

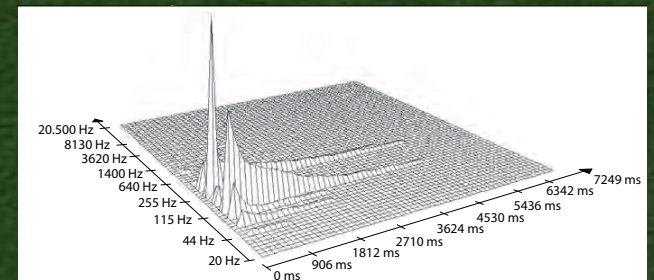
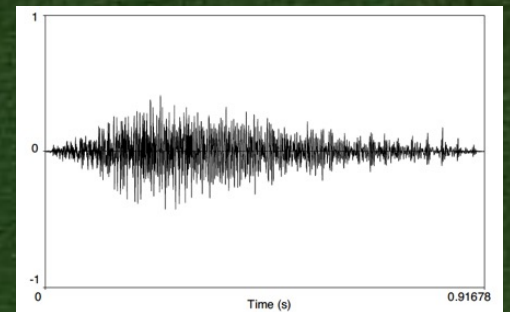
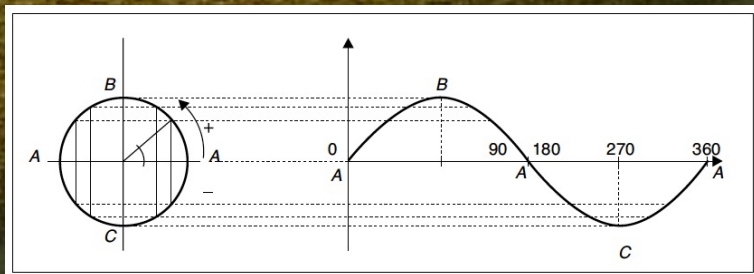
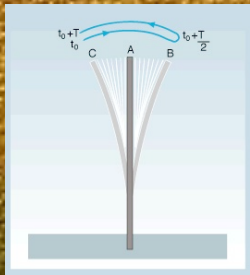


Tecnologie digitali per il suono e l'immagine 2021/22

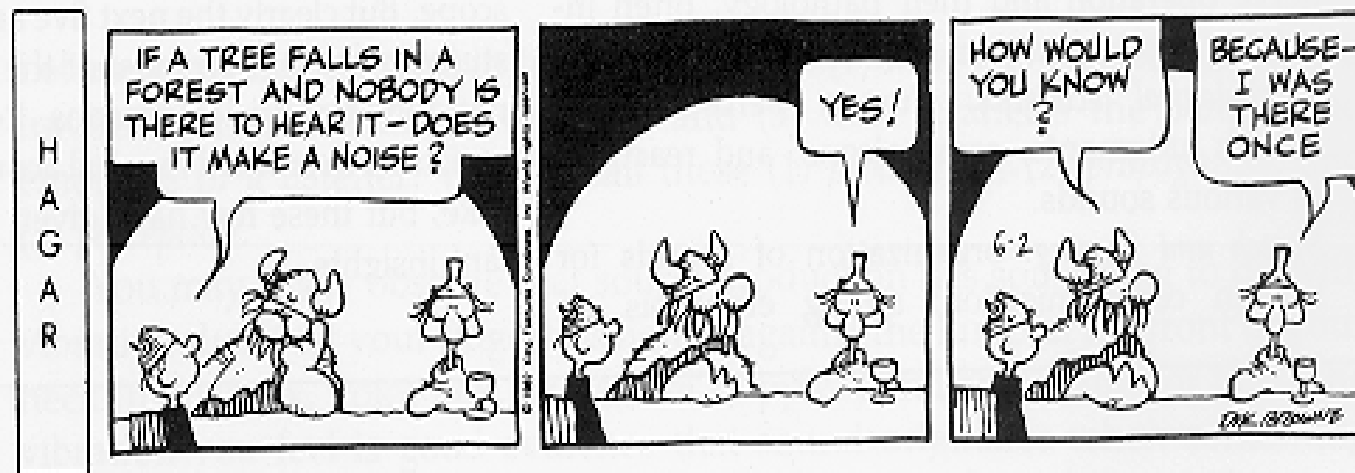
Vincenzo Lombardo
Corso di Laurea in DAMS
Università di Torino

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

Cenni di acustica

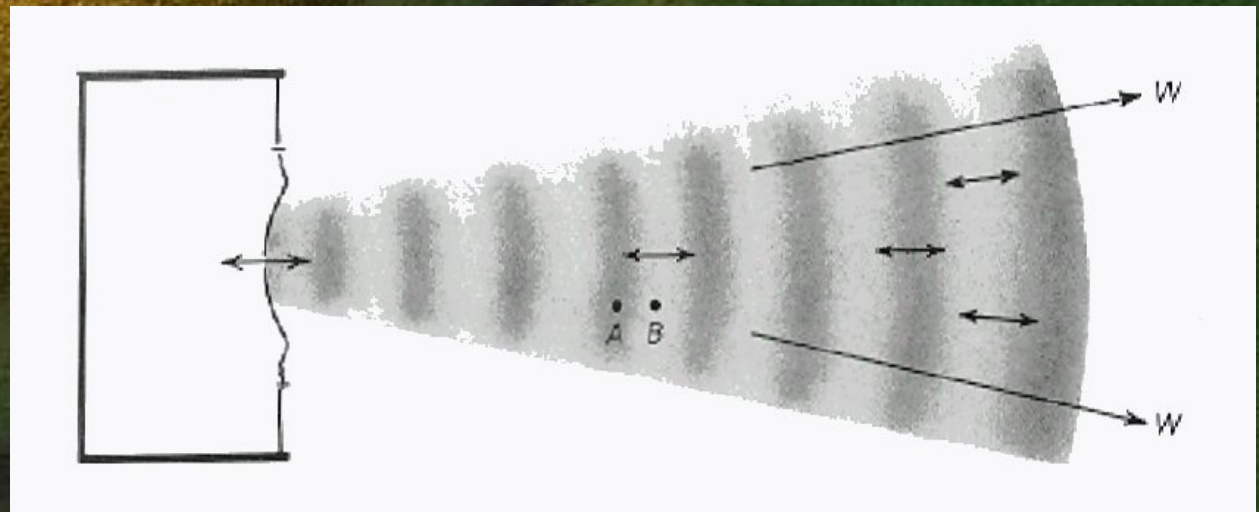
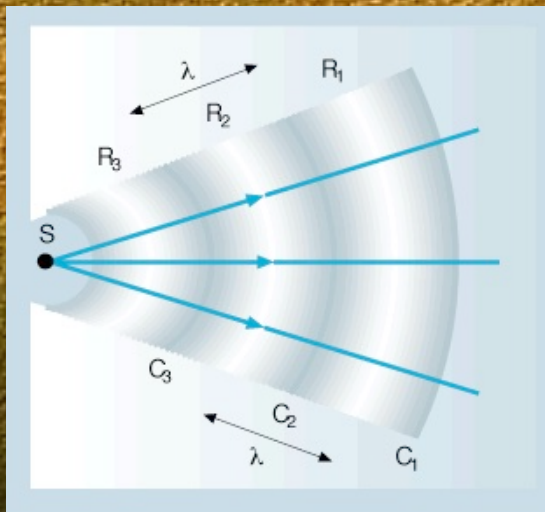


La natura del suono



La natura fisica del suono

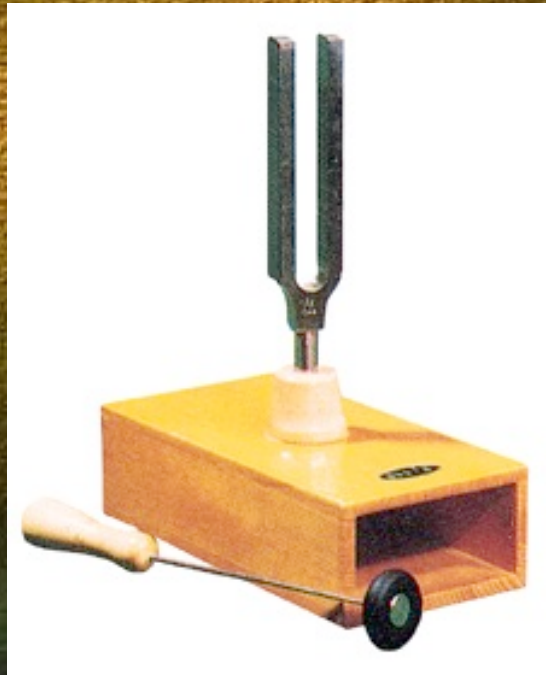
onde che trasportano energia lontano dalla sorgente (oggetto che vibra)



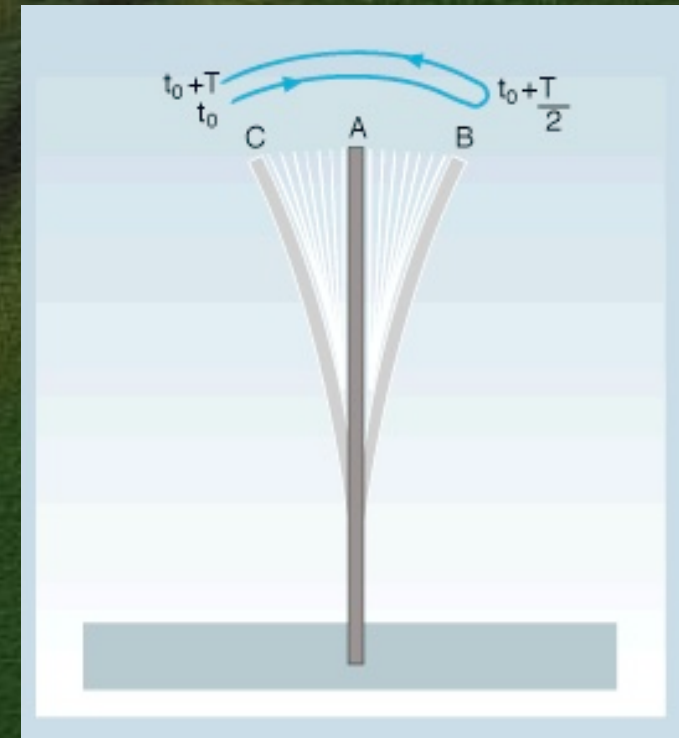
[da CD Vicino alla Musica – Federico Tibone]

Vibrazione

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



[da CD Vicino alla Musica –
Federico Tibone]



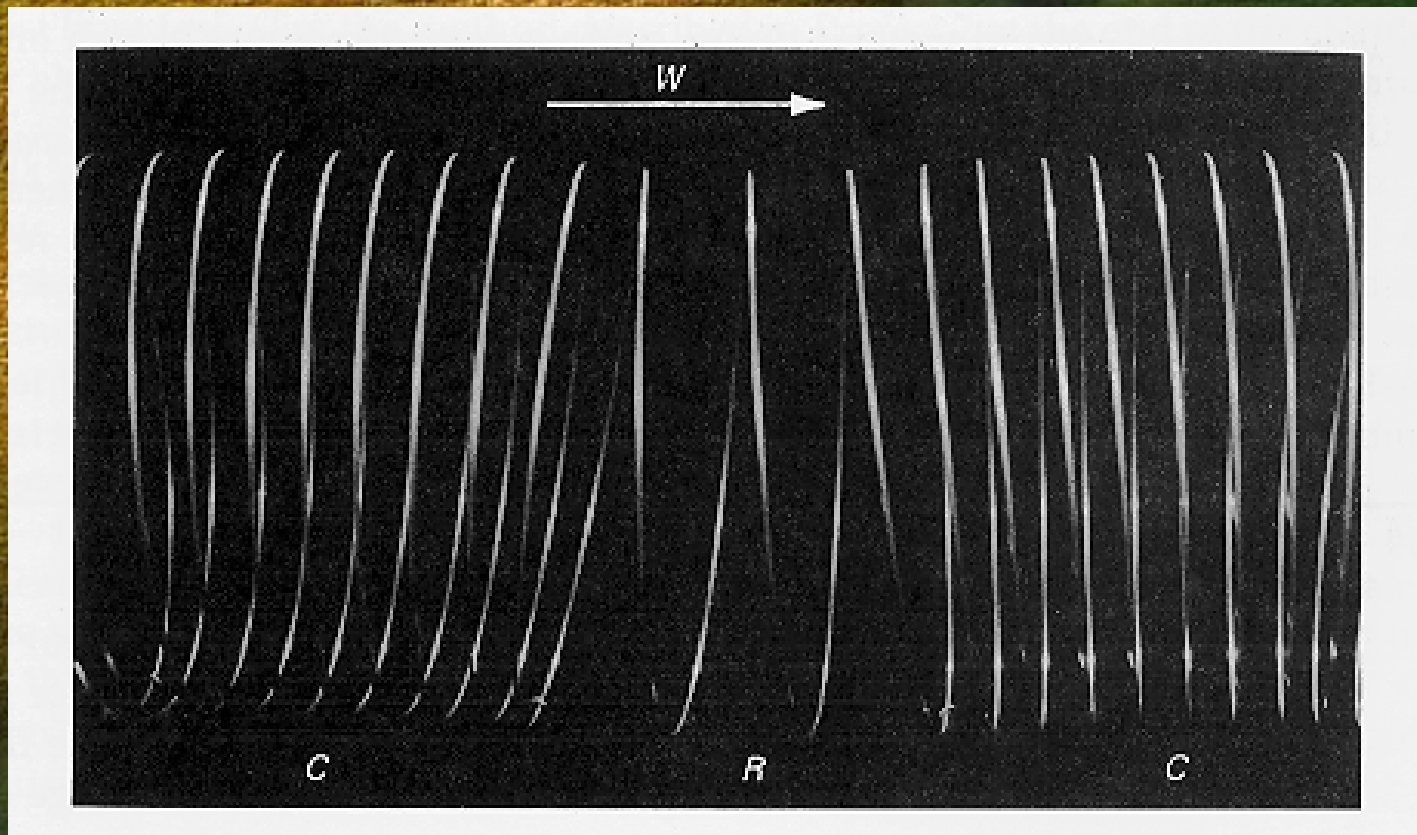
Onda

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

[da CD Vicino alla Musica –
Federico Tibone]



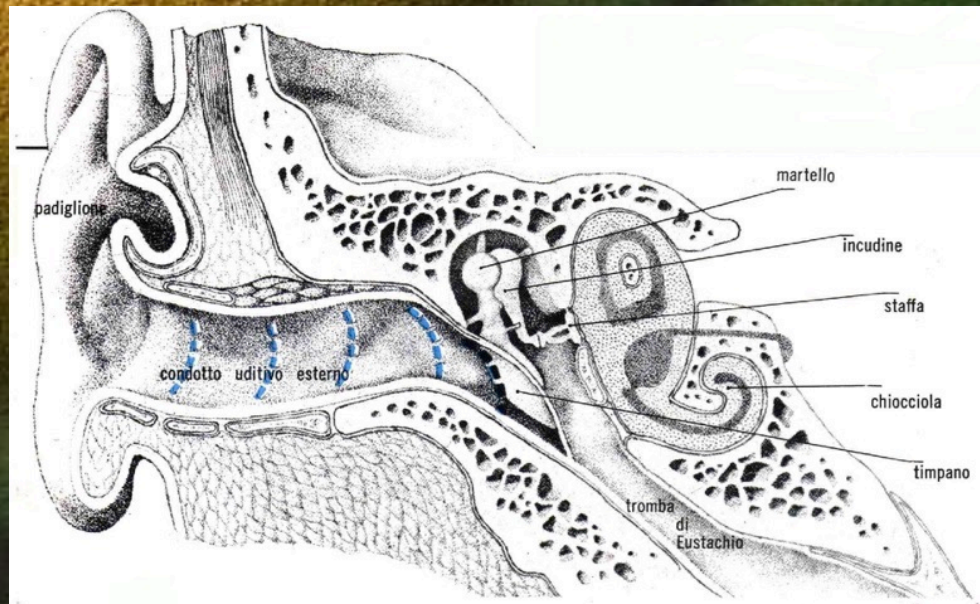
Onda longitudinale (vs. trasversale)



