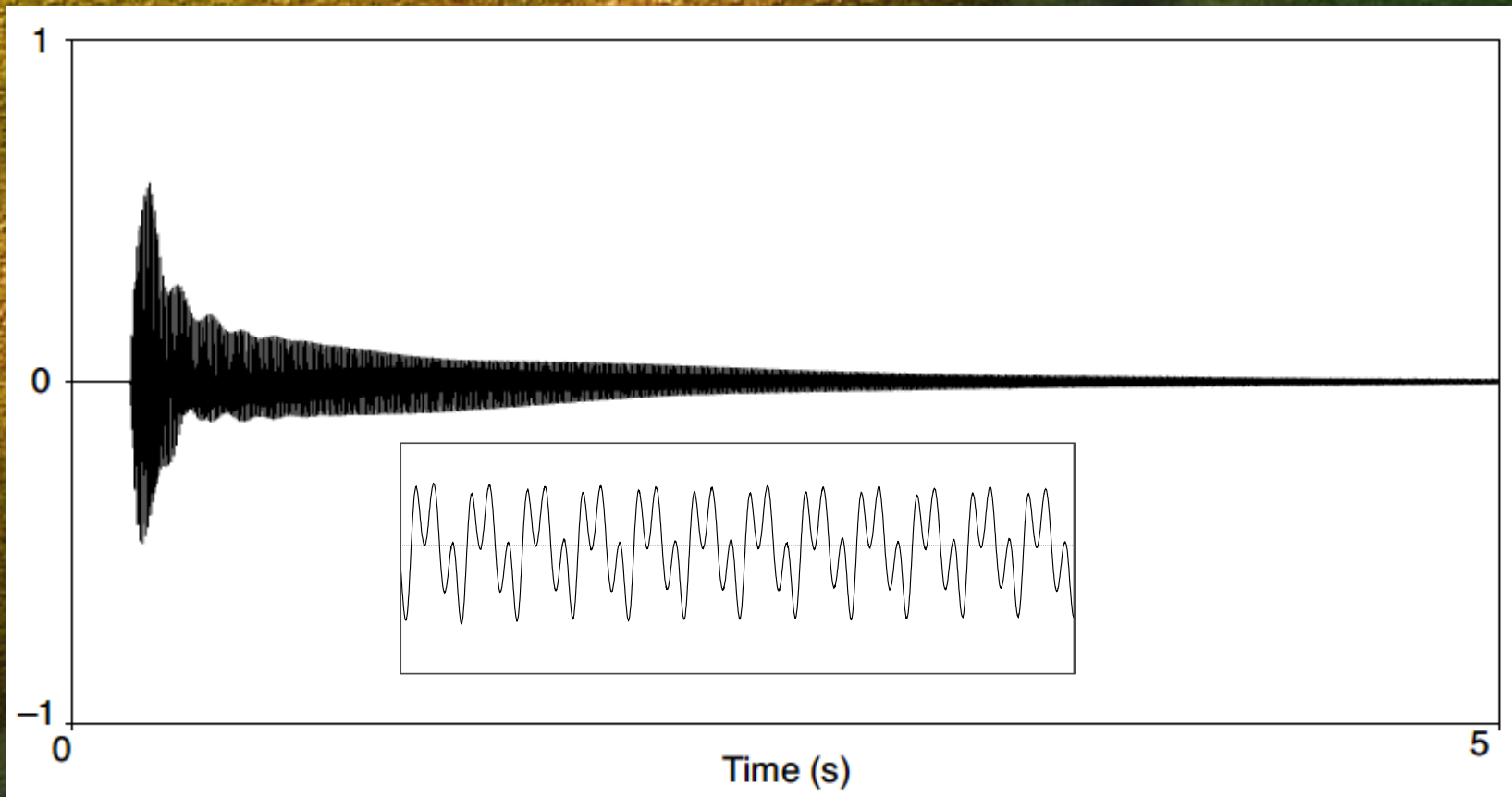


*freesound.org*



# I suoni in natura

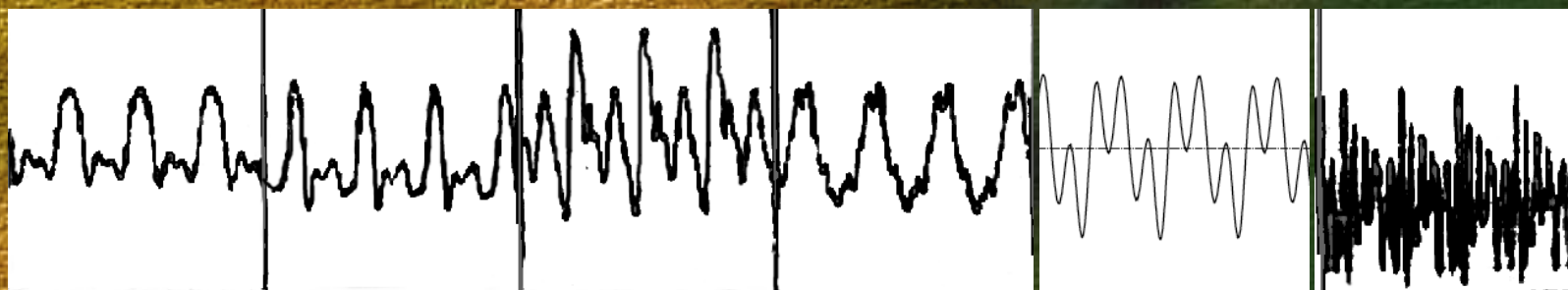
La<sub>2</sub> chitarra





# I suoni in natura

[ immagine adattata da Pierce ]



flauto

tromba

sax soprano

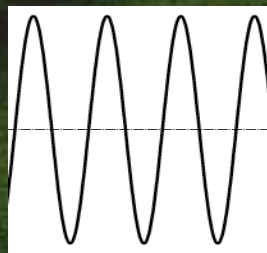
violino

chitarra

tuba

La<sub>4</sub> (440 Hz)  
8ms

La<sub>2</sub> (110 Hz)  
40 ms





# La forma d'onda

- Parametro che permette di discriminare tra
  - suoni emessi da sorgenti diverse ...
  - ... anche se con la stessa intensità e frequenza
- A grandi linee, il parametro percettivo del **timbro**



# I domini della forma d'onda

- Due elementi contribuiscono a forme d'onda complesse (e quindi al timbro)
- nel **dominio della frequenza**, le componenti spettrali
- nel **dominio del tempo**, i transitori



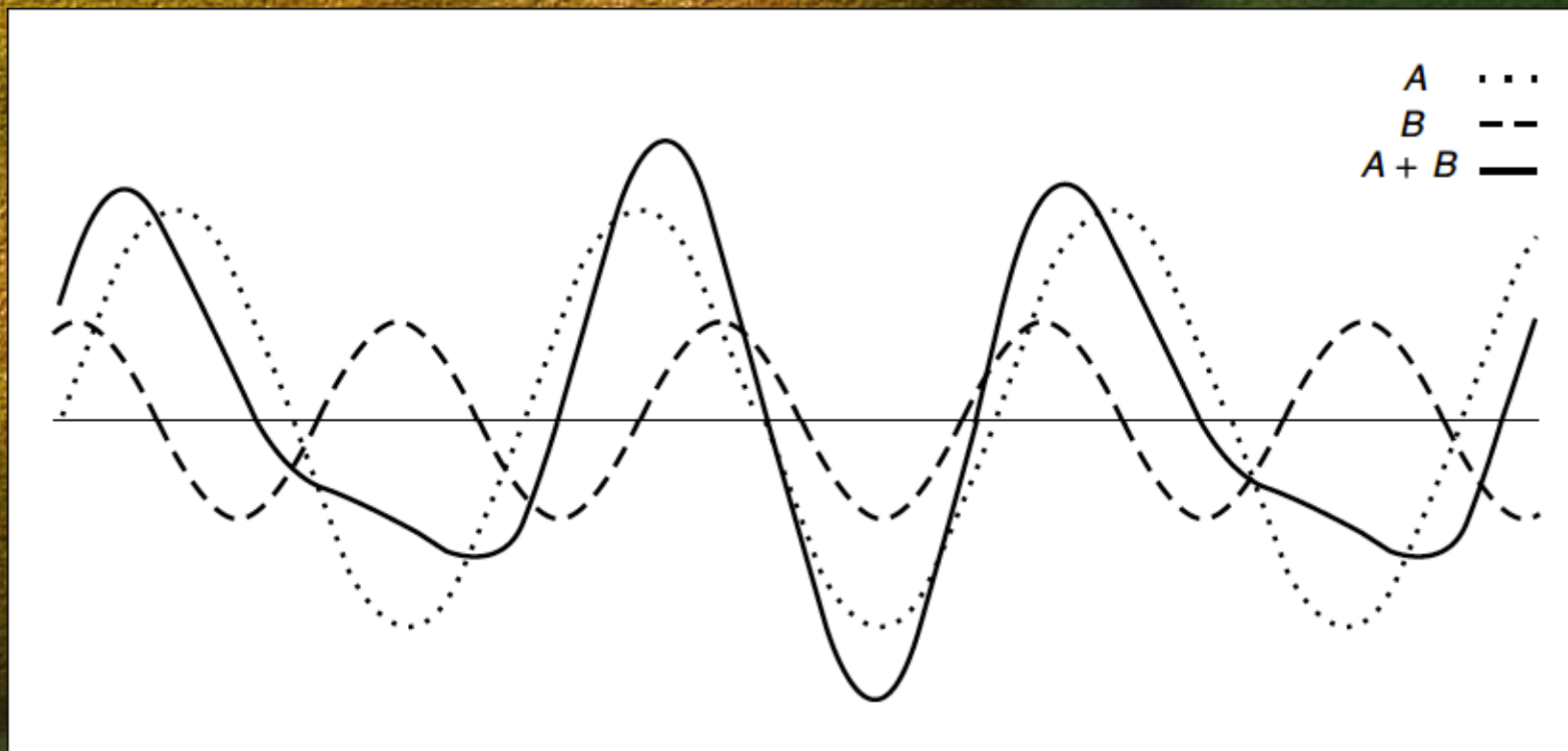
# Analisi dei suoni complessi: lo spettro di Fourier



