



Audio Digitale

Fisica del suono



Il suono - Ridefiniamo

Il **suono** è un insieme¹ di onde meccaniche² longitudinali³.

- [1] Consiste in una somma di più onde sinusoidali a diverse frequenze.
- [2] Onde che si propagano in un mezzo materiale.
- [3] Le particelle del mezzo si muovono in direzione parallela a quella di propagazione.



Il suono – Percezione umana

- Le onde sonore possono teoricamente avere qualunque frequenza.
- Tuttavia l'apparato uditivo umano reagisce solo a suoni che abbiano una frequenza **compresa tra 20 Hz e 20 KHz**.
- Suoni di frequenza inferiore a 20 Hz sono chiamati **infrasuoni**, mentre suoni di frequenza superiore a 20 KHz sono chiamati **ultrasuoni**.



Il suono – Percezione umana

In che modo le grandezze fisiche che caratterizzano le onde (frequenza, ampiezza o l'intero spettro), influiscono sulla percezione del suono?

Grandezza	Percezione
Frequenza	Suono acuto o grave
Ampiezza	Volume alto o basso
Spettro	Timbro o armonia del suono

In realtà ogni grandezza influenza in misura minore le percezioni legate alle altre due grandezze.



Frequenza dei suoni – Alti e bassi

La frequenza di un suono, al livello percettivo, determina la sensazione di acutezza o gravità dello stesso.

In particolare:

- un suono ad alta frequenza risulterà **acuto** o **alto**
- un suono a bassa frequenza risulterà **grave** o **basso**

La frequenza determina in minima parte anche la **percezione** del **volume** o **intensità** del suono. Vedremo più avanti questo fenomeno. Per ora diciamo solo che ad esempio, le basse frequenze necessitano di più energia per essere udite.



Frequenza dei suoni – Alti, medi, bassi

I suoni possono essere allora classificati come alti, medi o bassi. Tipicamente si considera lo schema:

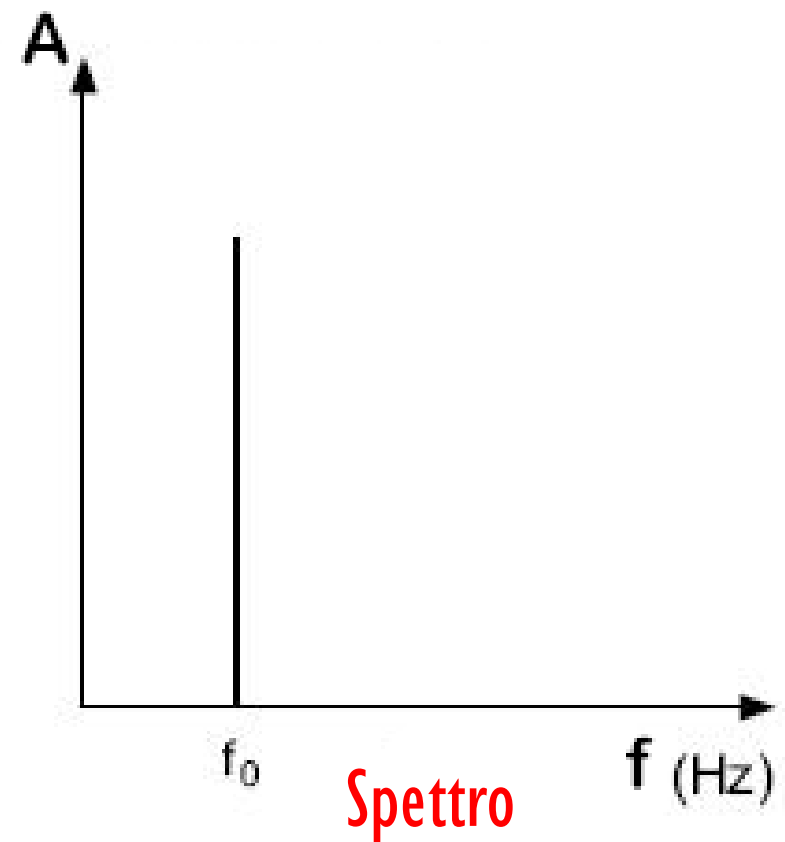
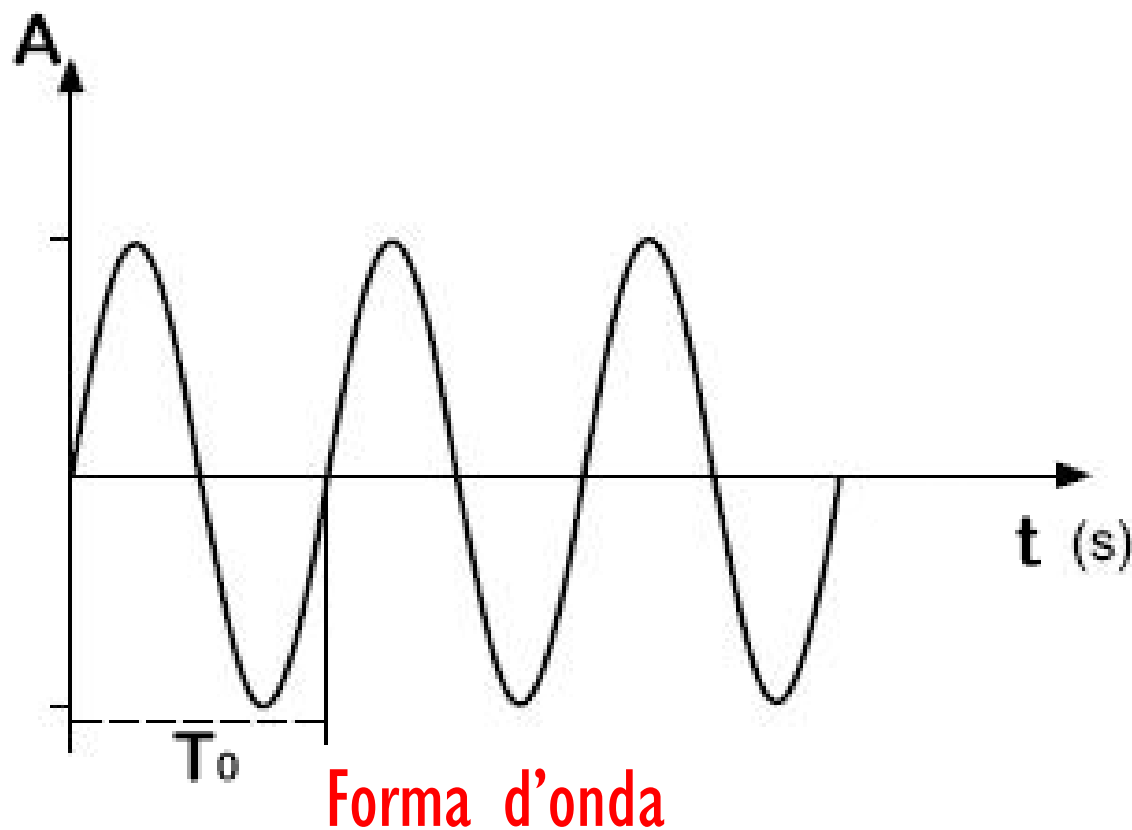
Intervallo frequenza	Tipo
20 – 500 Hz	Bassi
500 – 8000 Hz	Medi
8000 – 20000 Hz	Alti

La frequenza nella musica è strettamente legata alle **note musicali**. Infatti ad ogni nota corrisponde una precisa frequenza



Frequenza dei suoni – Tono puro

I suoni composti da una singola onda sinusoidale si chiamano **toni (o suoni) puri**. Il loro spettro contiene una sola frequenza. Le **armoniche** di un tono puro, sono i toni puri con frequenza multipla.