[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)

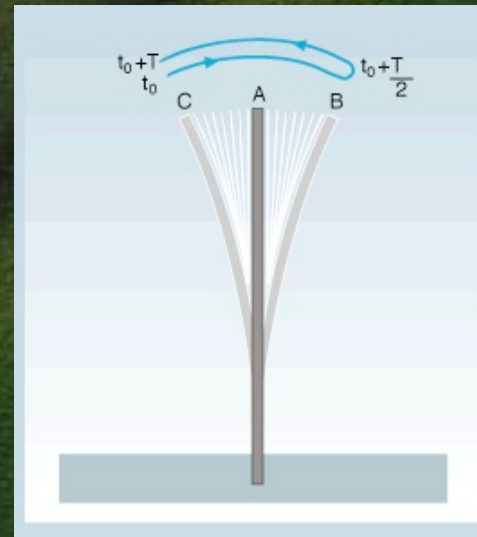
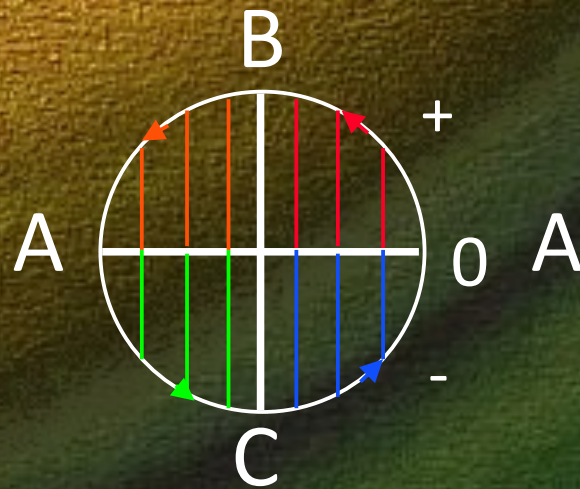


Come ci arrivano i suoni

- 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

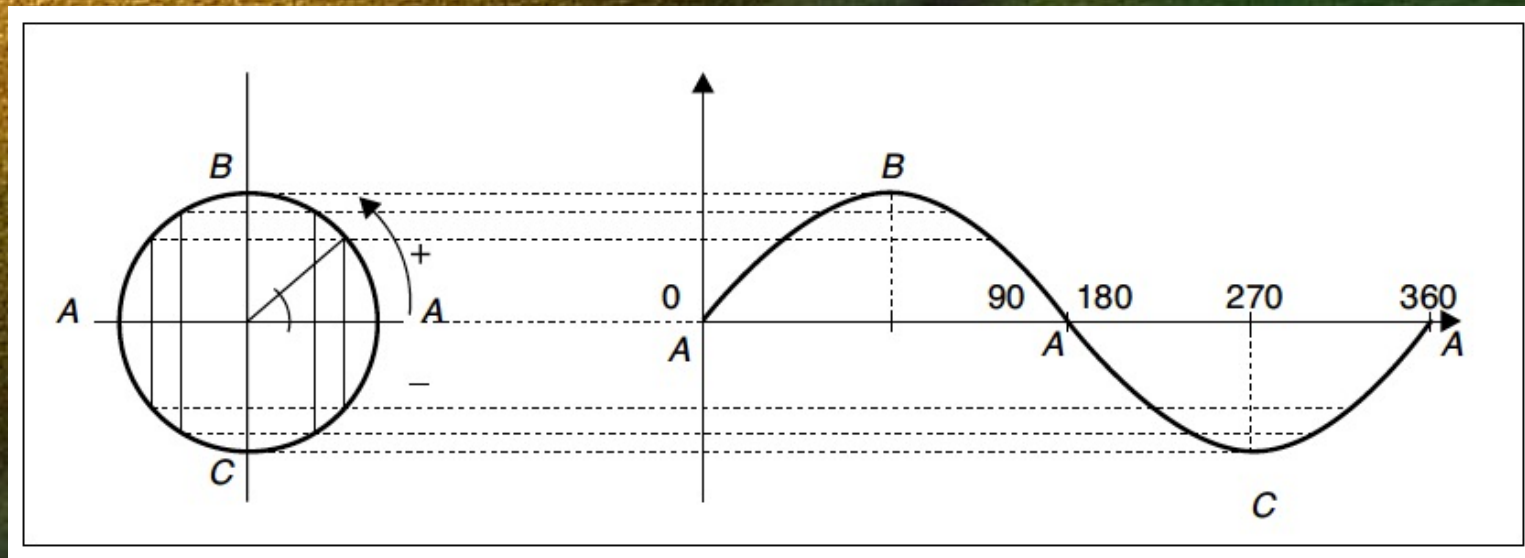
- tutte le sorgenti sonore (musicali) oscillano
- ogni vibrazione è detta ciclo
- ogni segnale sonoro comprende molti cicli



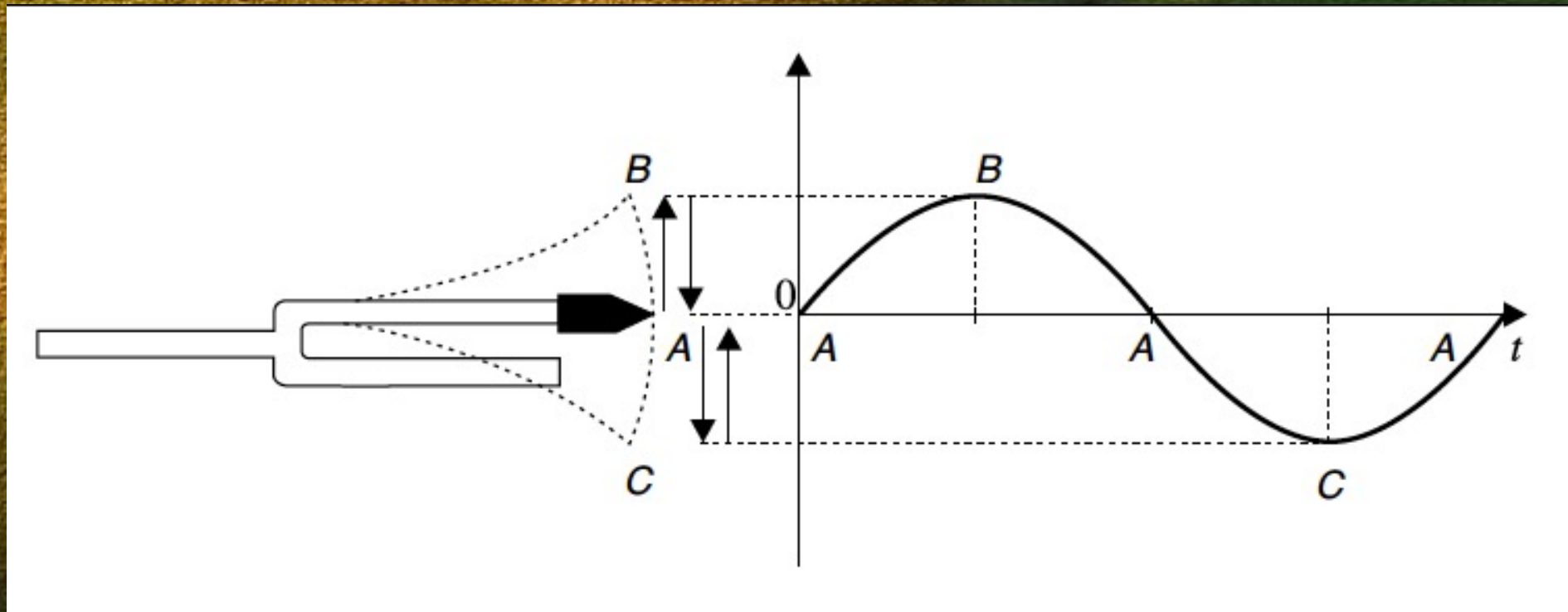
Il moto armonico semplice

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

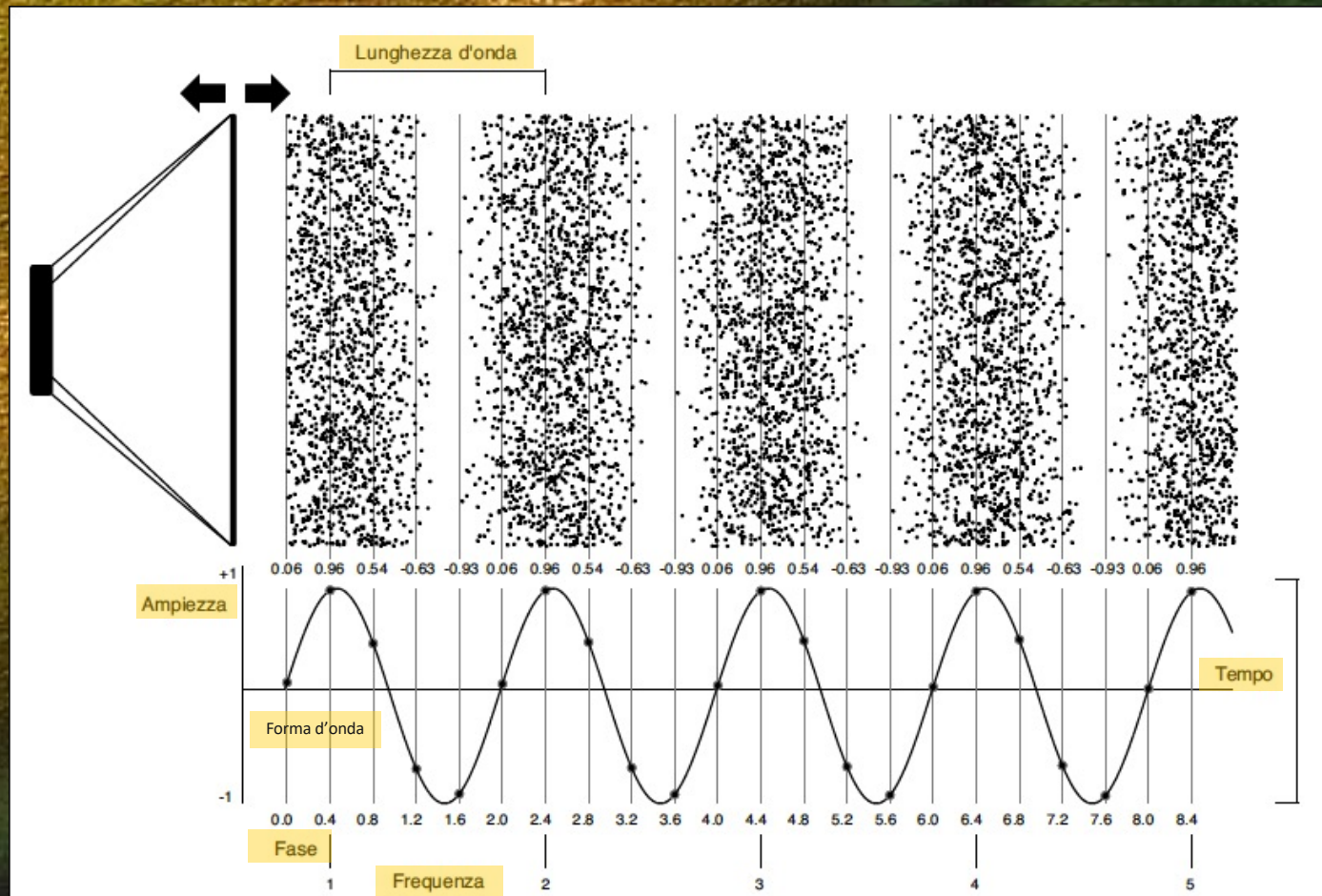
Scienza delle onde sonore è costruita sulle onde sinusoidali

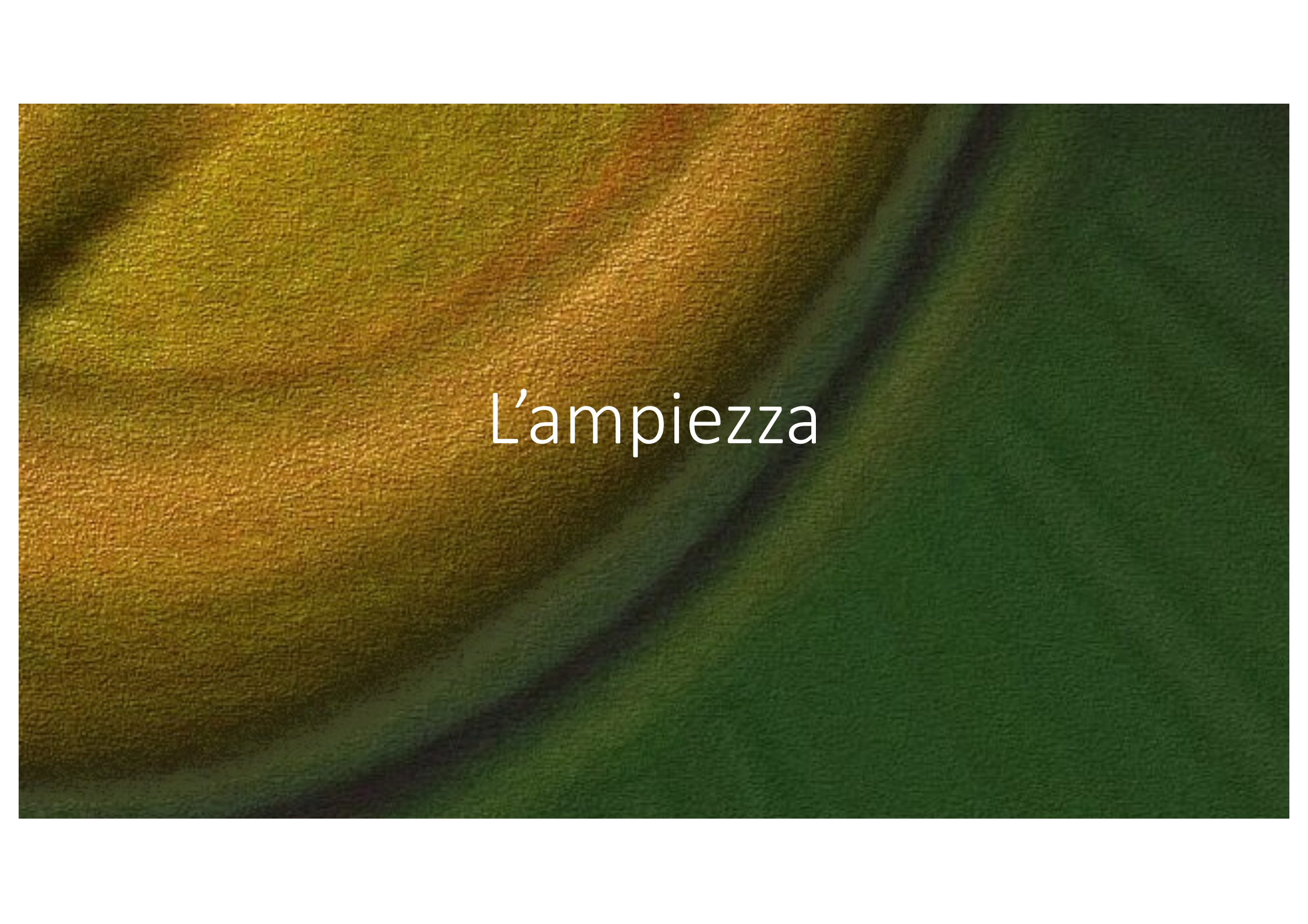


Vibrazione del diapason



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

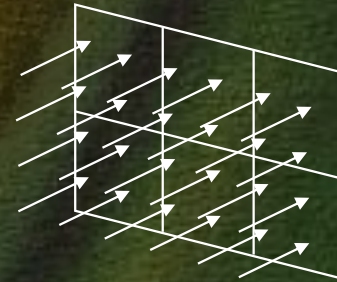
- pressione sonora dell'aria dovuta alla compressione e rarefazione delle particelle
- Sound Pressure Level – SPL
- intensità sonora, cioè energia trasportata dall'onda sonora
- Sound Intensity Level – SIL

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

Una forza
di 24 N
esercitata
su un'area
di 6 m².