[Fonte: Wikipedia]

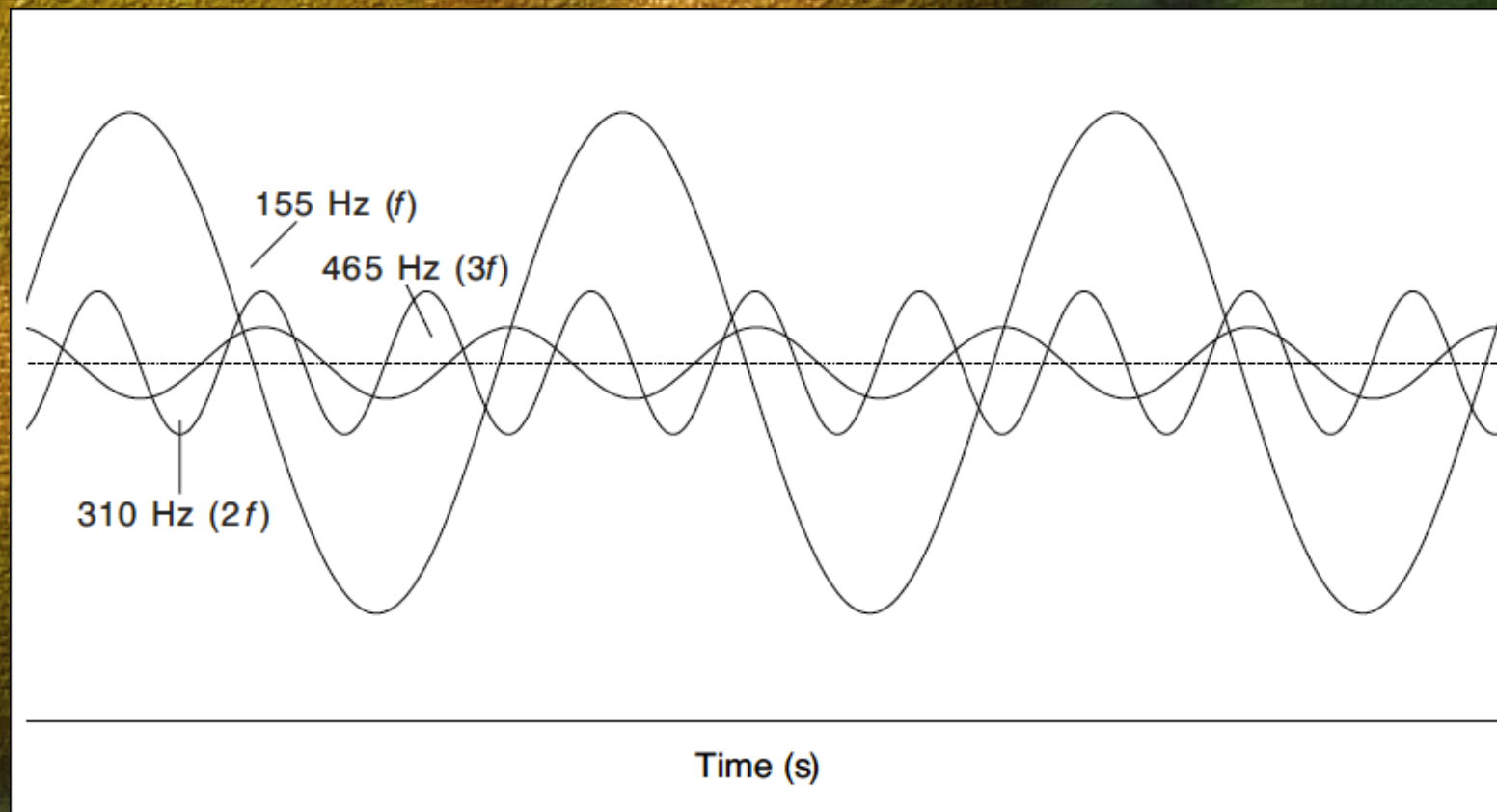


# Sovrapposizione di toni puri





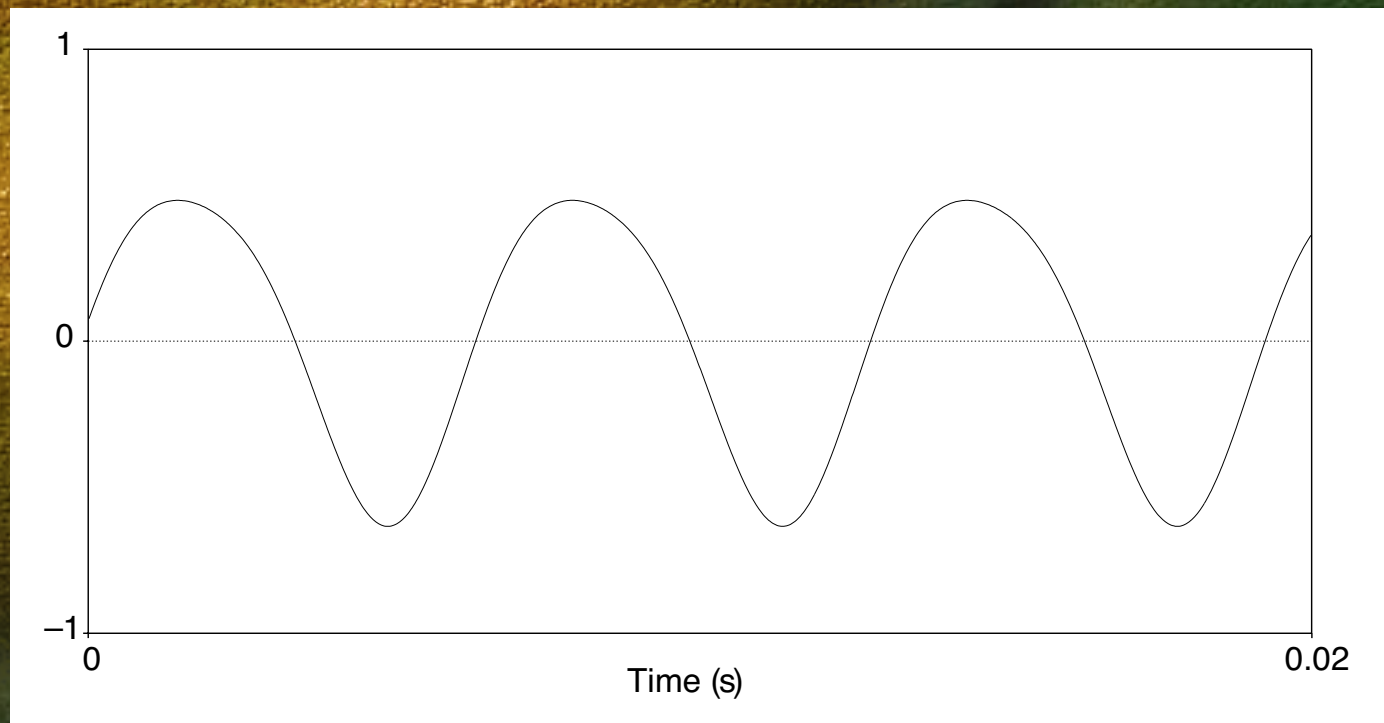
# Tre toni puri (individuali)