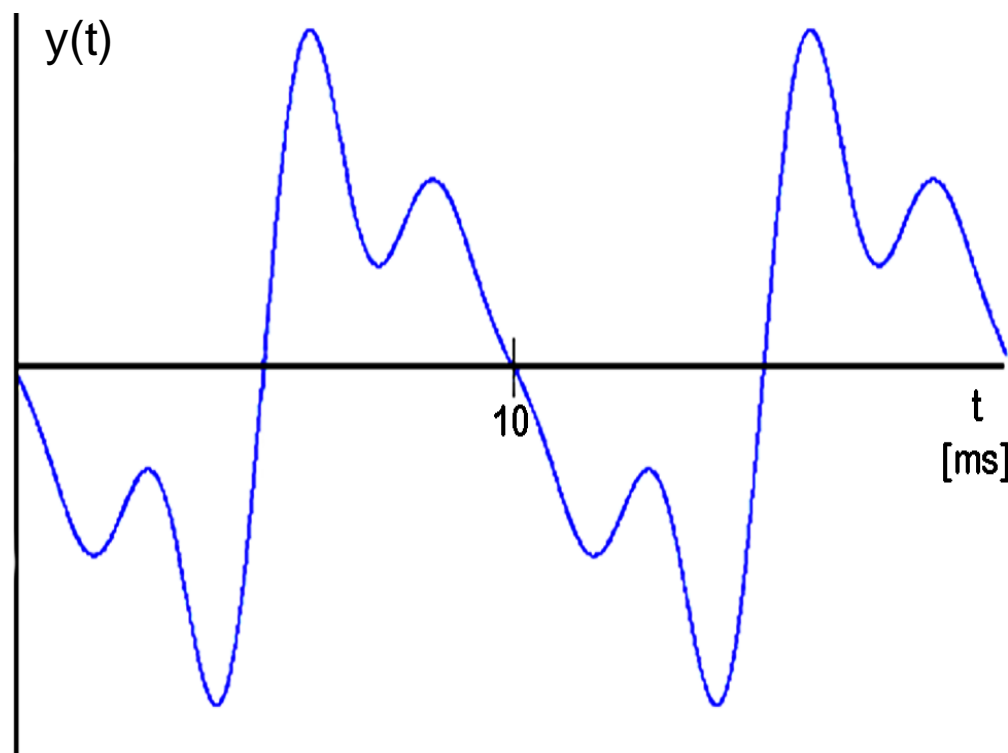


In natura i toni puri sono inesistenti. Possono essere prodotti in laboratorio o ottenuti in maniera abbastanza fedele con strumenti come il **diapason**. Ogni diapason viene costruito per emettere un solo tono puro!

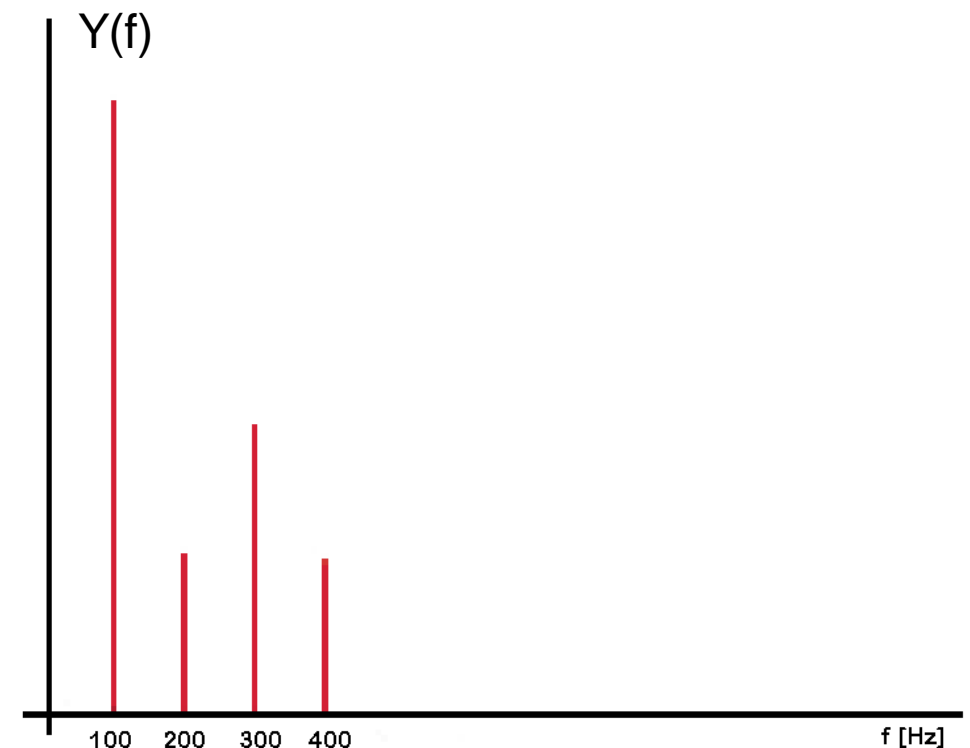


Frequenza dei suoni– Toni complessi

I suoni composti dalla somma di più toni puri (sinusoidi) prendono il nome di **toni (o suoni) complessi**. Il loro spettro contiene più di una frequenza.