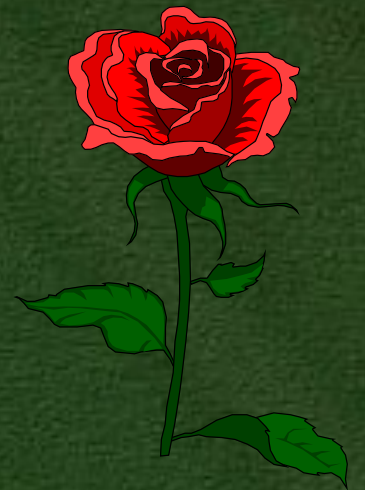


- forza
 - unità di misura: newton (1/2 Kg ~ 5 N: un flauto)
 - direzione della forza
- pressione: forza applicata a una superficie
 - $p = F/S$ (forza per unità di superficie - N/m²)
 - unità di misura comune: atmosfera (10⁵ N/m² - pressione esercitata dall'aria su ogni superficie)

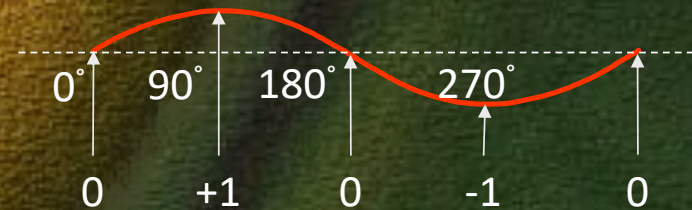


Esempio: peso donna con tacco sottile

- 50 Kg (500 N) distribuiti su un'area di 2 cm² (0,0002 m²)
- può ammaccare un pavimento più di una zampa di elefante (10.000 N su 0,1 m²)
- 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 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

- ρ 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} 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

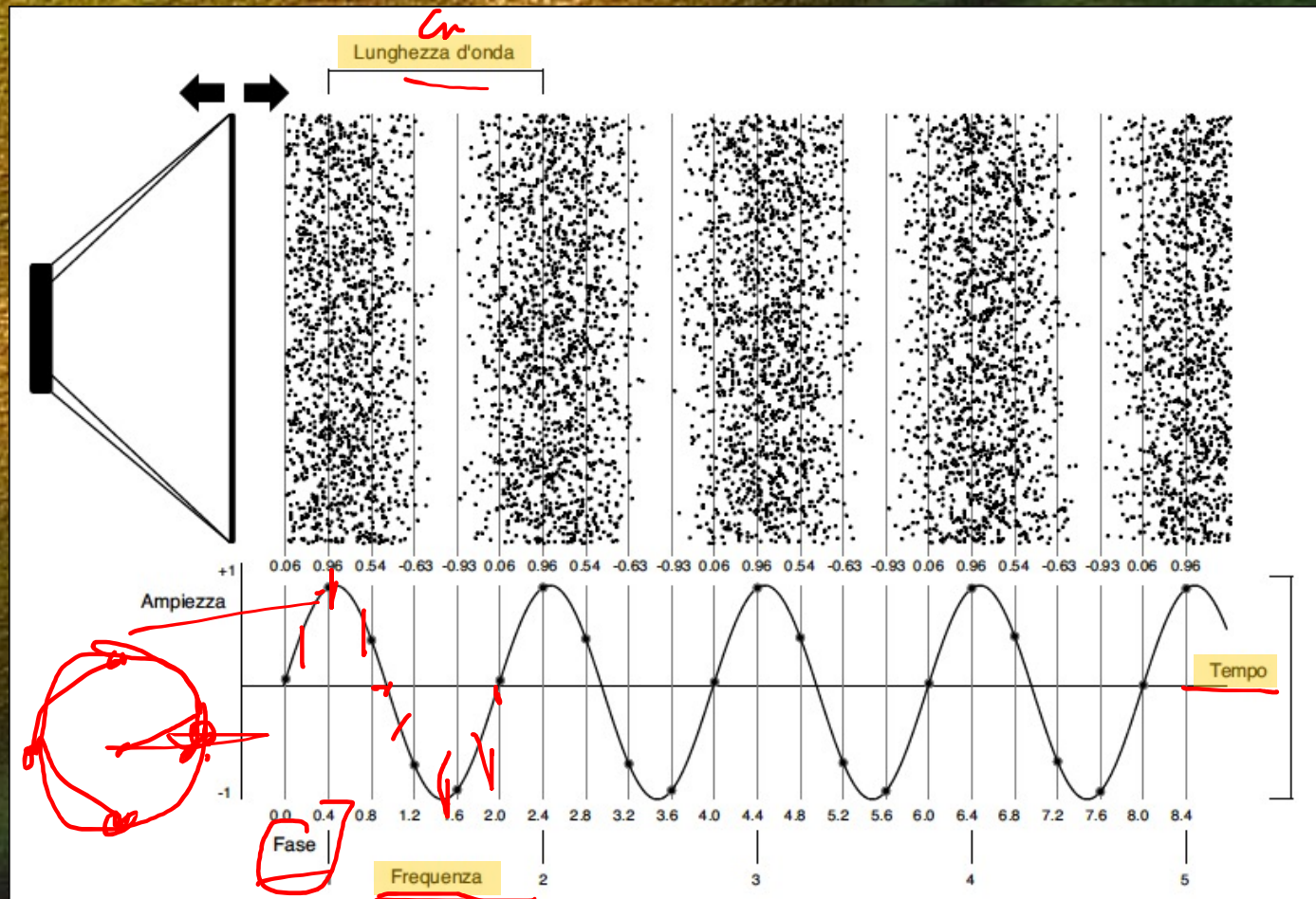
- Suono di 90 dB = intensità 10^9 volte più forte di I_0 (10^{-12}) = 10^{-3} W/m²
- Intensità della luce solare
 - intensità tipica = 10^{+3} W/m²
 - 1 milione di volte in più (10^{+3} VS 10^{-3})
 - 90 dB è una piccolissima energia (è un suono forte!)
- Le nostre orecchie sono potentissimi rilevatori!!!

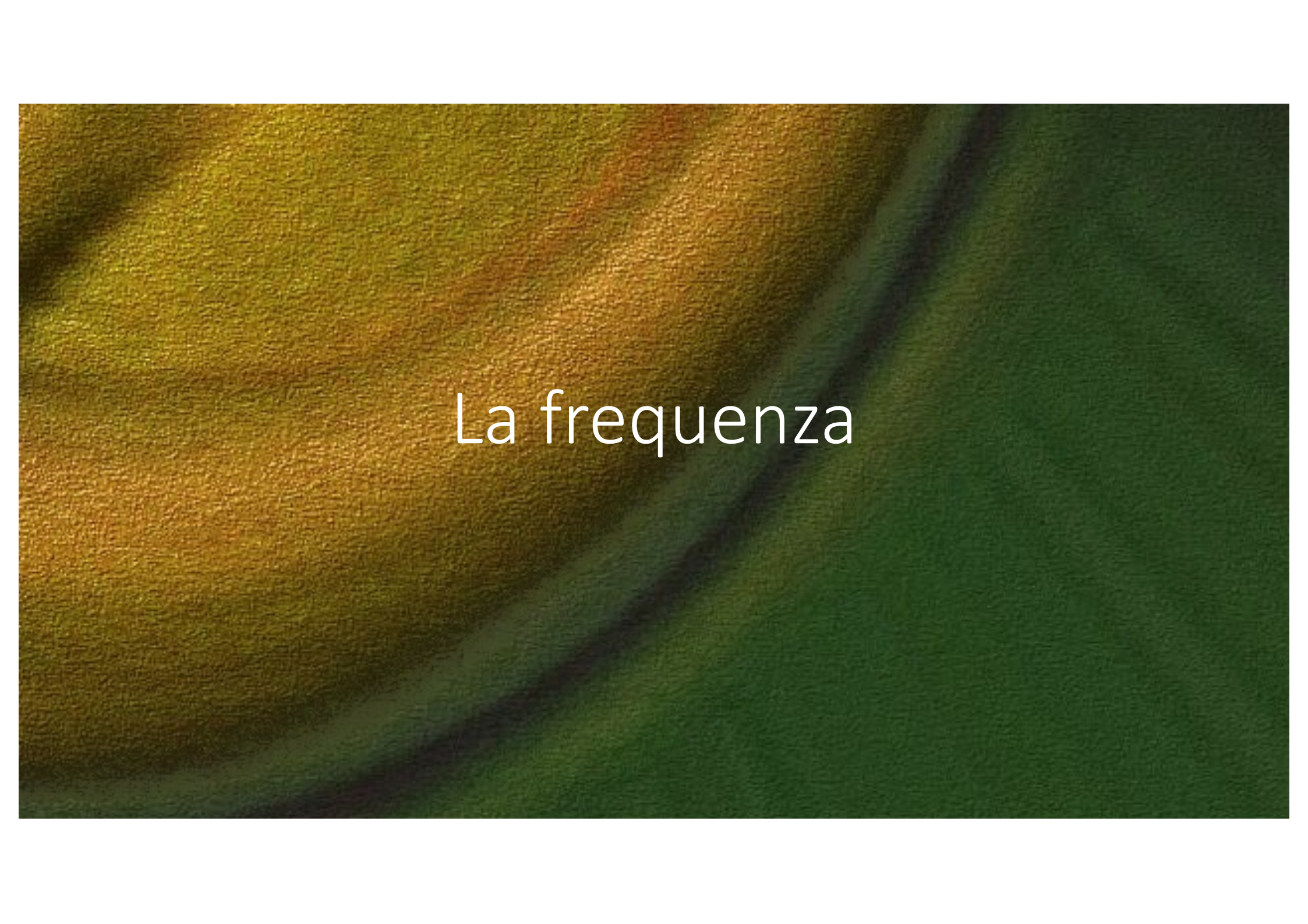
Intensità caratteristiche

Suono	SPL (dB)	Reazione
Massimo rumore prodotto in laboratorio	210	Suono insopportabile
Lancio di un missile (a 50 m)	200	
Rottura del timpano	160	
Jet al decollo (a 50 m)	130	
Suono al limite del dolore	120	Dolore fisico
Complesso rock in locale chiuso	110	
Schianto di fulmine	110	
Urlo (a 1,5 m)	100	
Martello pneumatico (a 3 m)	90	Suoni utili
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	Non udibile
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

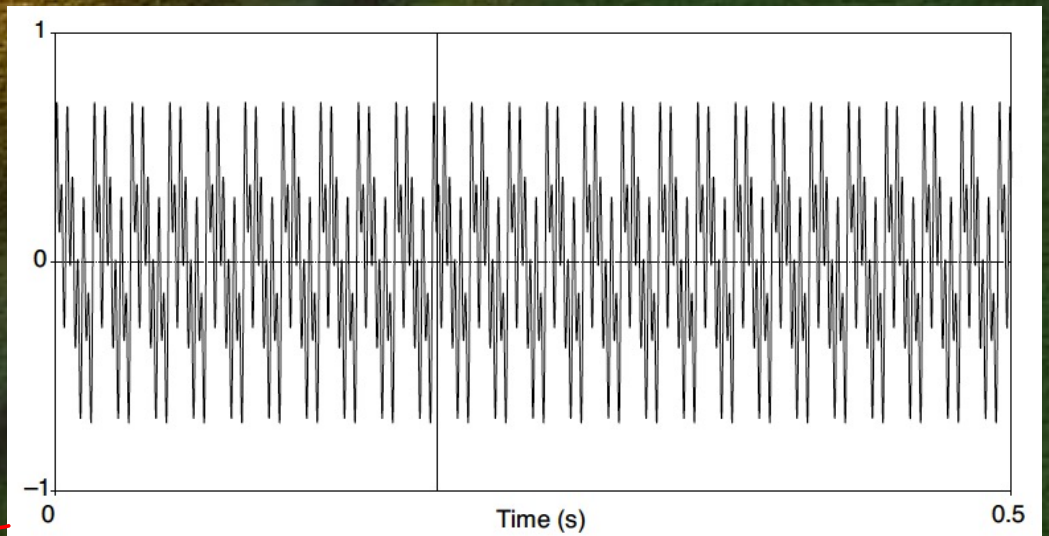
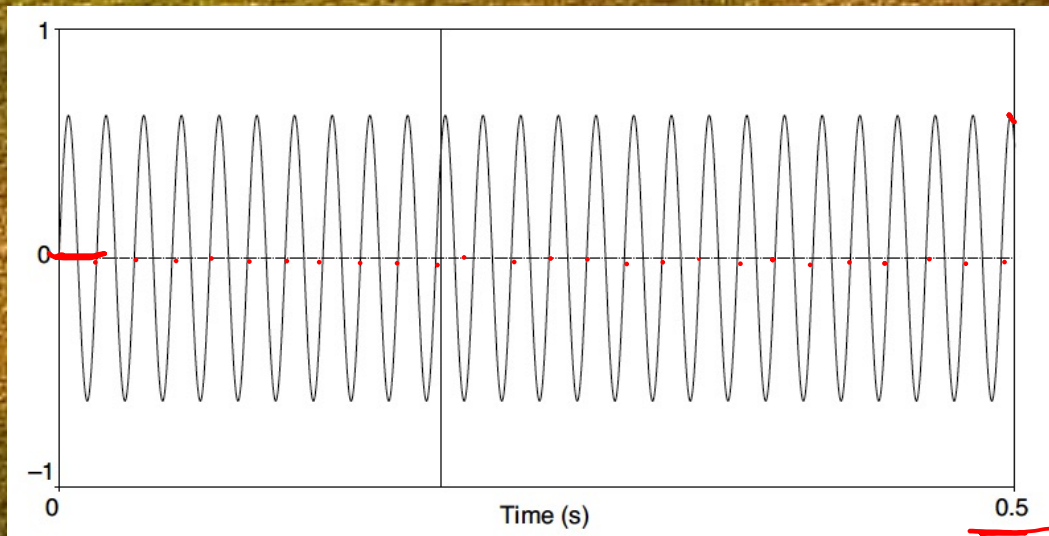