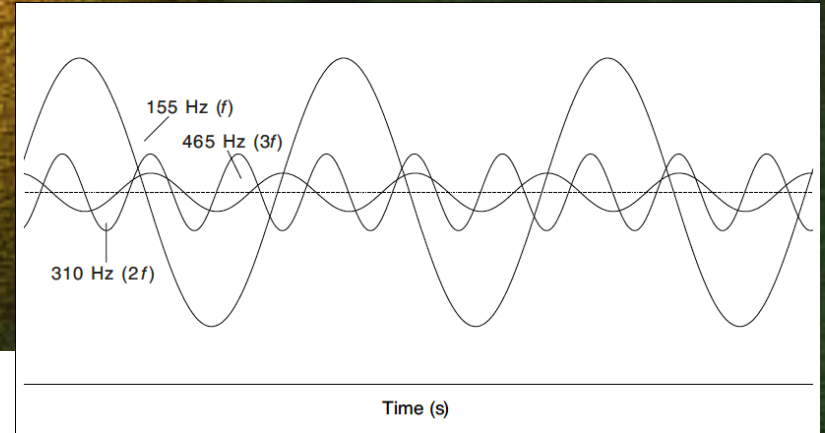
# Due toni puri (sovrapposti)

155 Hz + 310 Hz

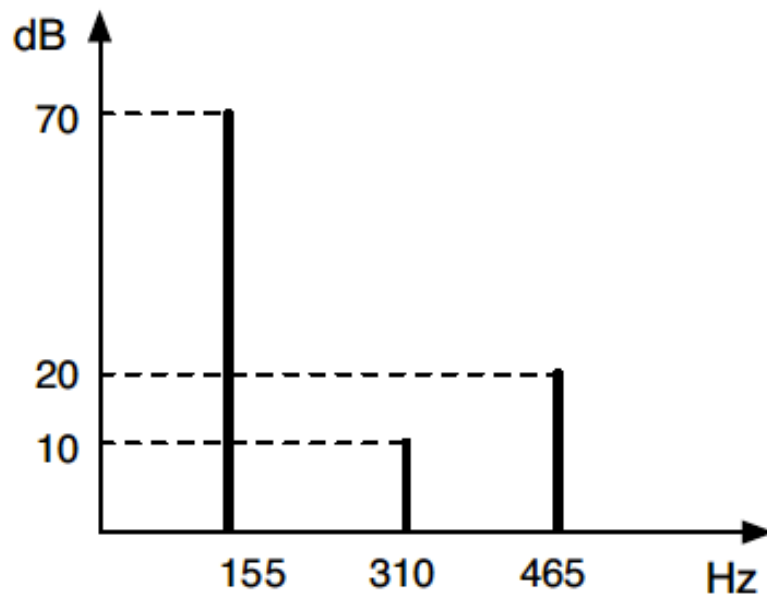




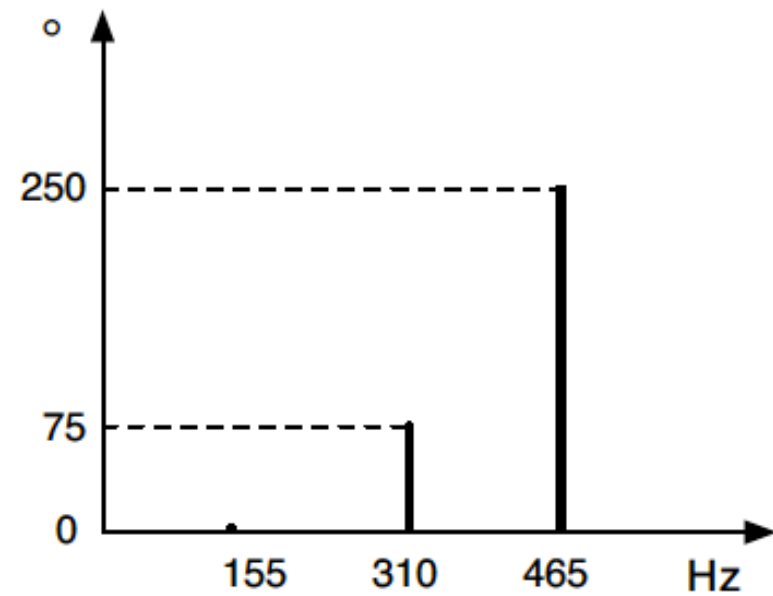
# Dominio della frequenza: gli spettri di ampiezza e fase



(a)

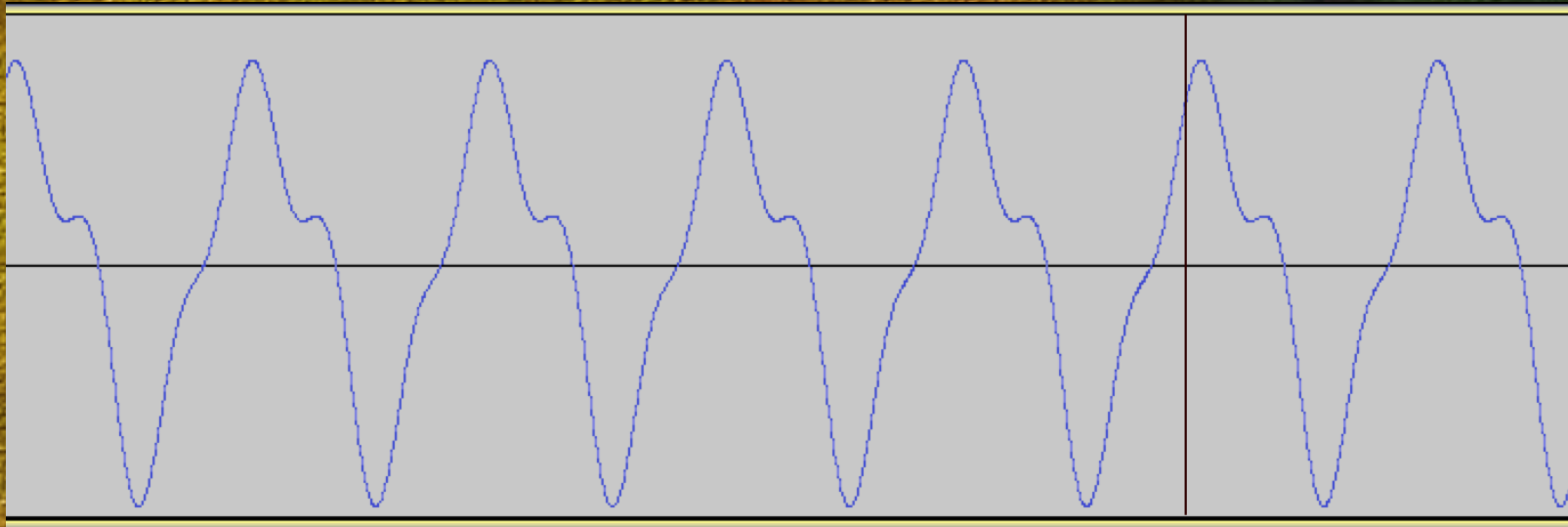


(b)



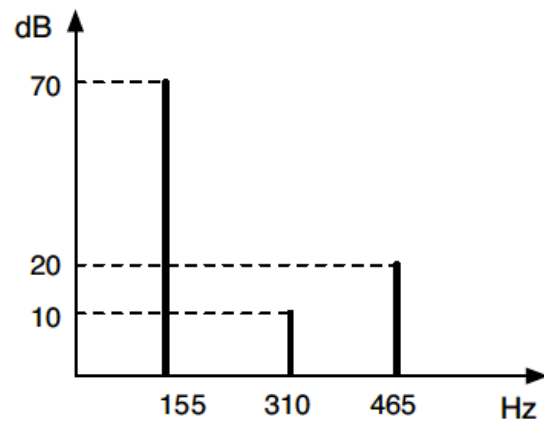


1)

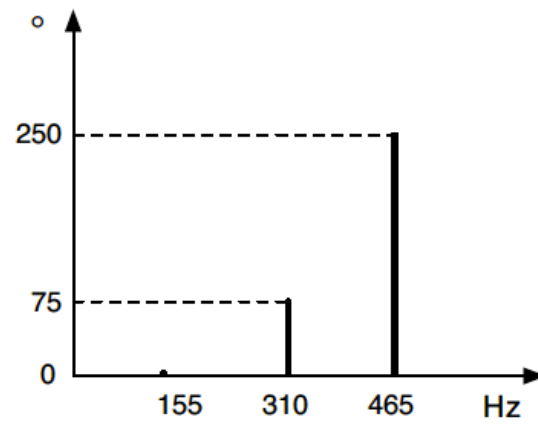


2)

(a)



(b)