Forma d'onda

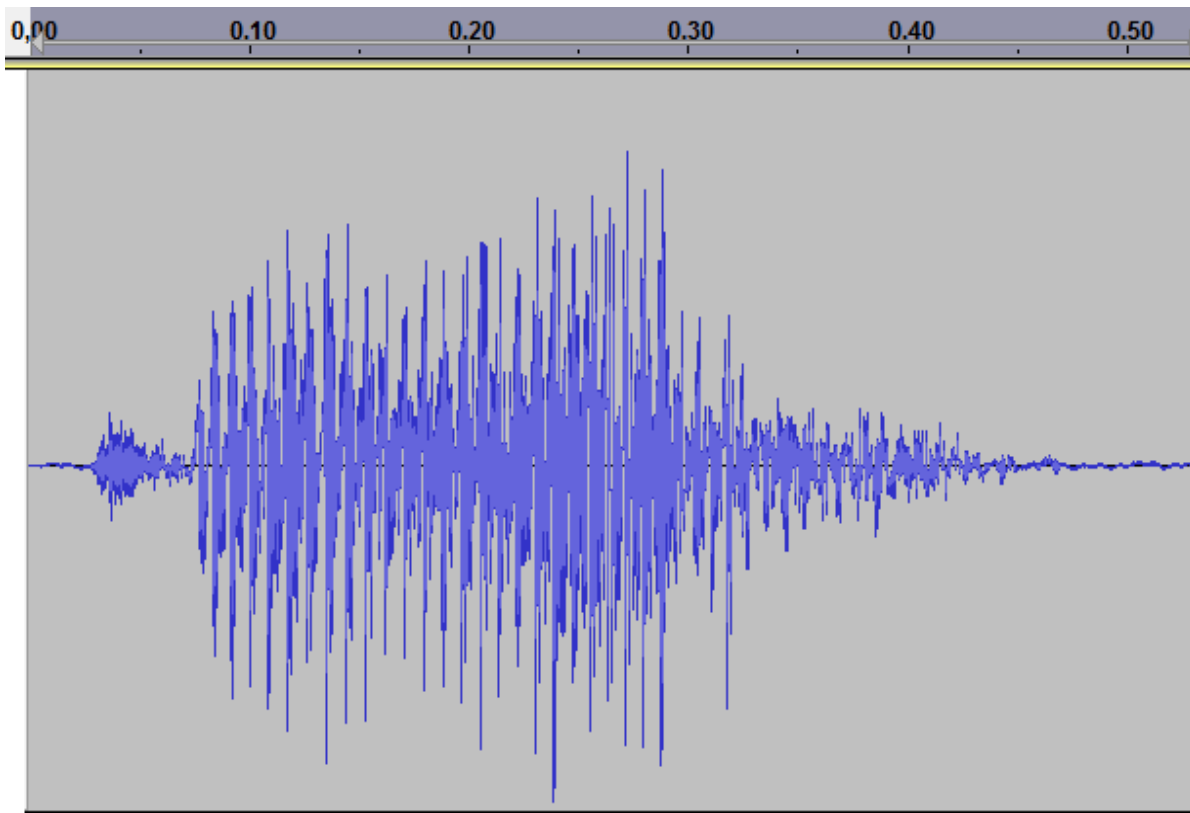


Spettro

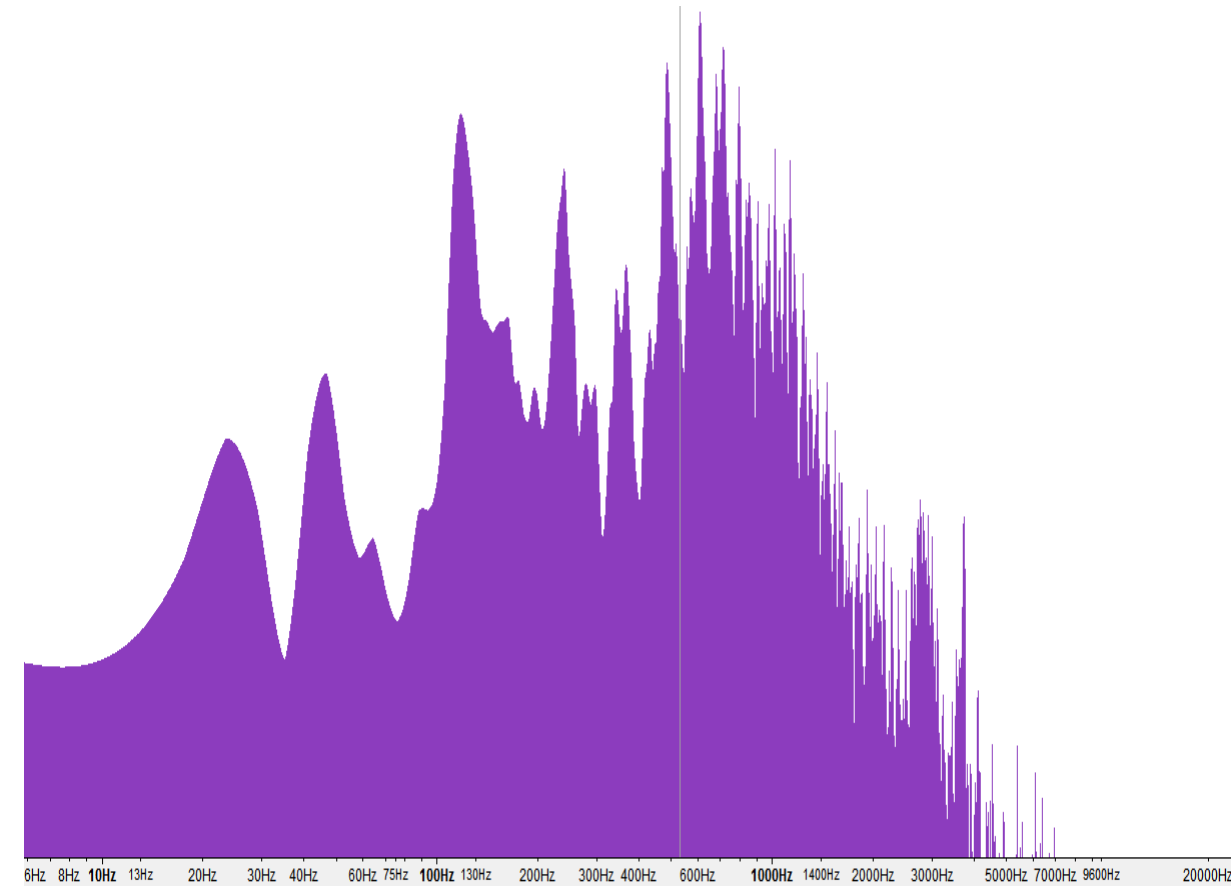
Praticamente tutti i suoni presenti in natura sono complessi.



Frequenza dei suoni– Toni Complessi (Es.)



Forma d'onda



Spettro

A destra la forma d'onda associata alla parola «ciao» pronunciata da un essere umano. A sinistra lo spettro della dell'onda sonora. Si può notare l'enorme quantità di frequenze (sinusoidi) presenti.



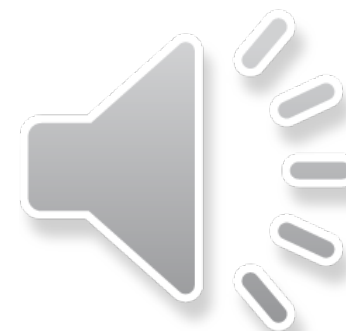
Frequenza suoni – Esempi toni puri



200 Hz



440 Hz



1000 Hz

VEDI
FILE
AUDIO



5000 Hz



17000 Hz



20000 Hz



Frequenza dei suoni - Note

- Nella musica la frequenza di un suono caratterizza le **note musicali**.
- Potremmo pensare che la **nota** corrisponda allora ad un tono puro, ma come sappiamo la stessa **nota** può essere prodotta da diversi strumenti musicali ed essere quindi percepita in maniera differente.
- In realtà la nota dipende dalla frequenza predominante nello **spettro** dell'onda sonora. Tutte le altre frequenze caratterizzano invece lo strumento.



Frequenza dei suoni - Note

Si definisce **nota musicale** ciascuno dei simboli utilizzati nella musica per descrivere un particolare suono.

Le note musicali più conosciute sono quelle della **scala diatonica**. Sono 7 e si ripetono a frequenze differenti.

Do Re Mi Fa Sol La Si

Esistono tuttavia altre scale, come la scala **temperata** e la scala **cromatica**.



Frequenza dei suoni - Note

Per ragioni storiche e psicoacustiche, le note sono ripartite all'interno di intervalli denominati **ottave**.

L'**ottava** è l'intervallo che intercorre tra **note** uguali di cui una ha frequenza doppia dell'altra. Ogni ottava inizia con la stessa nota dell'ottava precedente (ma di frequenza doppia).