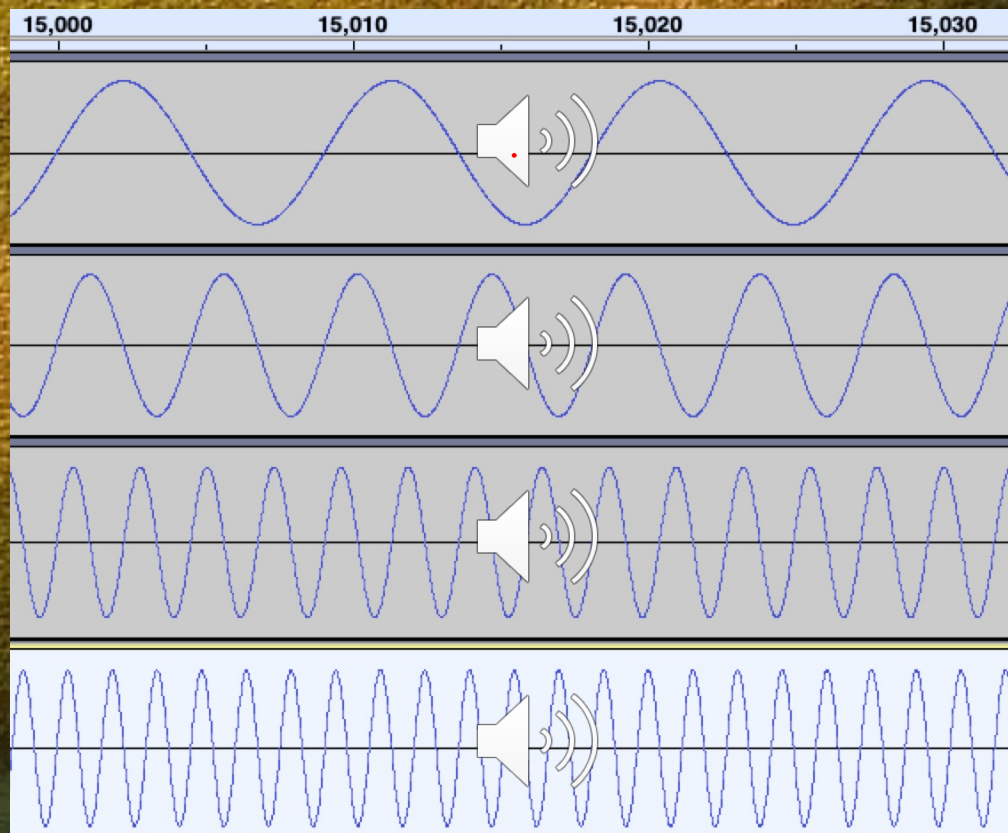
La frequenza

Suoni di 50,72 Hz

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



La frequenza: i suoni puri



Onda sinusoidale a 110 Hz

Onda sinusoidale a 220 Hz

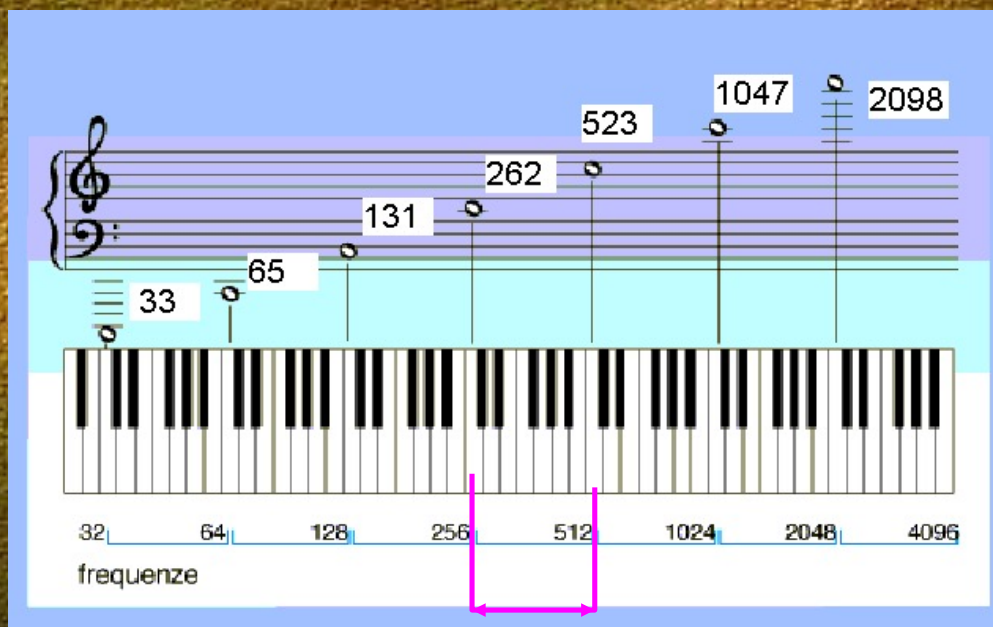
Onda sinusoidale a 440 Hz

Onda sinusoidale a 660 Hz

Frequenze caratteristiche

<i>Suono</i>	<i>Frequenza (Hz)</i>
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

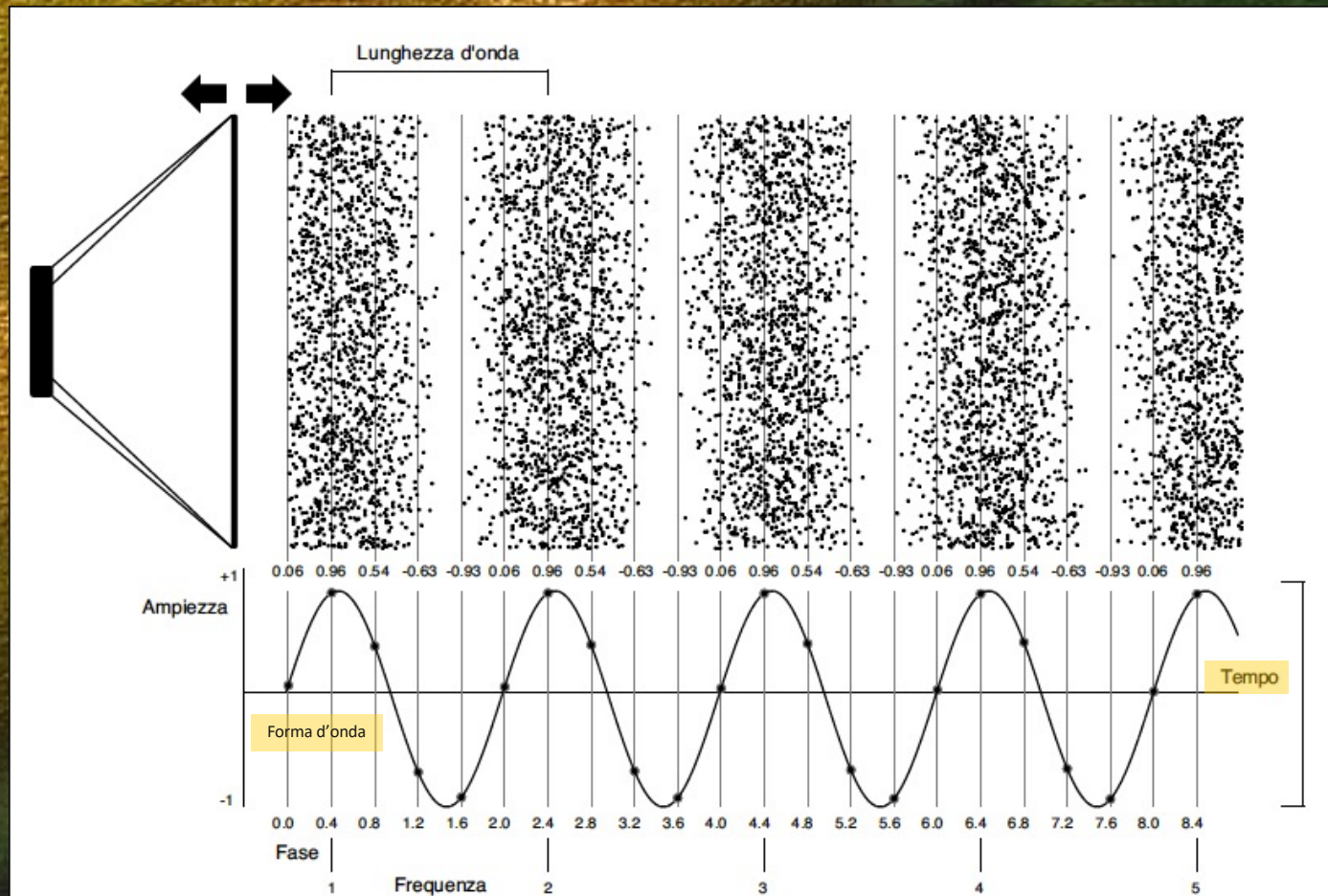


frequenze delle note

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





Forma dell'onda

I suoni in natura

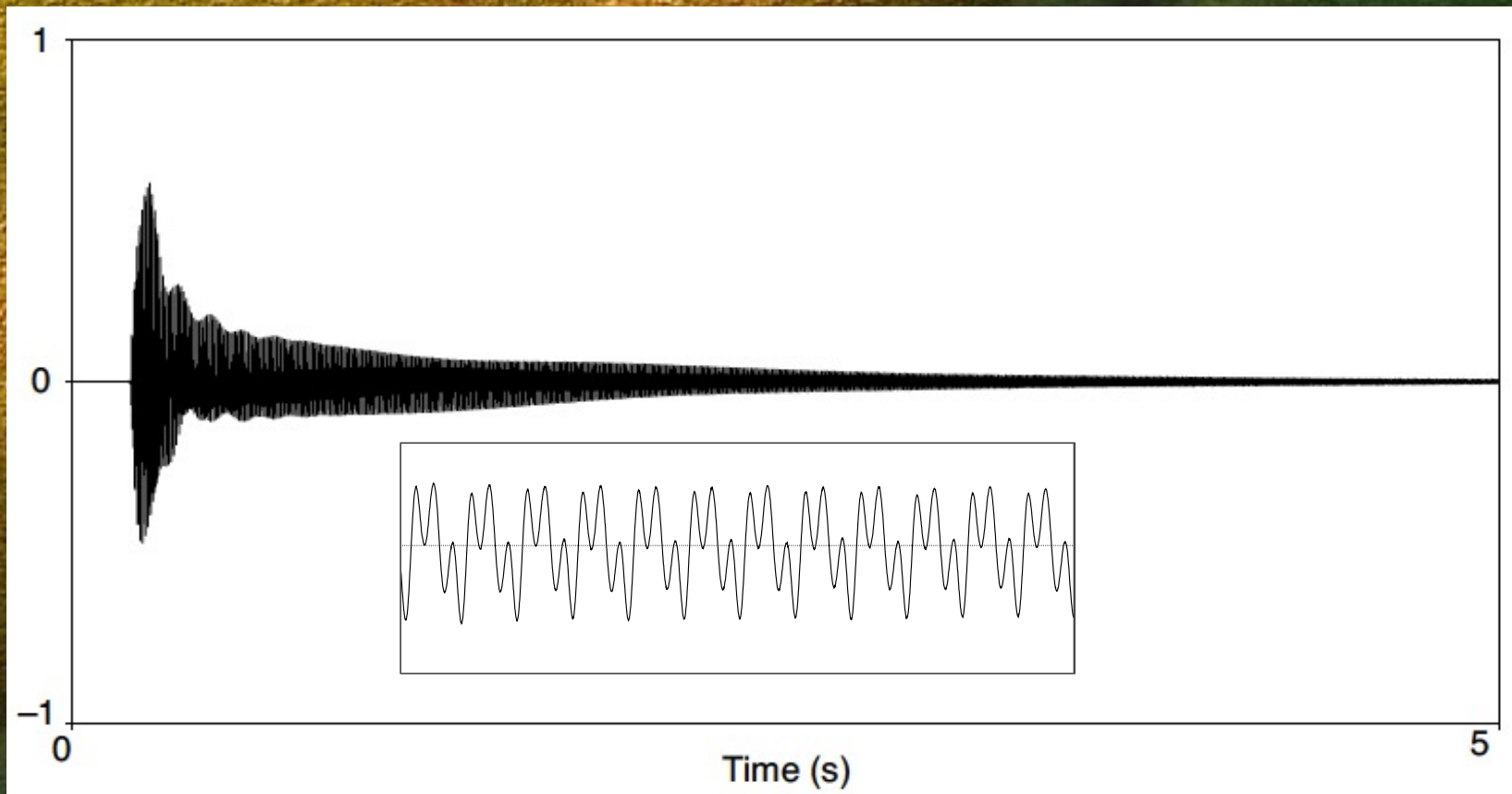
Ruggito di un leone



freesound.org

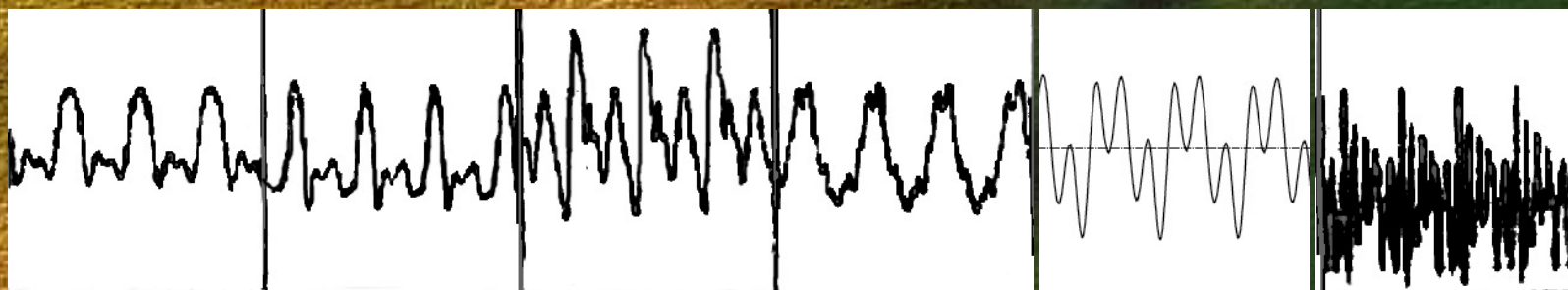
I suoni in natura

La₂ chitarra



I suoni in natura

[immagine adattata da Pierce]