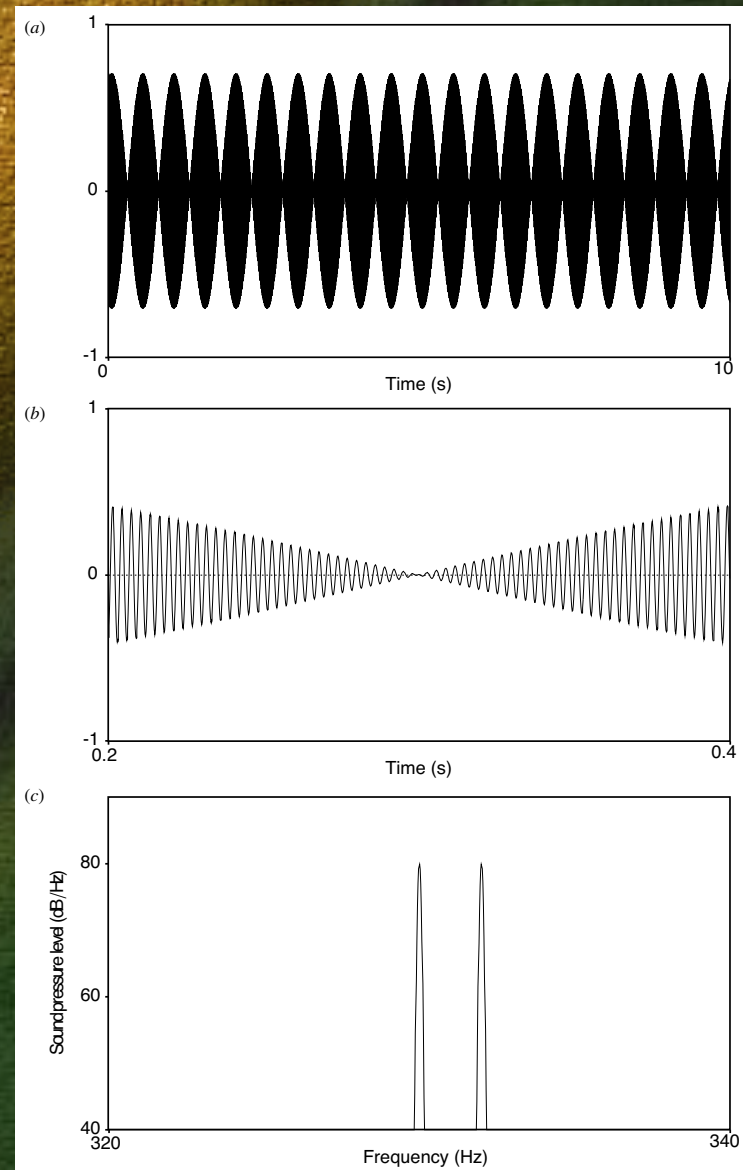


# Battimenti

Somma di due onde sinusoidali

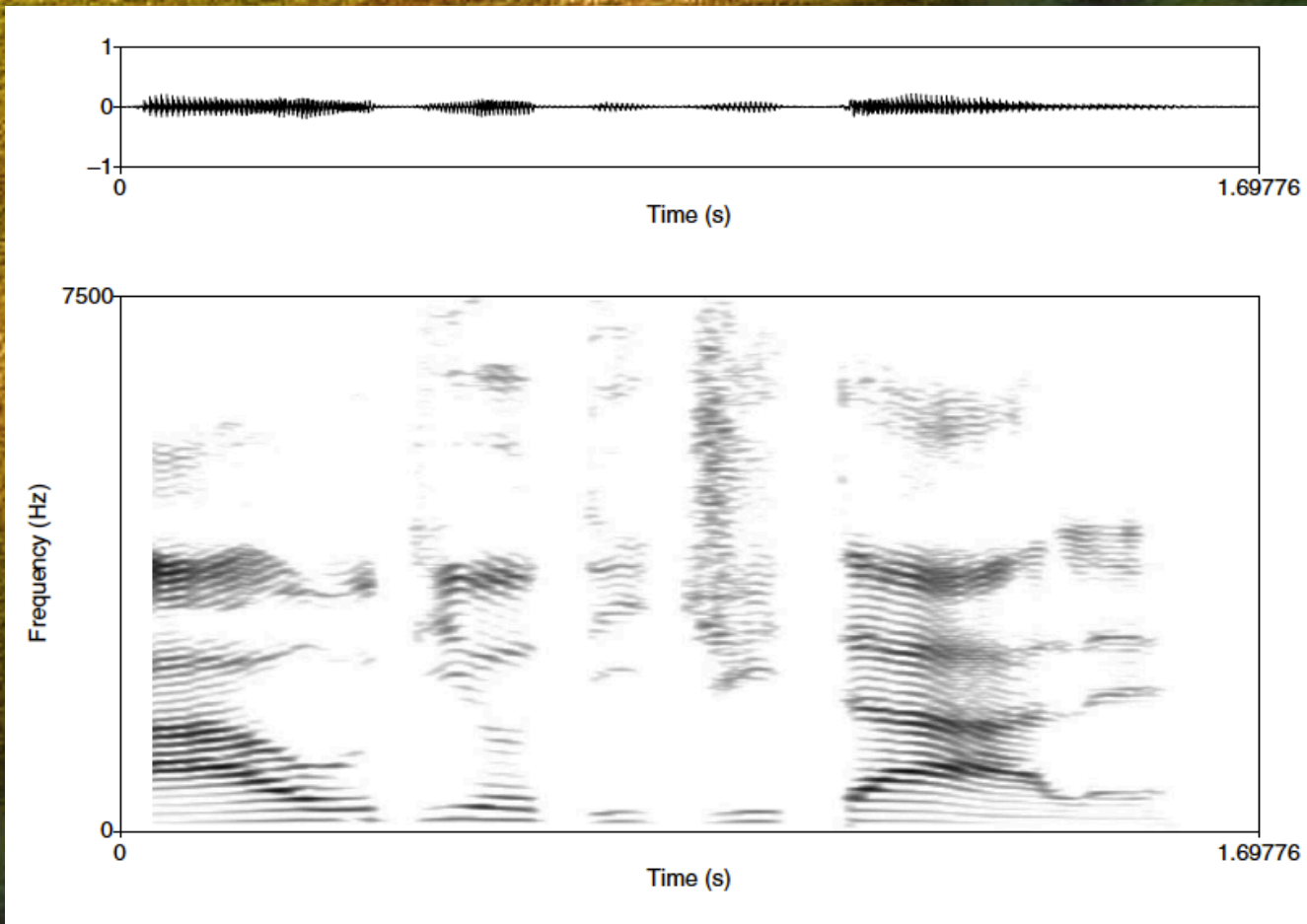
Dettaglio

Spettro di ampiezza





# Sonogramma

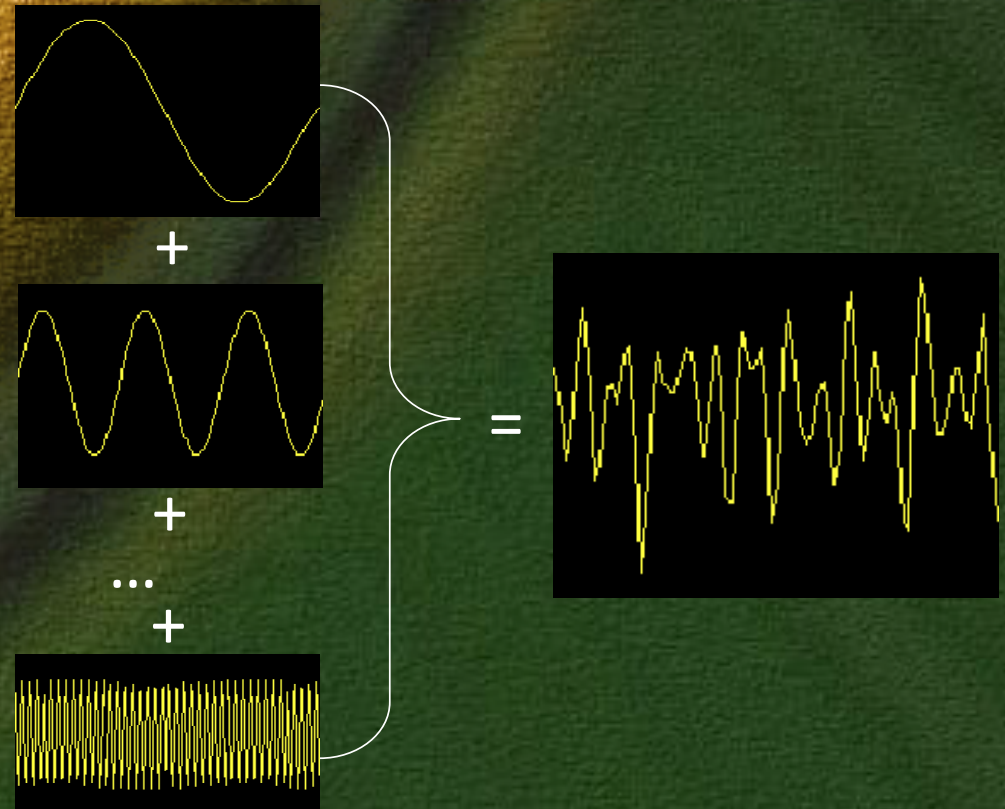




# Teorema di Fourier

Un segnale periodico qualsiasi, di periodo  $P$ , è dato dalla sovrapposizione di onde sinusoidali semplici, ciascuna con la sua ampiezza e fase, e le cui frequenze sono armoniche della frequenza fondamentale del segnale ( $f_1 = 1 / P$ )

Ogni onda sinusoidale avrà una sua fase ( $\phi_n$ ) e ampiezza ( $C_n$ ), e anche queste possono essere estratte dalla forma d'onda complessa.



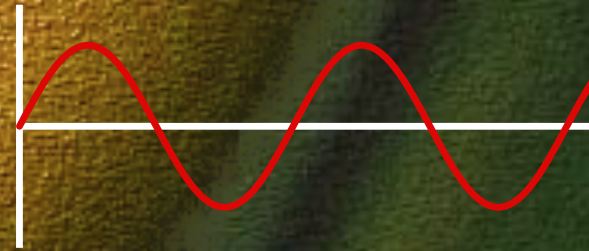


# Fourier

- Sintesi di Fourier: combinare onde sinusoidali per formare onde complesse
- Analisi di Fourier: individuare le componenti sinusoidali di una forma d'onda complessa
- Spettro di Fourier: insieme delle ampiezze delle onde sinusoidali (componenti di Fourier) che formano un'onda complessa



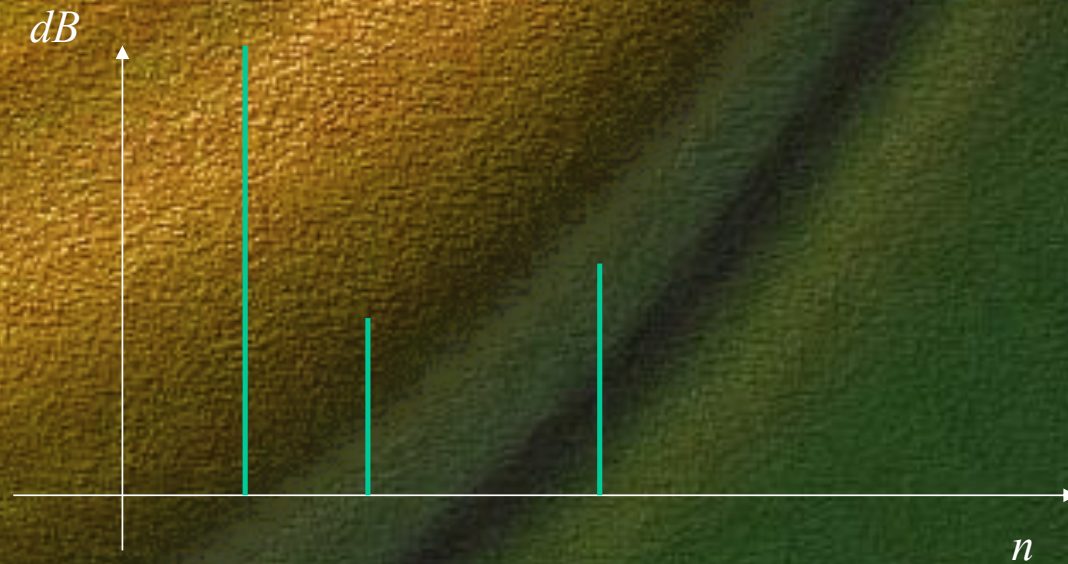
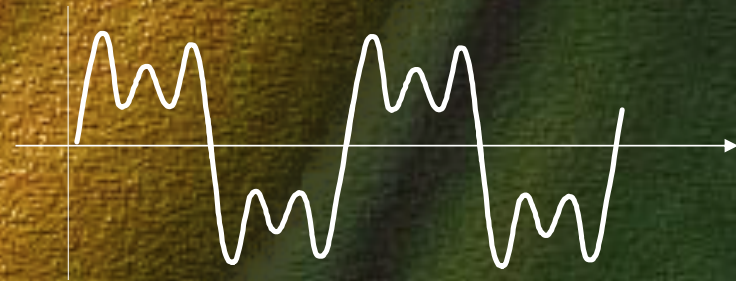
# Onda sinusoidale