flauto

tromba

sax soprano

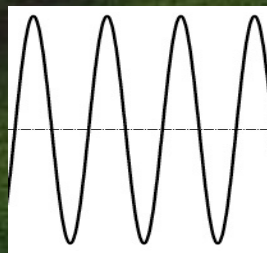
violino

chitarra

tuba

La_4 (440 Hz)
8ms

La_2 (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

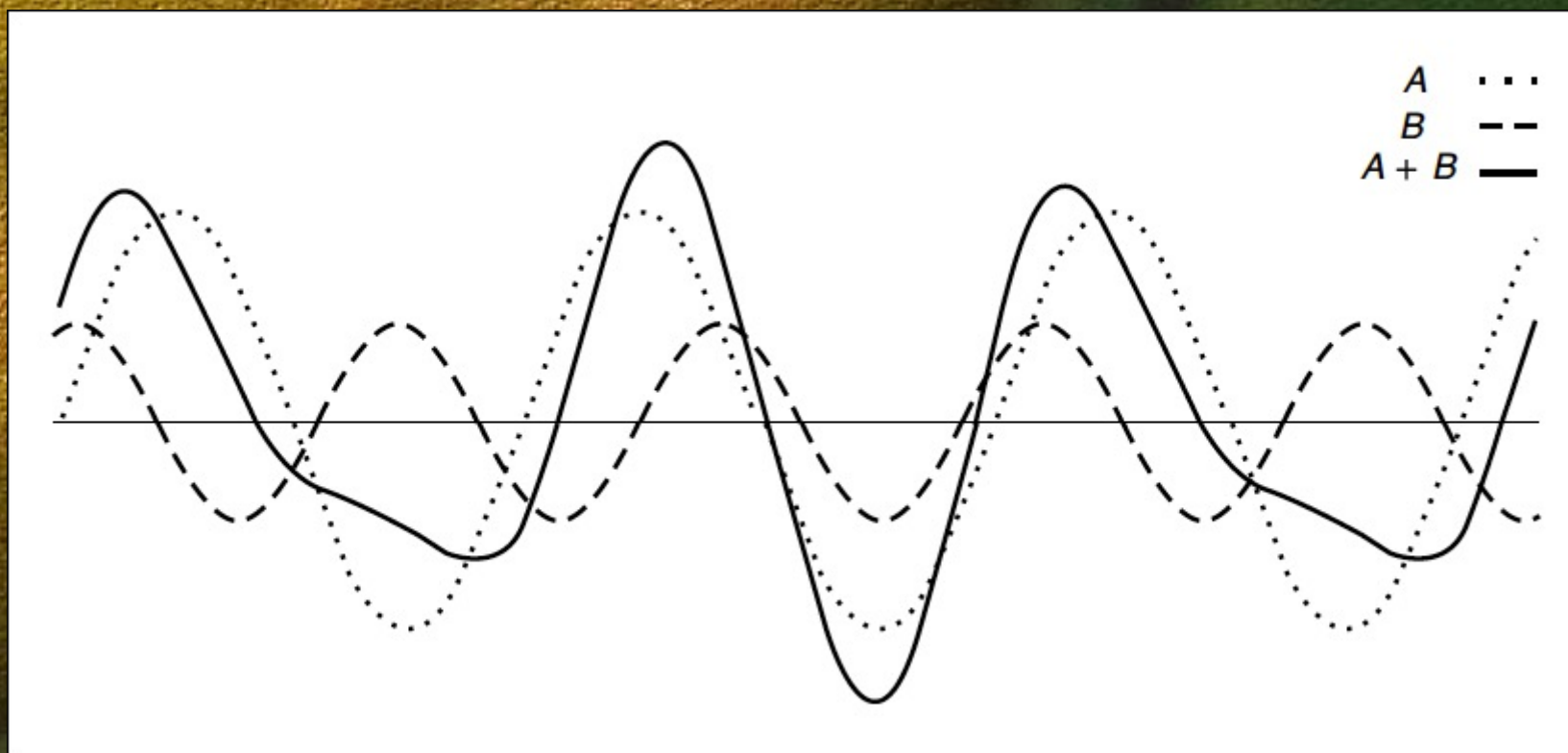
- Due elementi contribuiscono a forme d'onda complesse (e quindi al timbro)
- nel **dominio della frequenza**, le componenti spettrali
- nel **dominio del tempo**, i transitori

Analisi dei suoni complessi: lo spettro di Fourier

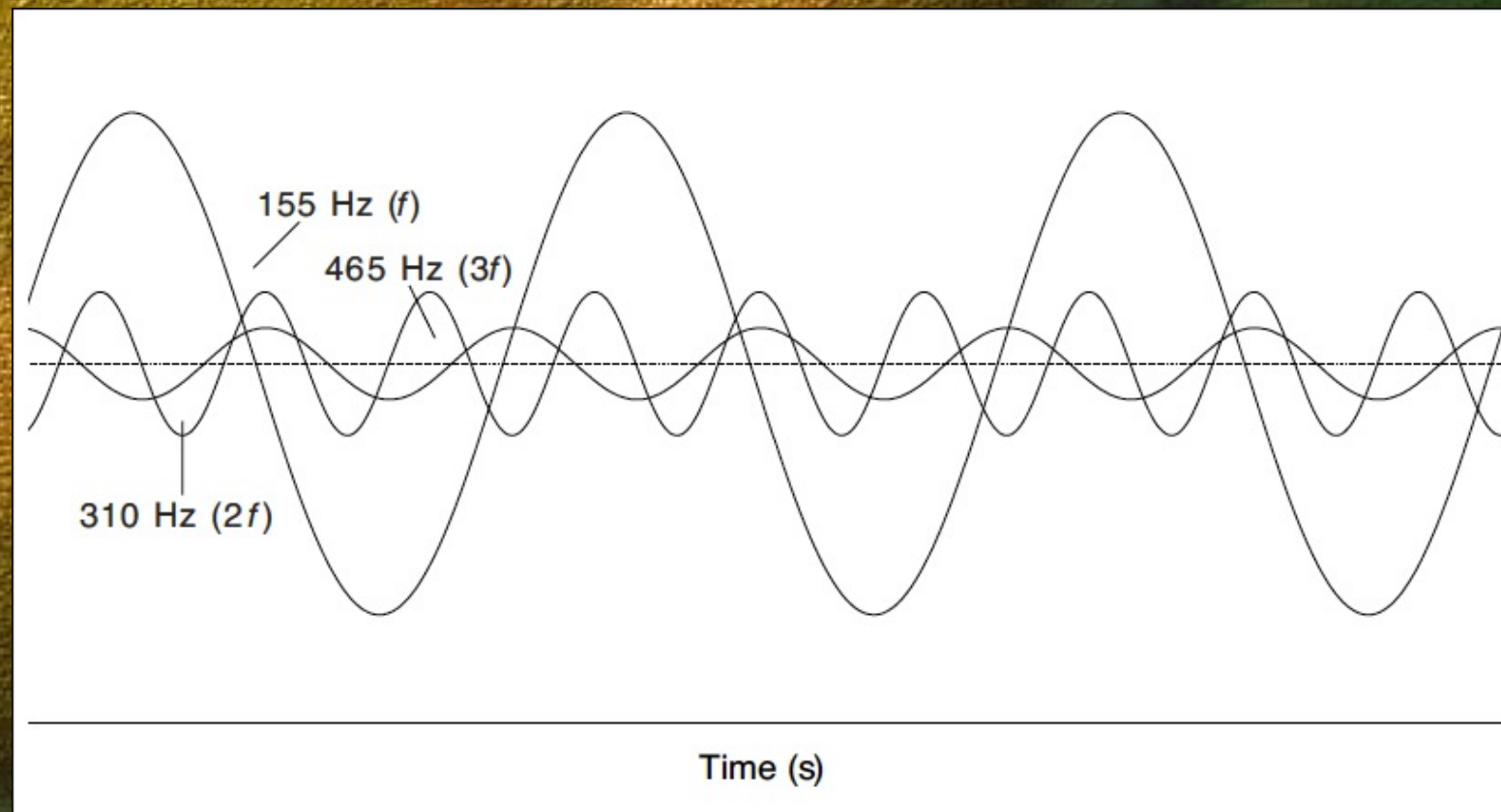


[Fonte: Wikipedia]

Sovrapposizione di toni puri

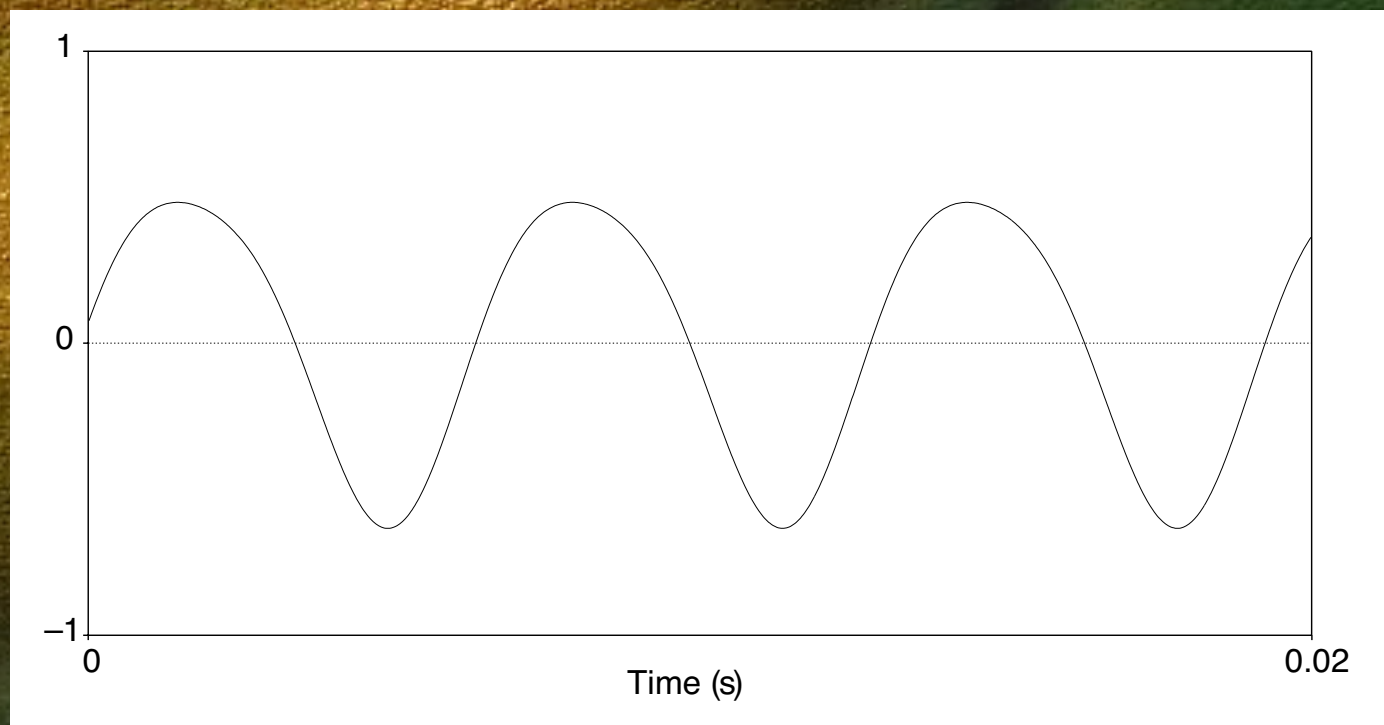


Tre toni puri (individuali)

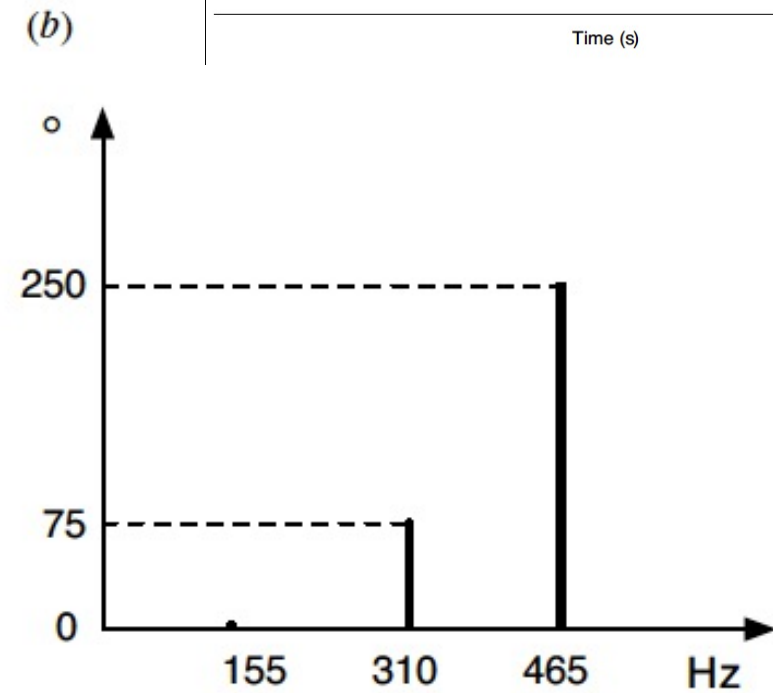
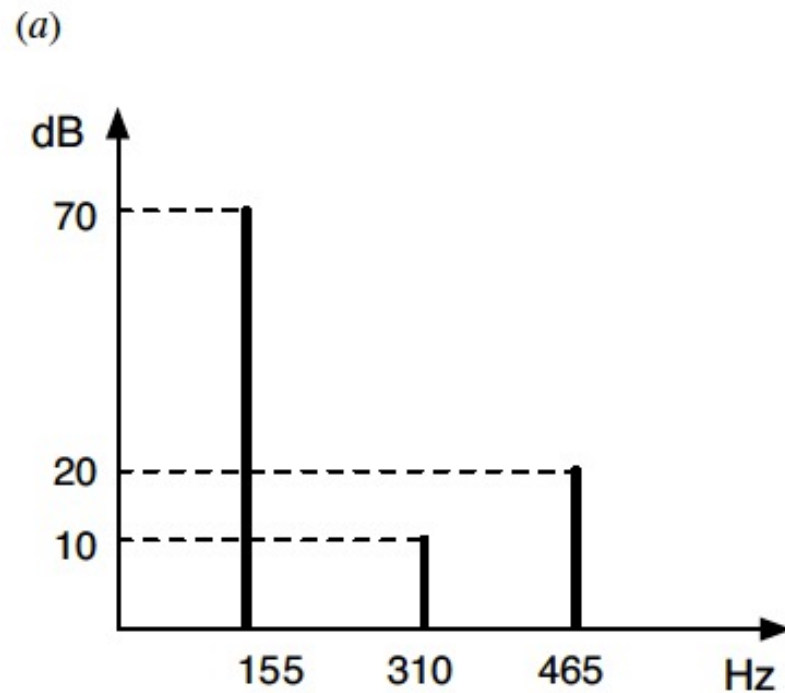
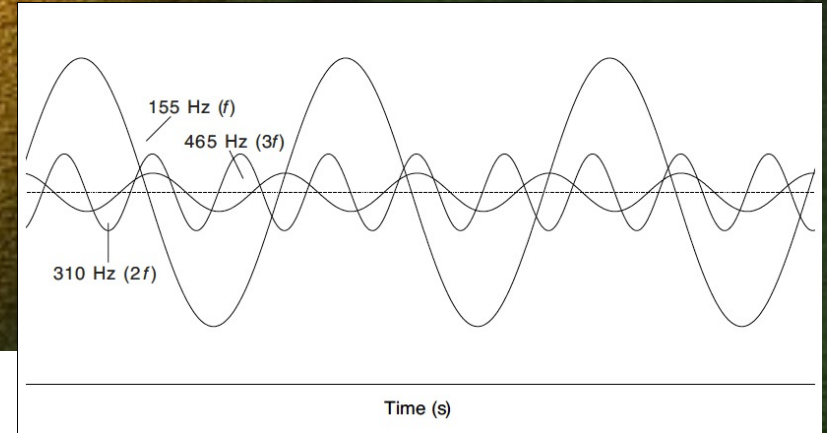


Due toni puri (sovrapposti)

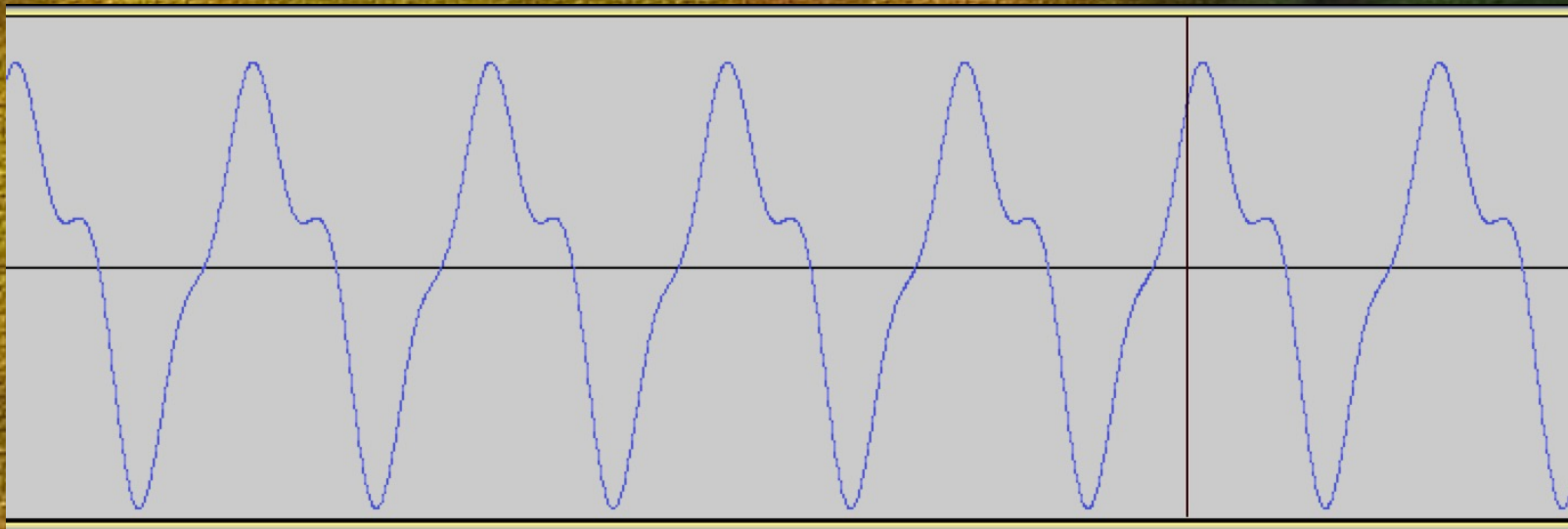
155 Hz + 310 Hz



Dominio della frequenza: gli spettri di ampiezza e fase

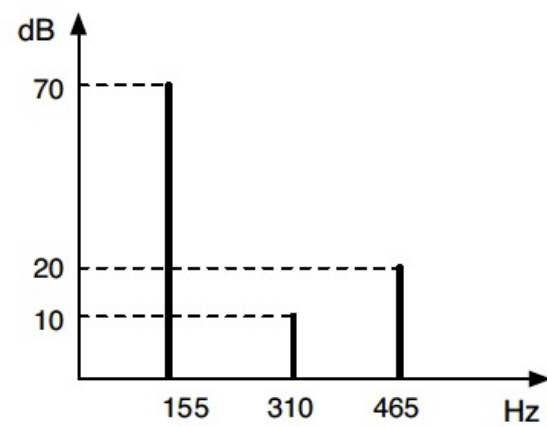


1)

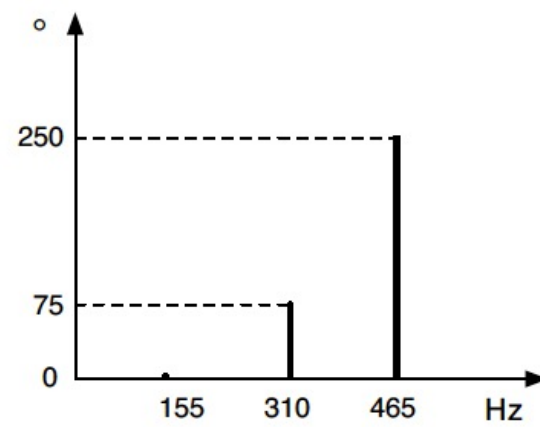


2)

(a)



(b)

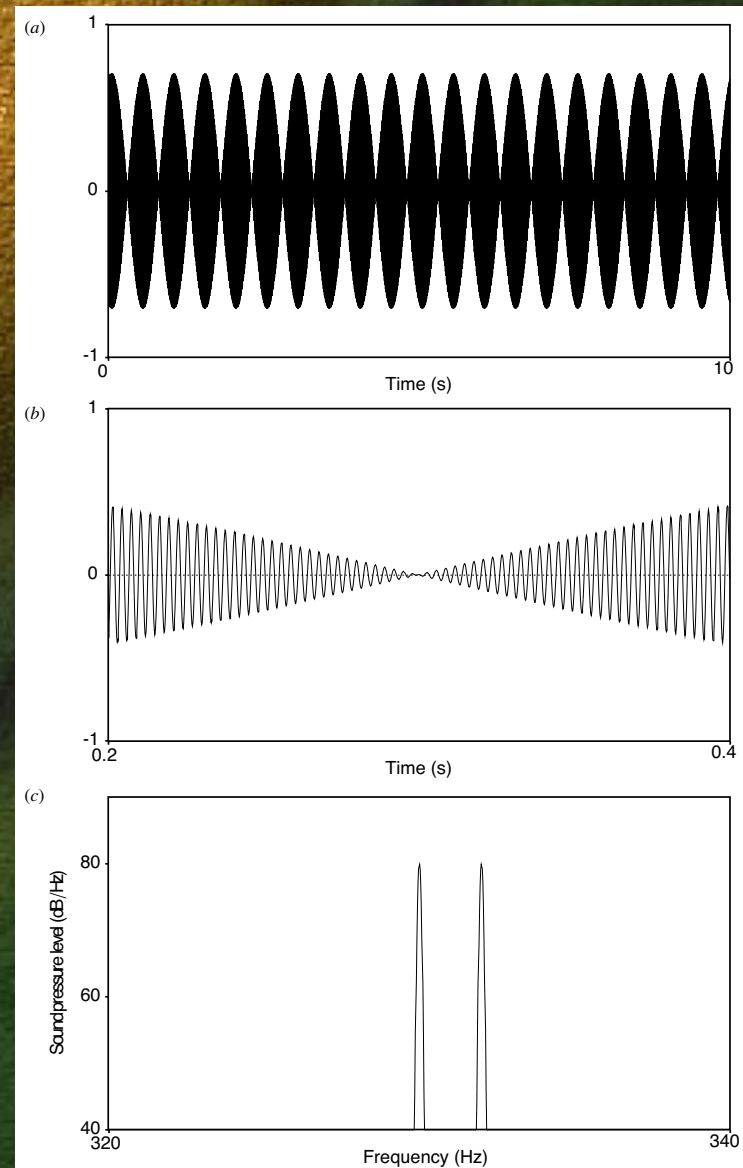


Battimenti

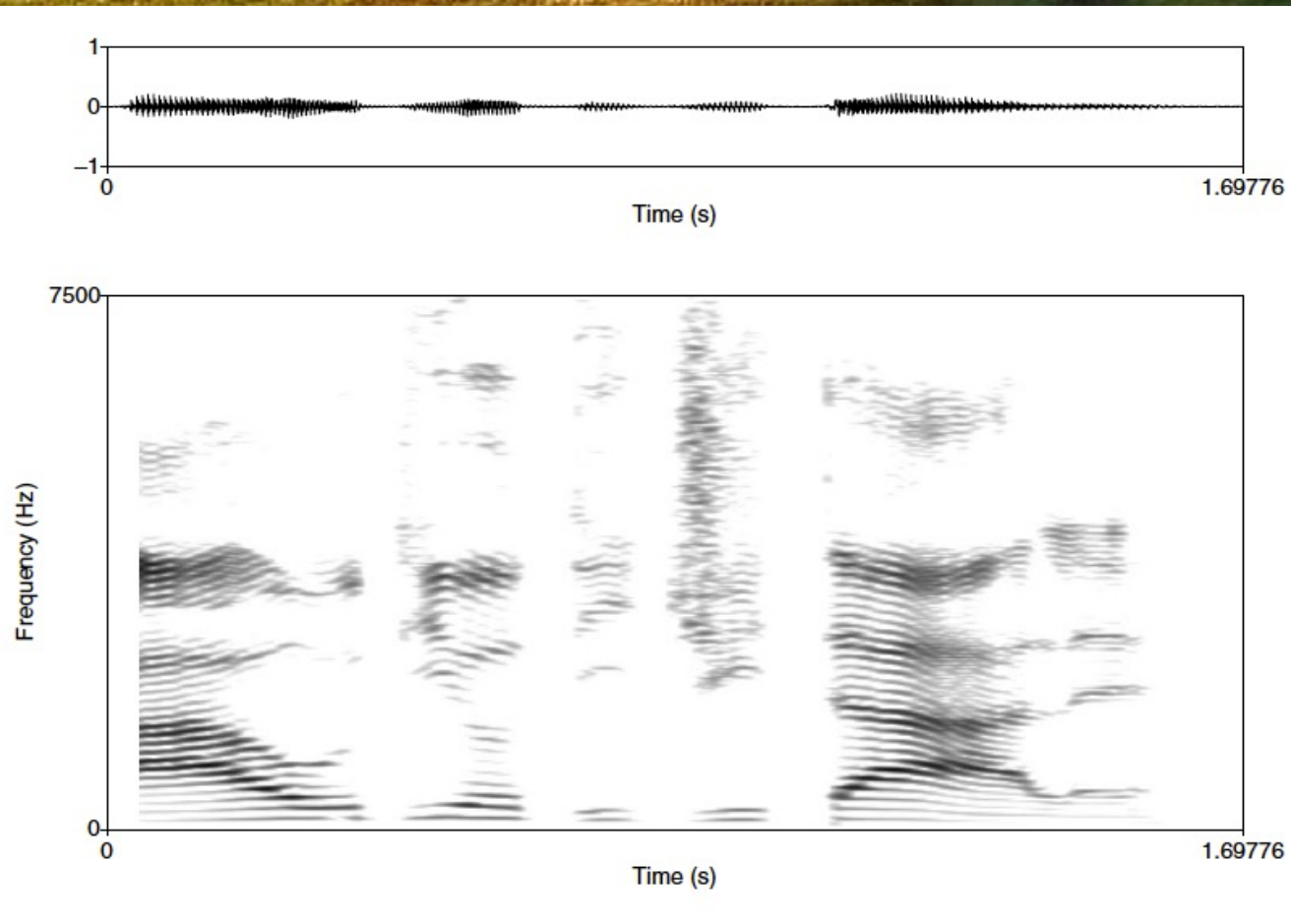
Somma di due onde sinusoidali

Dettaglio

Spettro di ampiezza



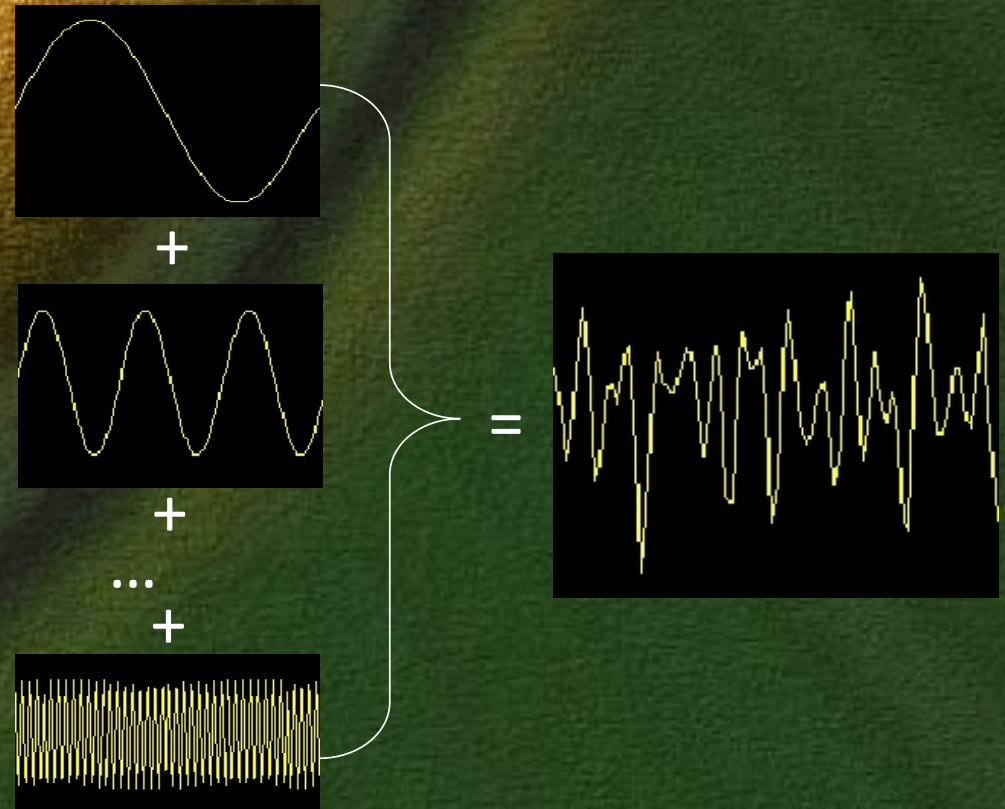
Sonogramma



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 ($f_1 = 1 / P$)

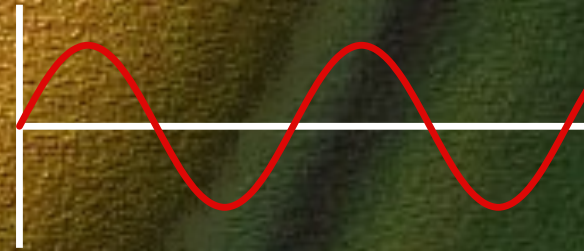
Ogni onda sinusoidale avrà una sua fase (ϕ_n) e ampiezza (C_n), e anche queste possono essere estratte dalla forma d'onda complessa.



Fourier

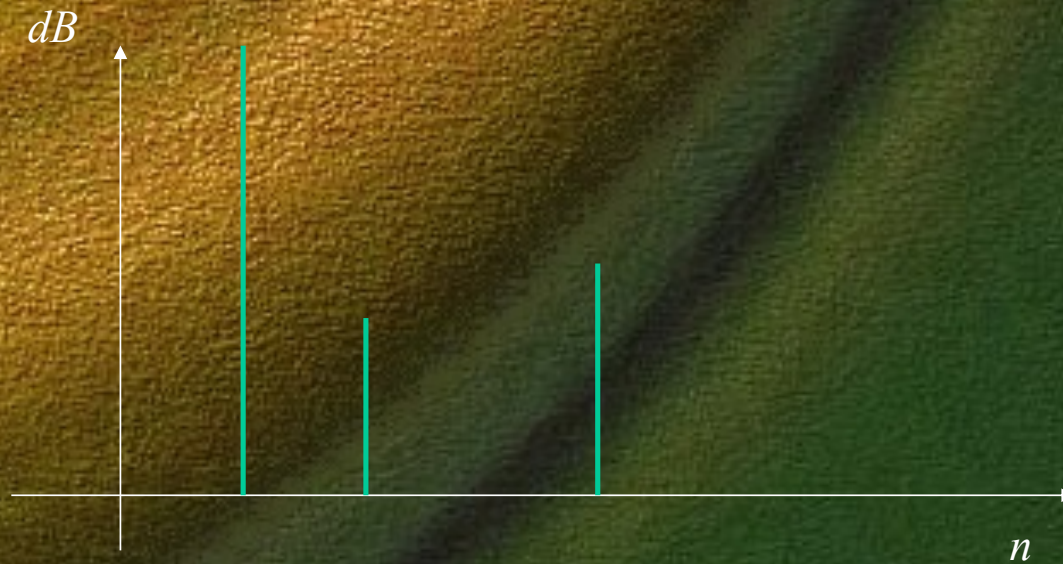
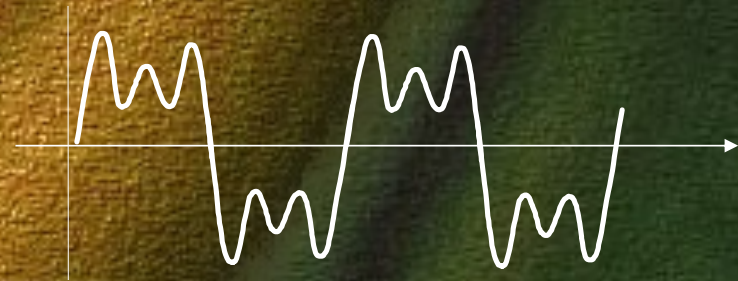
- Sintesi di Fourier: combinare onde sinusoidali per formare onde complesse
- Analisi di Fourier: individuare le componenti sinusoidali di una forma d'onda complessa
- Spettro di Fourier: insieme delle ampiezze delle onde sinusoidali (componenti di Fourier) che formano un'onda complessa