Lo spettro contiene soltanto la fondamentale



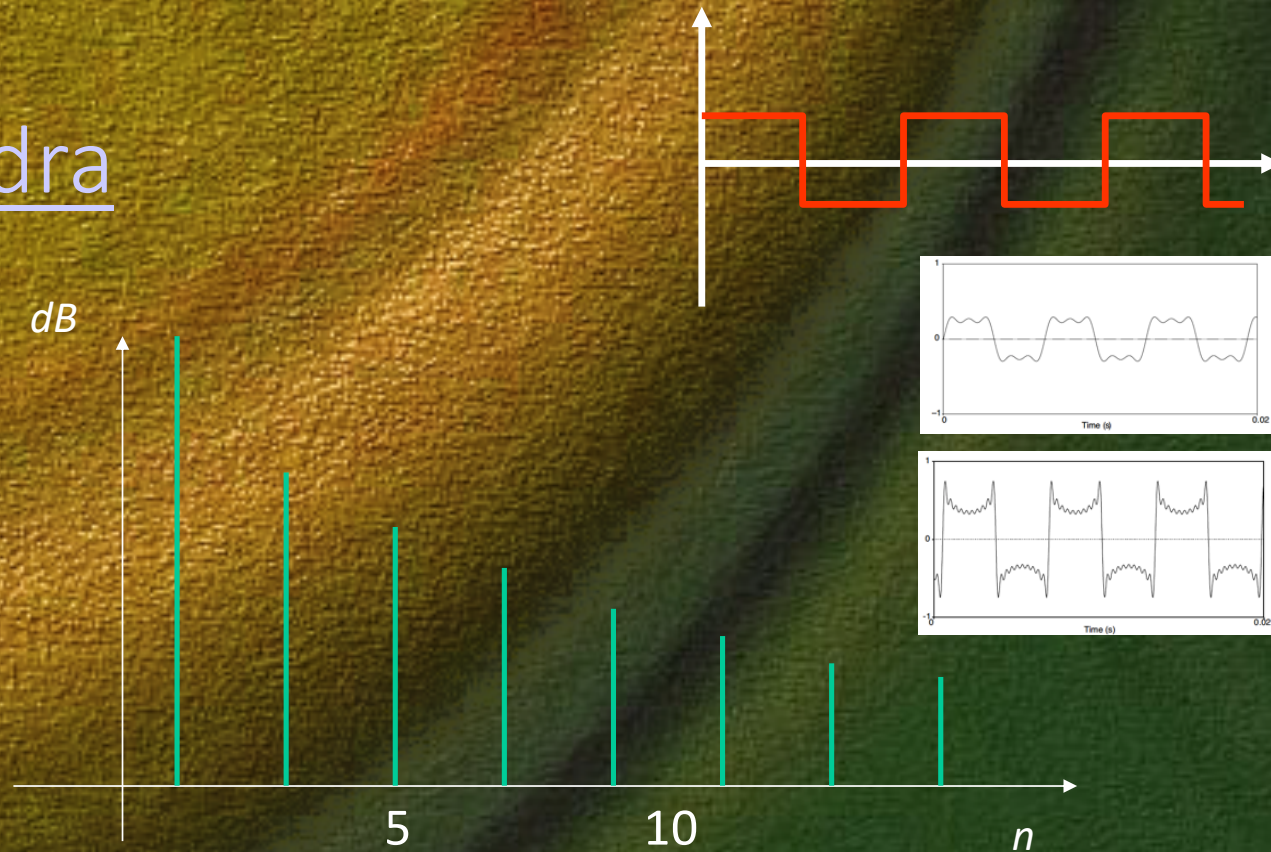
# Onda periodica



Lo spettro contiene le tre frequenze componenti



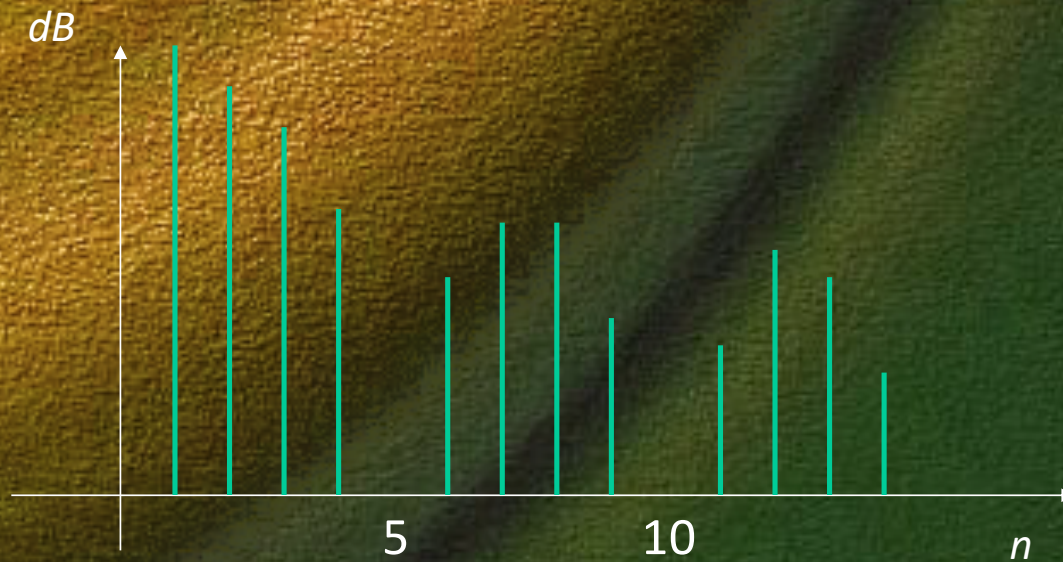
# Onda quadra



- Solo armoniche di numero dispari (ampiezza proporzionale a  $1/n$ )
- La seconda metà del periodo capovolge la prima metà: mancano le armoniche pari; se questa simmetria manca, si ha qualche componente pari.



# Onda a impulsi



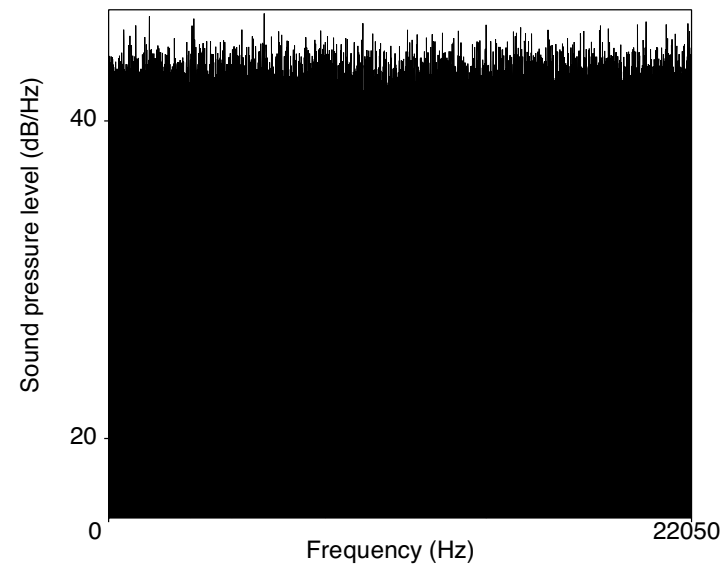
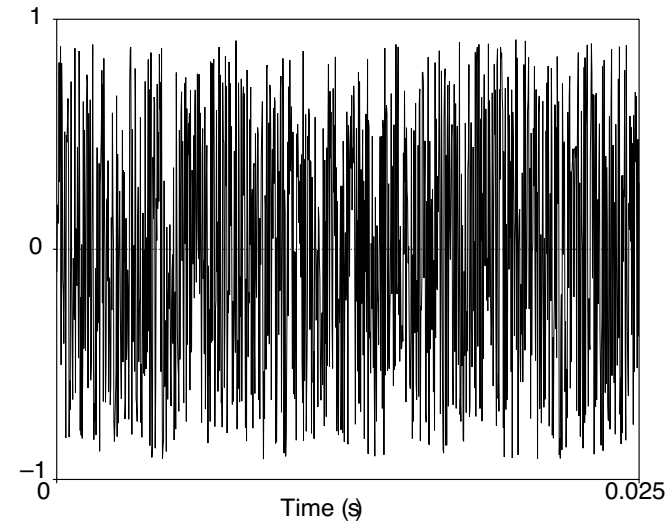
Tutte le armoniche tranne il reciproco del ciclo dell'impulso e i suoi multipli  
(es.  $T = 0,2$  s;  $n = 1 / 0,2 = 5$ )



# Rumore bianco (o casuale)

Stessa forza a tutte le  
frequenze

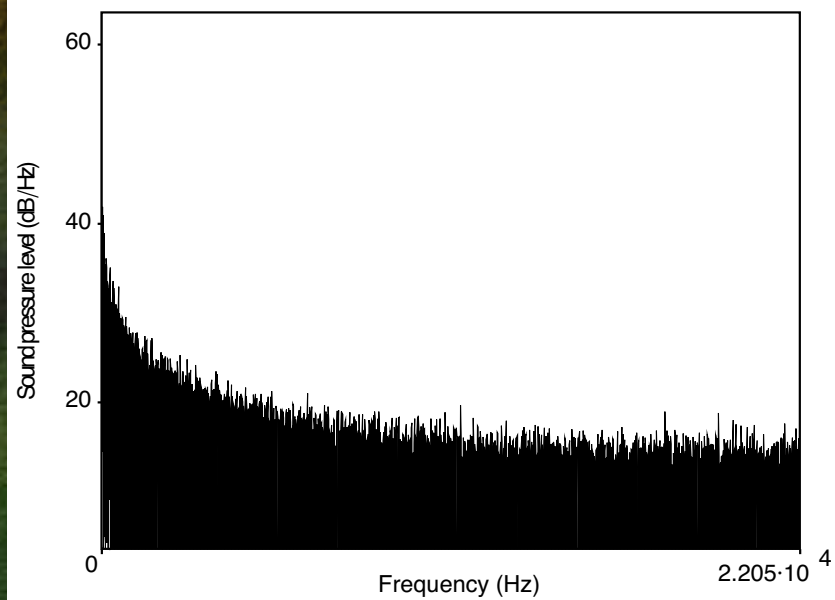
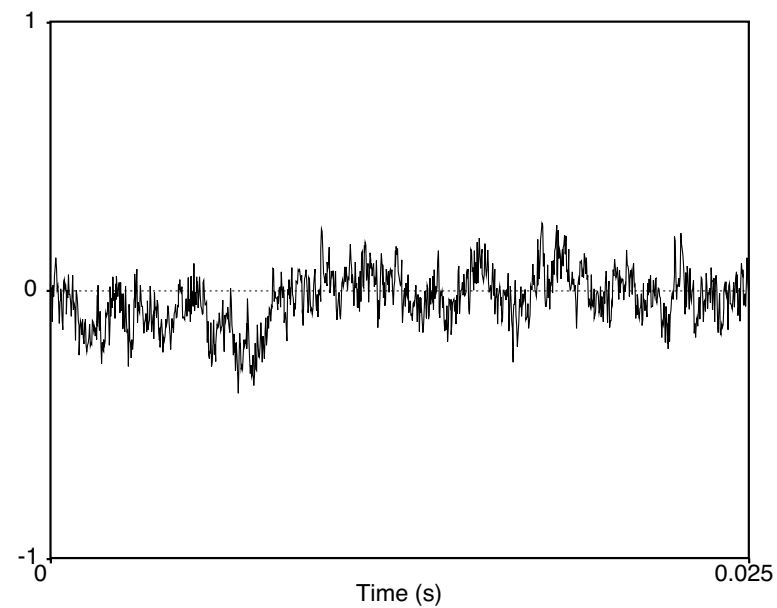
Non serie armonica;  
combinazione di  
sinusoidi a tutte le  
frequenze