Onda sinusoidale



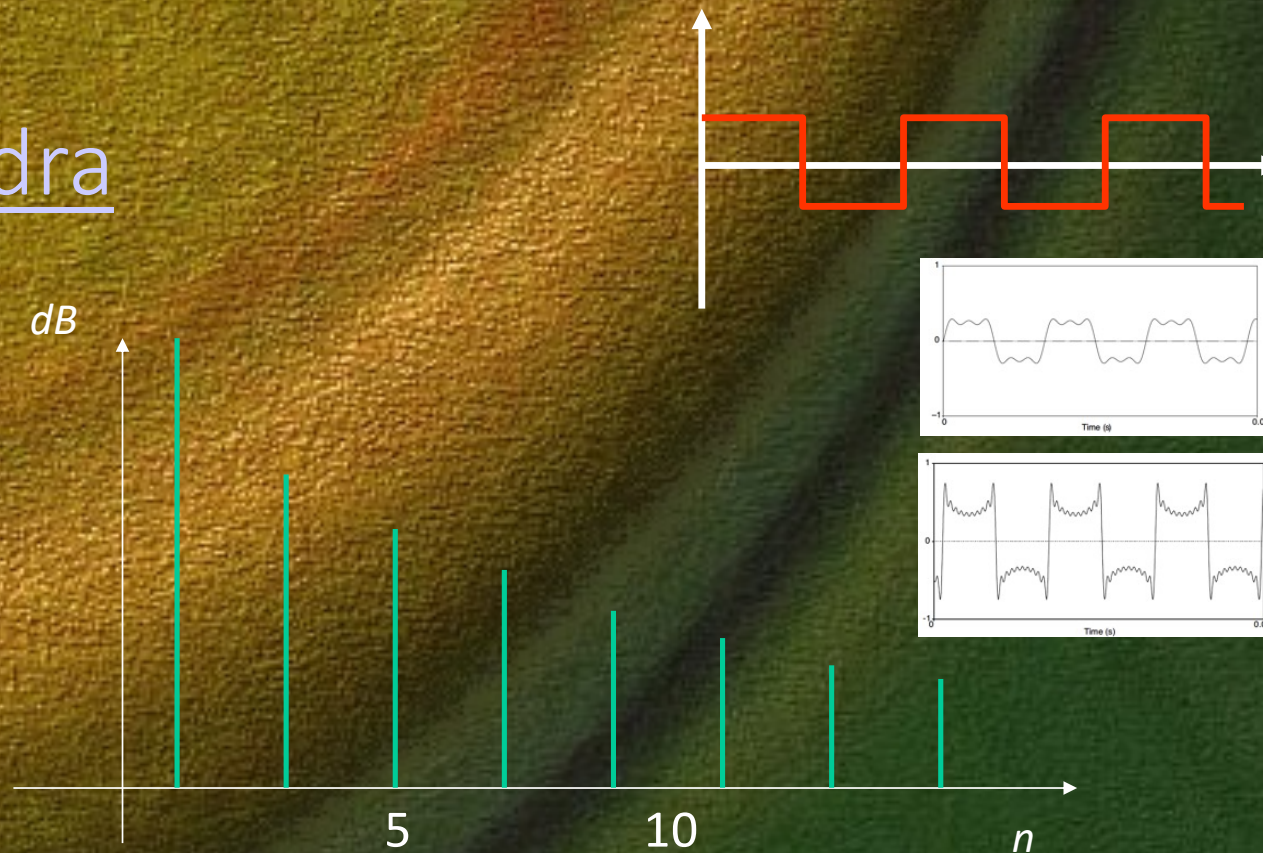
Lo spettro contiene soltanto la fondamentale

Onda periodica



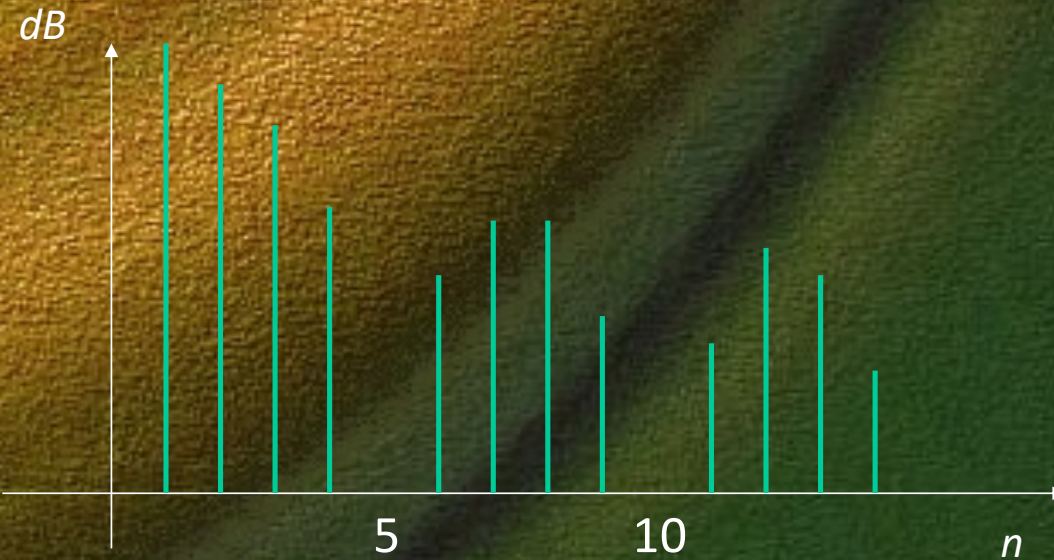
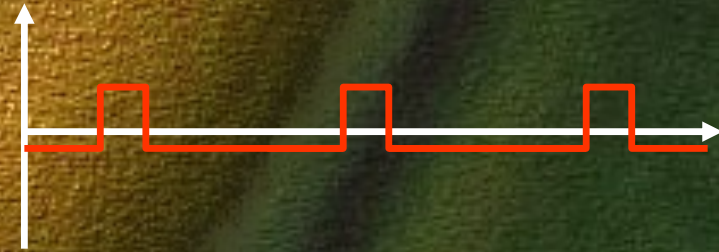
Lo spettro contiene le tre frequenze componenti

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

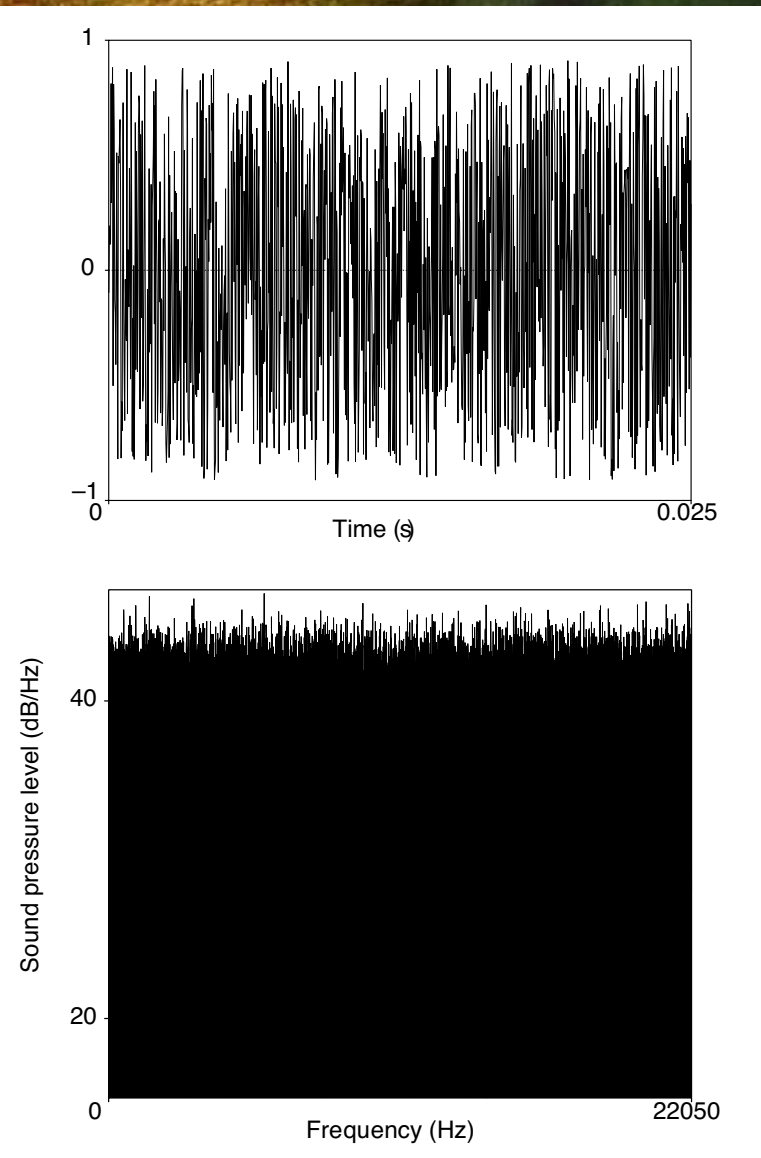


Tutte le armoniche tranne il reciproco del ciclo dell'impulso e i suoi multipli
(es. $T = 0,2 \text{ s}$; $n = 1 / 0,2 = 5$)

Rumore bianco (o casuale)

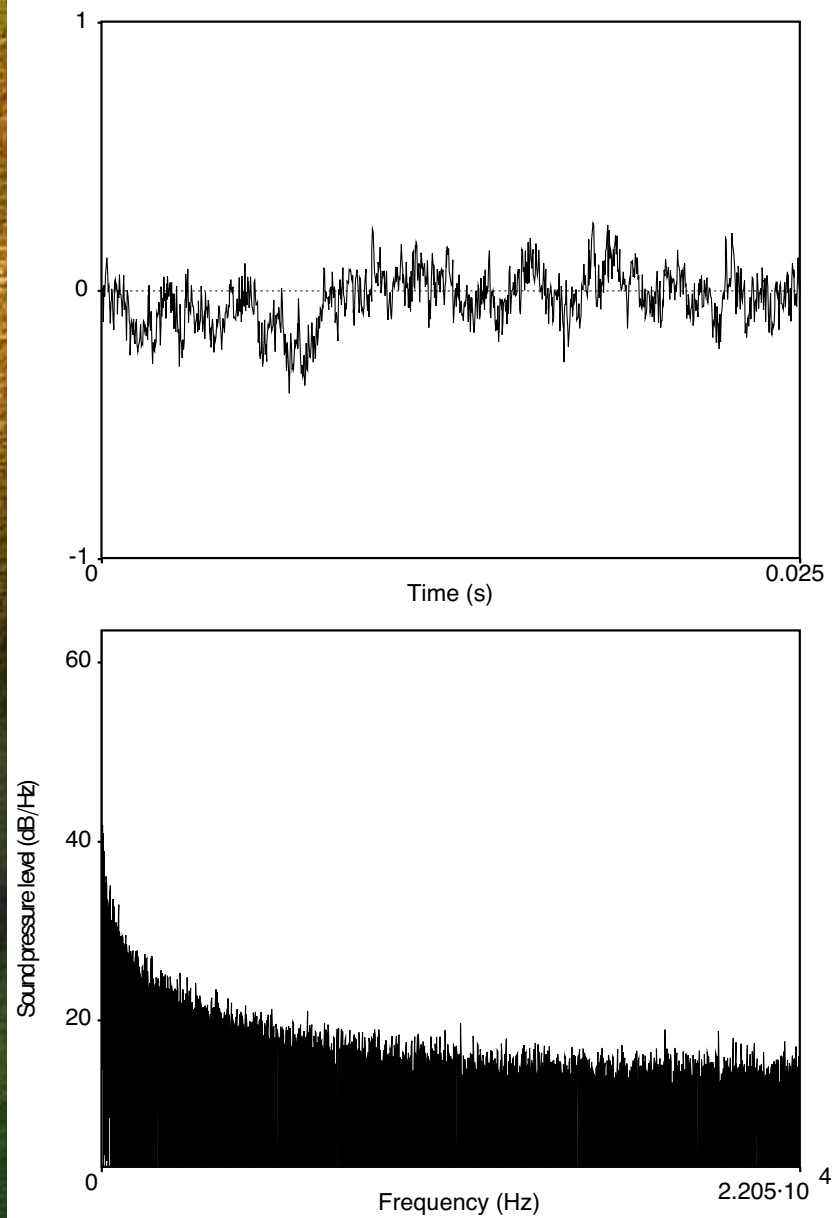
Stessa forza a tutte le
frequenze

Non serie armonica;
combinazione di
sinusoidi a tutte le
frequenze

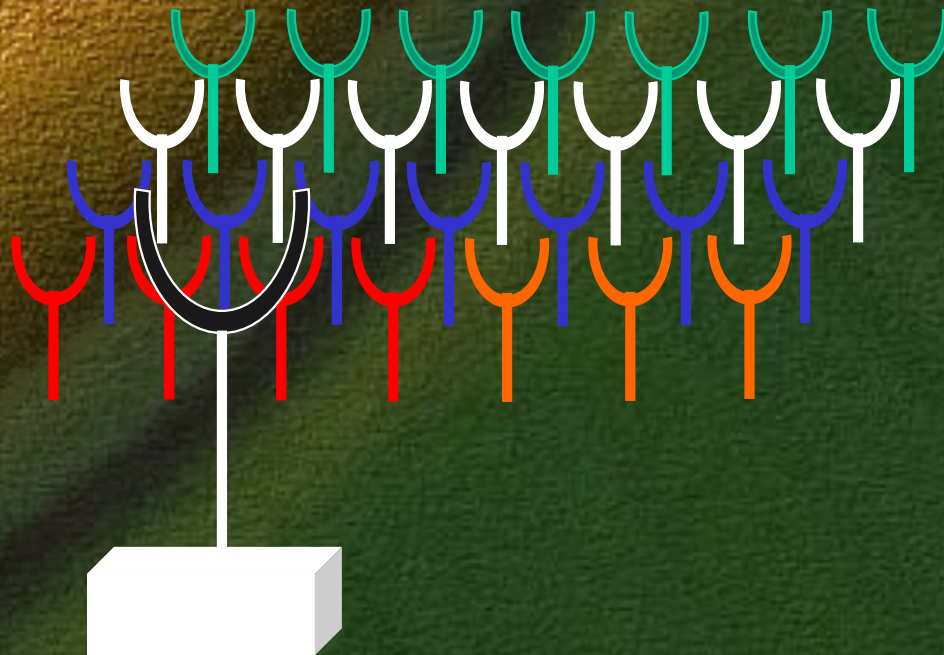


Rumore rosa

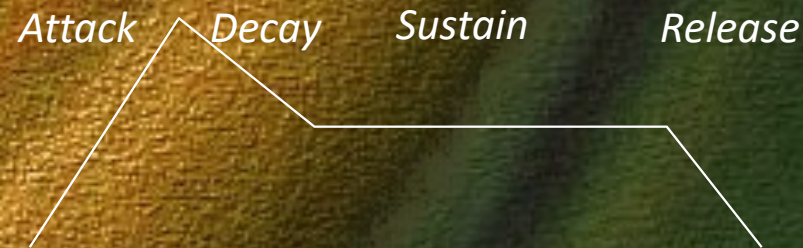
Analogia con i colori
dell'arcobaleno e la
luce bianca



Onde sinusoidali e suoni reali

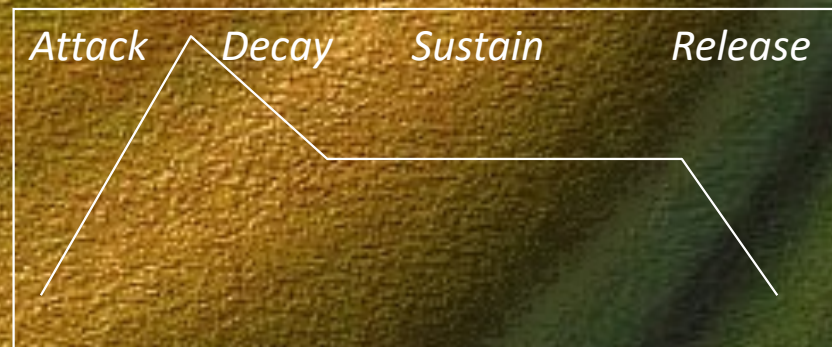


I transitori



- 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



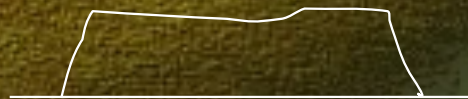
Flauto



Tromba



Pianoforte



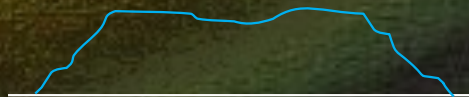
Violino



Organo



Blocchi di legno



Contrabbasso

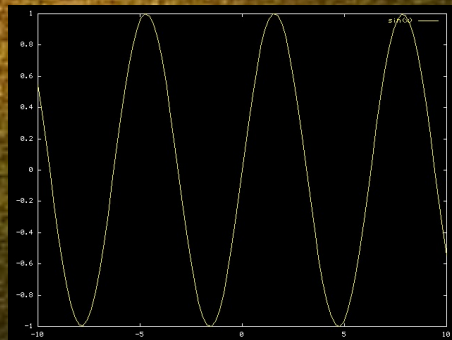
Esempio: chitarra



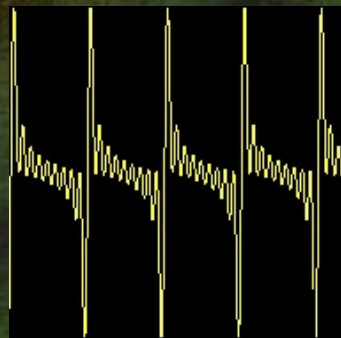
Somme di sinusoidi



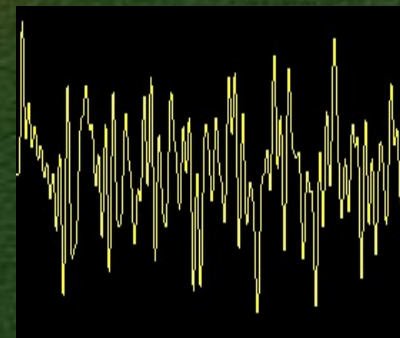
Bell1



Bell2



Bell3

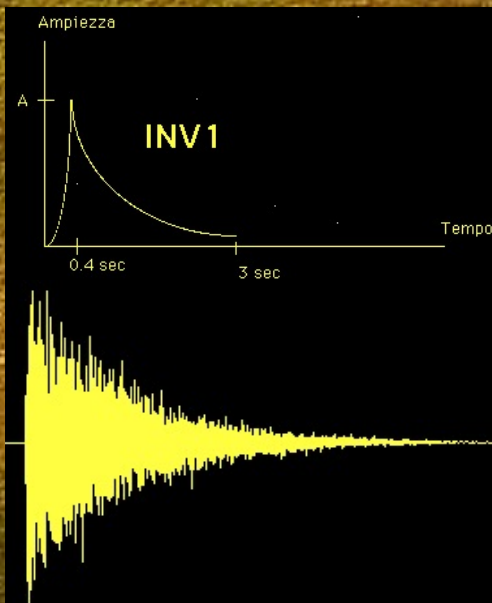


Bells by Paolo Torrente

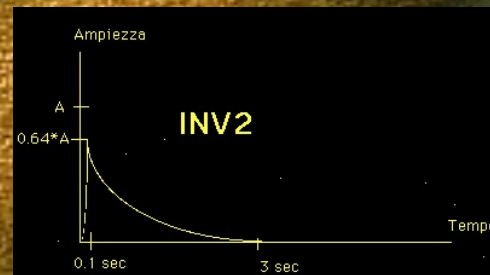
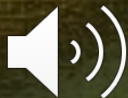
Inviluppi



Bell3



Bell4



Bell5



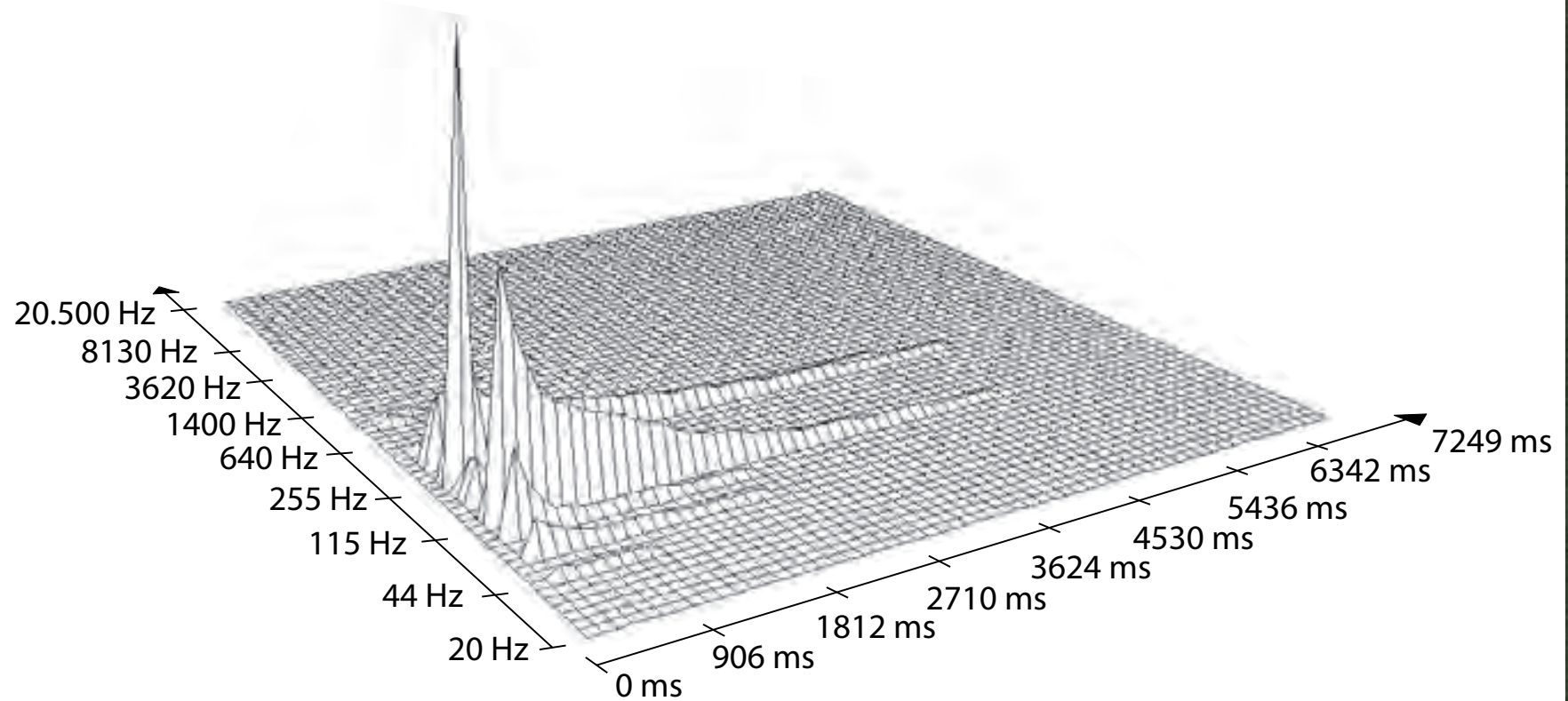
+ battimenti



Bell6

Bells by Paolo Torrente

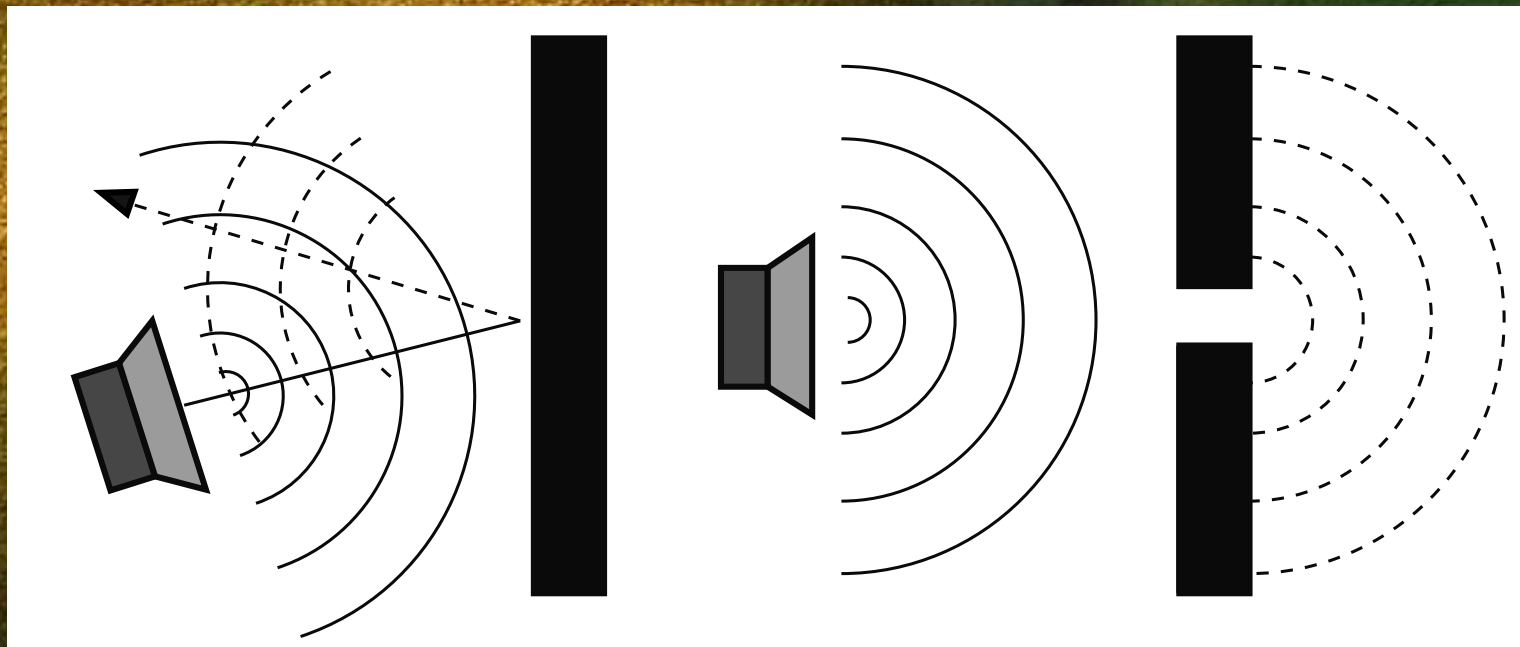
Rappresentazione 3D



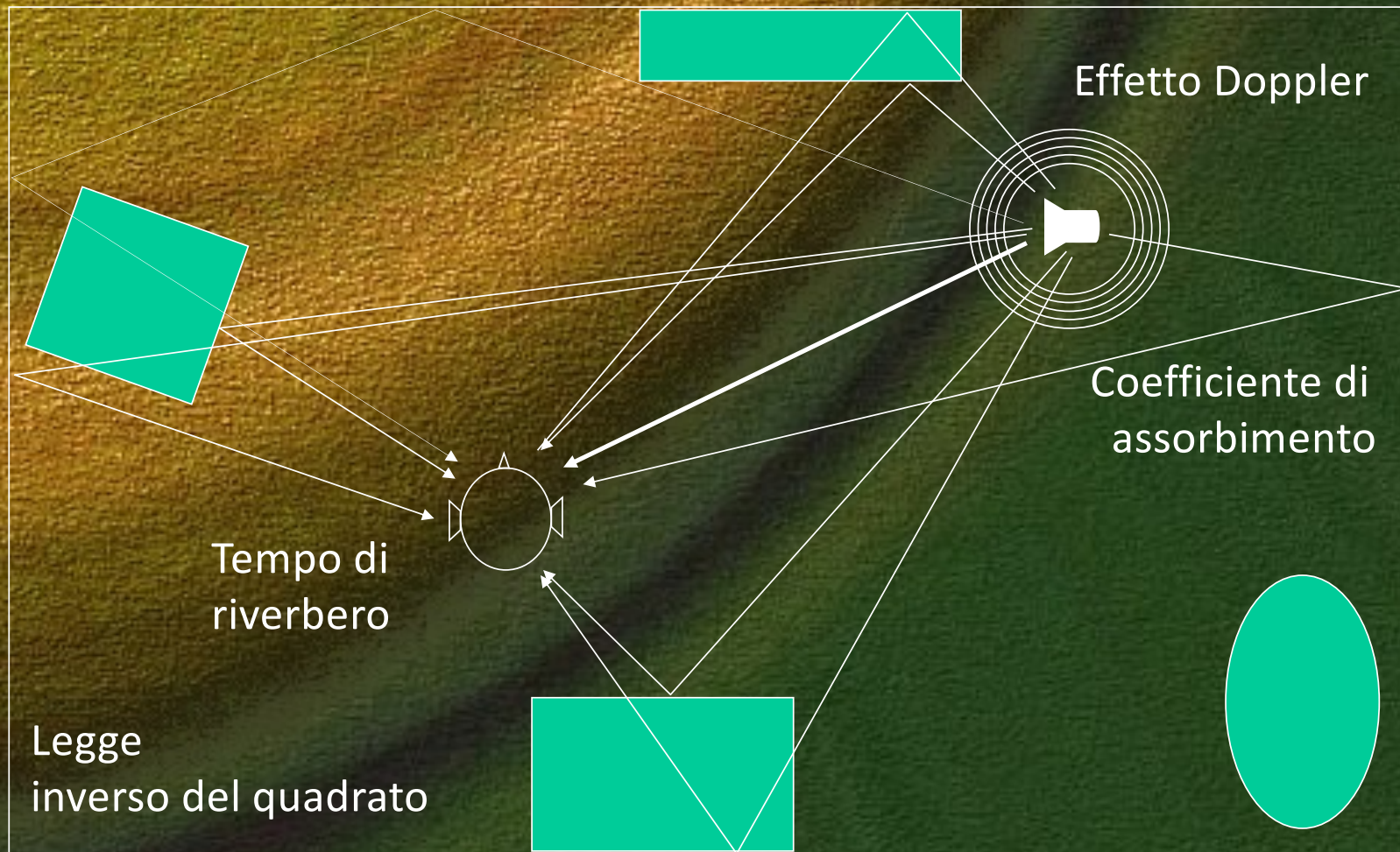


Propagazione del suono

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