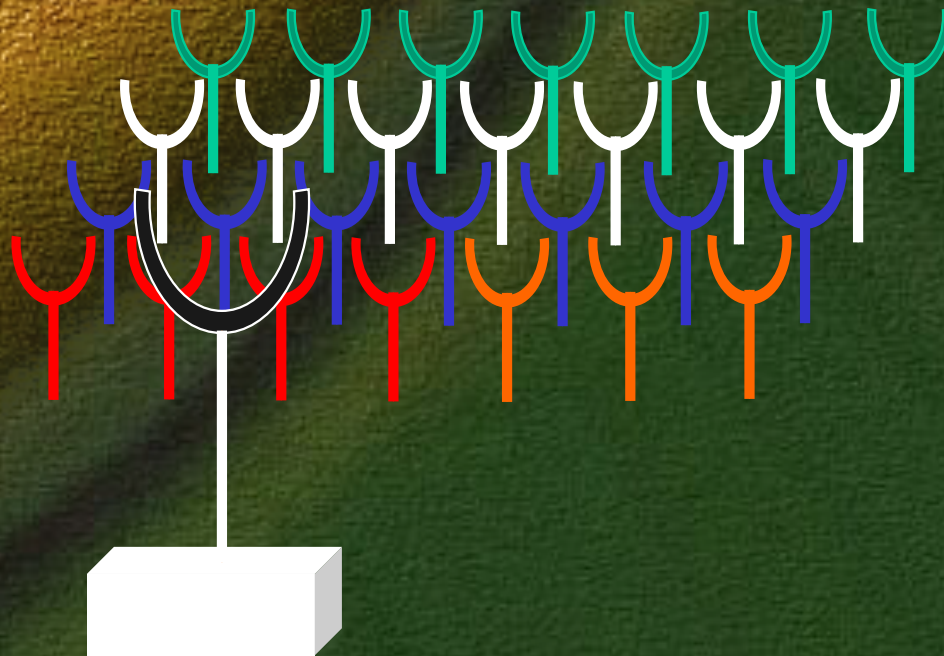
# Rumore rosa

Analogia con i colori dell'arcobaleno e la luce bianca



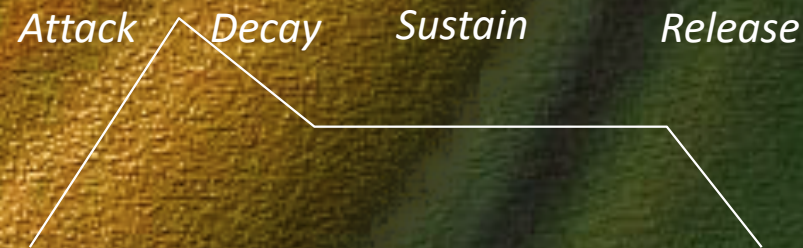


# Onde sinusoidali e suoni reali





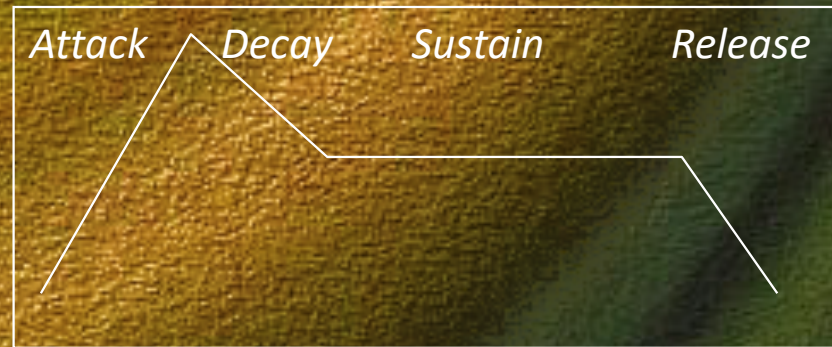
# I transitori



- Attacco (attack): ampiezza da zero a max
- Decadimento (decay): ampiezza diminuisce fino a un certo livello
- Costanza (sustain): ampiezza pressappoco costante
- Estinzione (release): ampiezza diminuisce fino a zero



# Vari transitori



Flauto



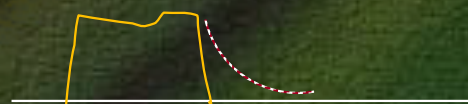
Tromba



Pianoforte



Violino



Organo



Blocchi di legno



Contrabbasso



# Esempio: chitarra

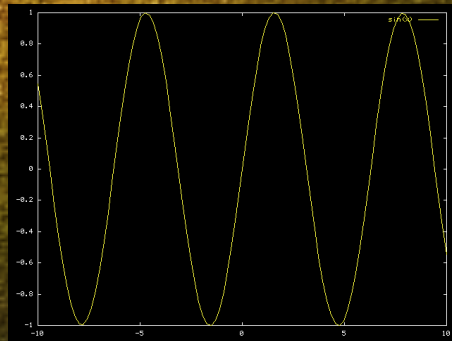




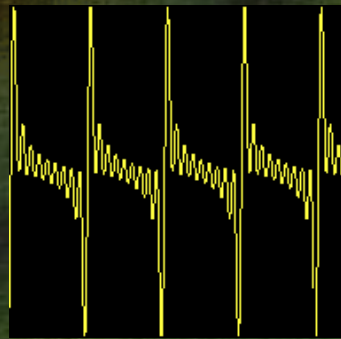
# Somme di sinusoidi



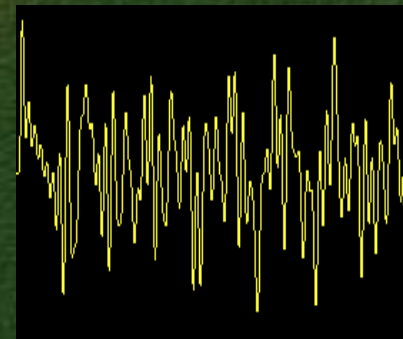
Bell1



Bell2



Bell3



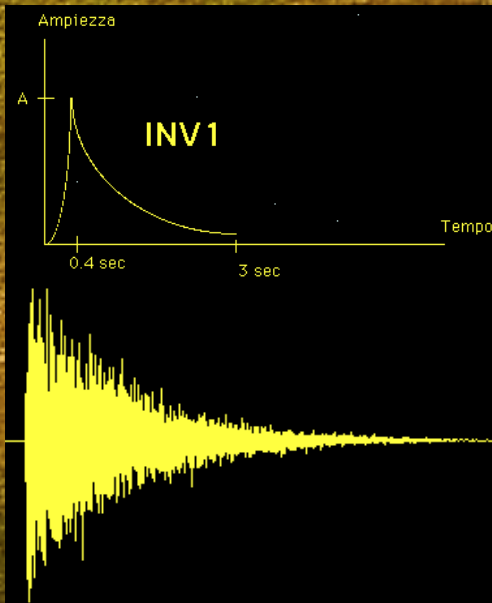
Bells by Paolo Torrente



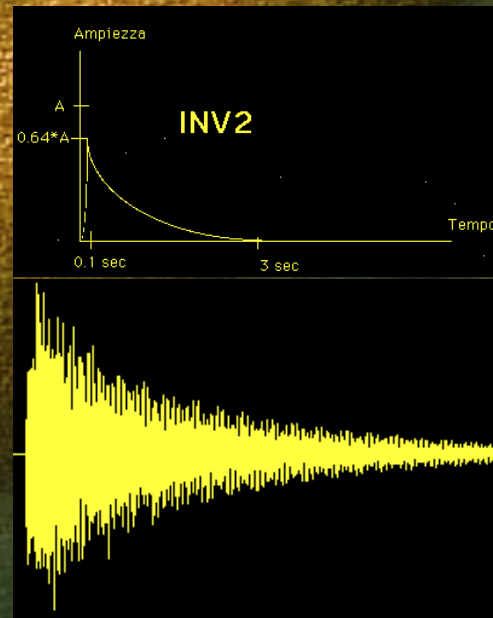
# Inviluppi



Bell3



Bell4



Bell5



+ battimenti

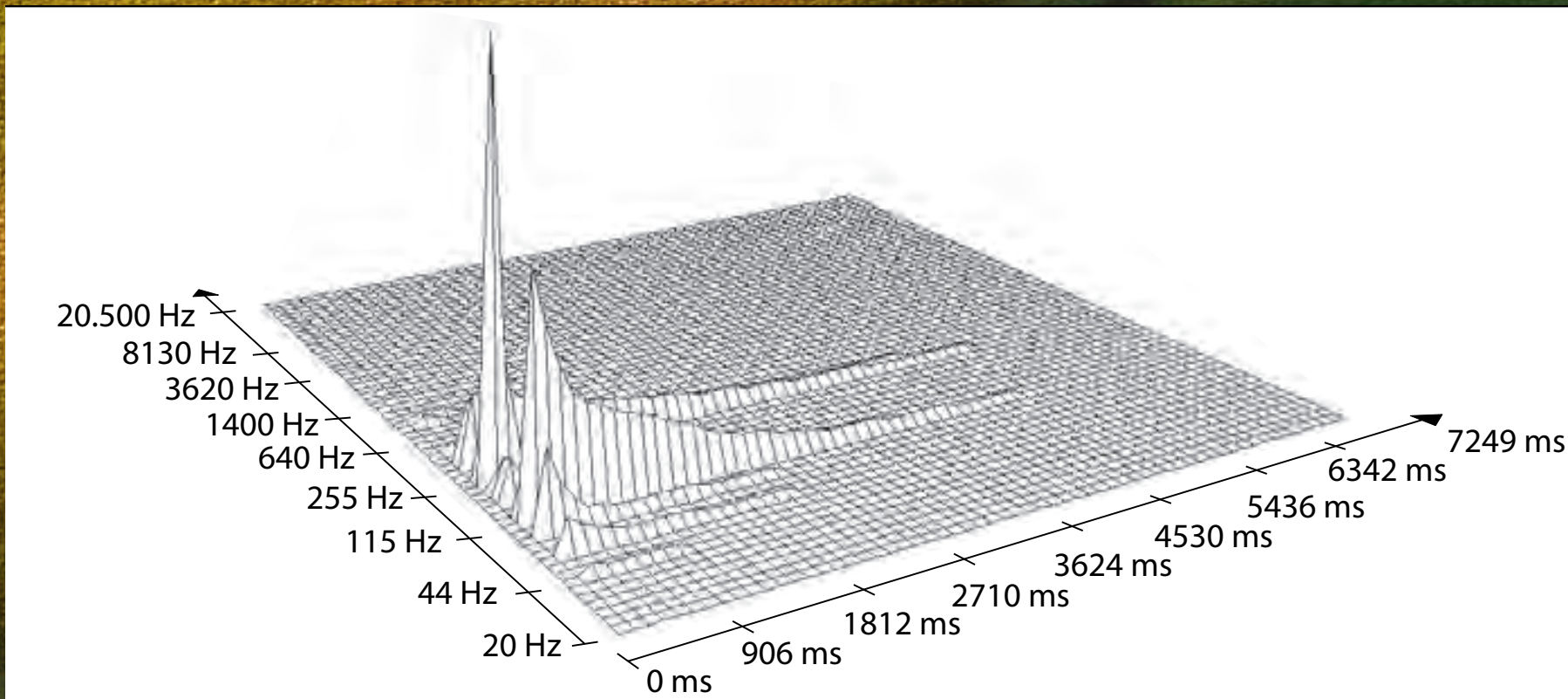


Bell6

Bells by Paolo Torrente



# Rappresentazione 3D



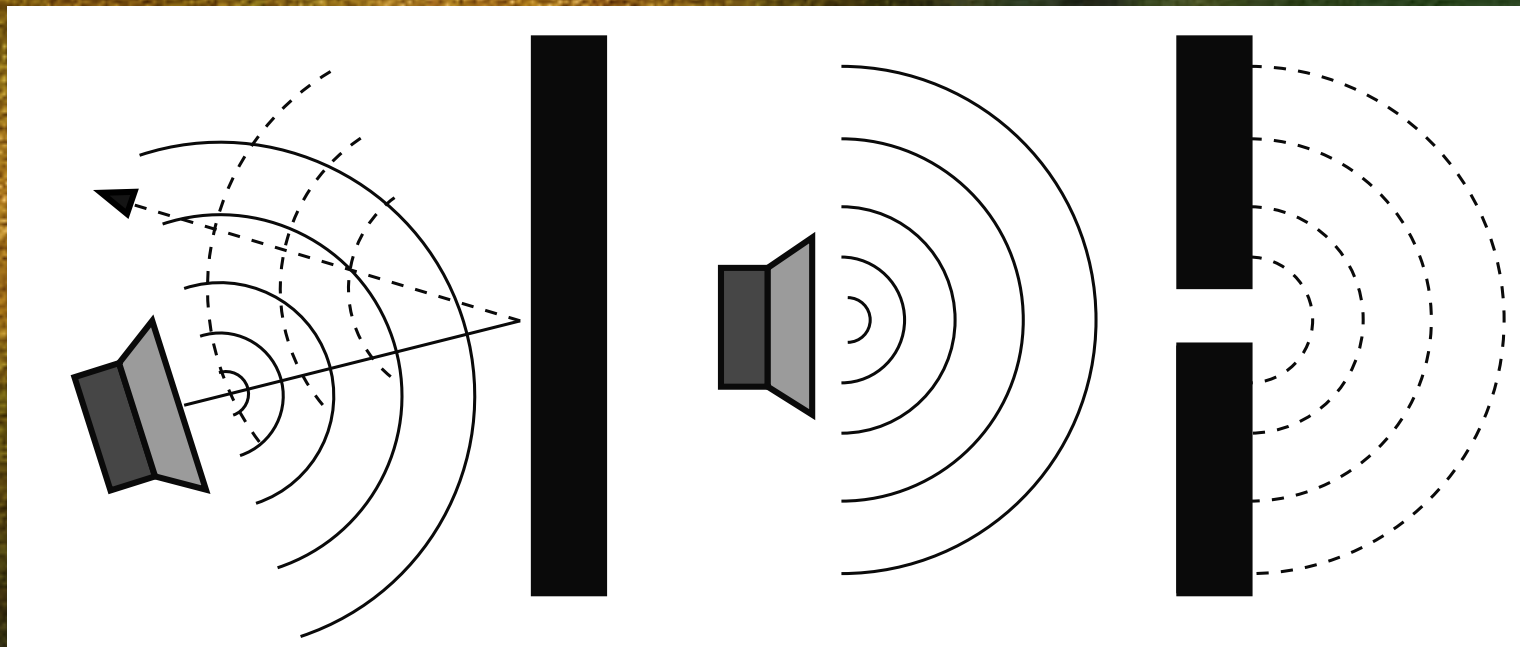




# Propagazione del suono

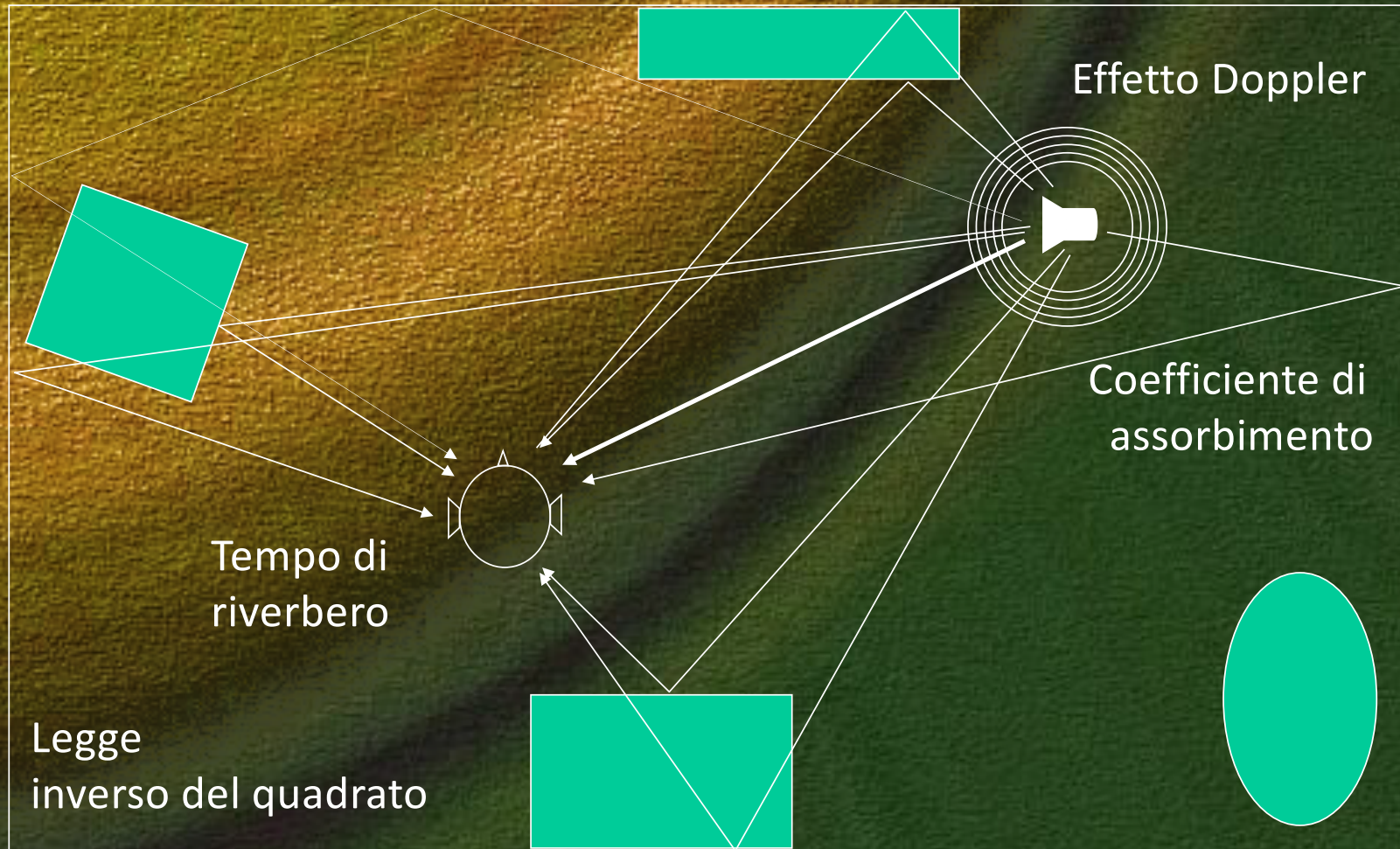


# Riflessione e diffrazione





# Ambiente di propagazione





# Riassumendo

- Parametri fisici del suono
  - Frequenza di vibrazione - Altezza del suono
  - Ampiezza della vibrazione - Intensità del suono
- Forma d'onda
  - Spettro di Fourier nel dominio della frequenza - Timbro
  - Inviluppo nel dominio del tempo
- Propagazione del suono





Grazie dell'attenzione