Frequenza dei suoni - Note

- Ogni **ottava** nella **scala diatonica** contiene 8 note della scala stessa. Es:

Do Re Mi Fa Sol La Si Do

- Nella **scala temperata (occidentale)** le ottave sono divise in 12 semitoni. Un semitono consiste in un aumento in frequenza di un fattore $2^{1/12}$ tra note adiacenti. Ciò significa che il rapporto tra la frequenza di una nota e quella che la precede, sarà uguale $2^{1/12}$. Ogni ottava contiene 13 note tra cui quelle della scala diatonica e 5 variazioni precedute dal simbolo #. Es:

Do #Do Re #Re Mi Fa #Fa Sol #Sol La #La Si Do



Frequenza dei suoni - Note

Di recente (1939) è stato deciso di utilizzare come nota di riferimento il **La**, fissato ad una frequenza di **440 Hz**. Un **diapason** opportunamente costruito può emettere esattamente un tono (quasi) puro a questa frequenza.



La frequenza di ogni nota può quindi essere definita in base alla distanza dal **La** fondamentale. Una nota distante n (intero relativo) semitoni da quella di riferimento nella scala occidentale avrà frequenza:

$$f_n = f_{ref} \times 2^{\frac{n}{12}} \quad \text{con} \quad f_{ref} = 440 \text{ Hz}$$

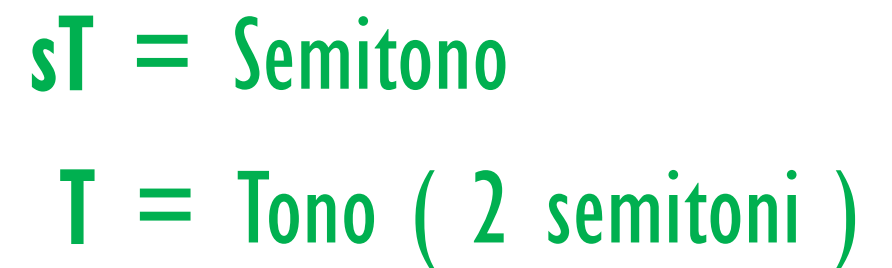


Frequenza dei suoni - Note

Note	Notazione Anglossassone	Frequenza (Hz)
la	A	$440.0 = 440 \times 2^{0/12}$
la#	A#	$466.2 = 440 \times 2^{1/12}$
si	B	$493.8 = 440 \times 2^{2/12}$
do	C	$523.2 = 440 \times 2^{3/12}$
do#	C#	$554.4 = 440 \times 2^{4/12}$
re	D	$587.3 = 440 \times 2^{5/12}$
re#	D#	$622.2 = 440 \times 2^{6/12}$
mi	E	$659.2 = 440 \times 2^{7/12}$
fa	F	$698.4 = 440 \times 2^{8/12}$
fa#	F#	$740.0 = 440 \times 2^{9/12}$
sol	G	$784.0 = 440 \times 2^{10/12}$
sol#	G#	$830.6 = 440 \times 2^{11/12}$
la	A	$880.0 = 440 \times 2^{12/12}$

Semitono

Ottava





Frequenza dei suoni – Tabella note

Note	ottave									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Do	16,35	32,70	65,41	130,8	261,6	523,3	1047	2093	4186	8372
Do#-Reb	17,32	34,65	69,30	138,6	277,2	554,4	1109	2217	4435	8870
Re	18,35	36,71	73,42	146,8	293,7	587,3	1175	2349	4699	9397
Re#-Mib	19,45	38,89	77,78	155,6	311,1	622,3	1245	2489	4978	9956
Mi	20,60	41,20	82,41	164,8	329,6	659,3	1319	2637	5274	10548
Fa	21,83	43,65	87,31	174,6	349,2	698,5	1397	2794	5588	11175
Fa#-Solb	23,12	46,25	92,50	185,0	370,0	740,0	1480	2960	5920	11840
Sol	24,50	49,00	98,00	196,0	392,0	784,0	1568	3136	6272	12544
Sol#-Lab	25,96	51,91	103,8	207,7	415,3	830,6	1661	3322	6645	13290
La	27,50	55,00	110,0	220,0	440,0	880,0	1760	3520	7040	14080
La#-Sib	29,14	58,27	116,5	233,1	466,2	932,3	1865	3729	7459	14917
Si	30,87	61,74	123,5	246,9	493,9	987,8	1976	3951	7902	15804

Nella musica si usano ottave che iniziano sempre con il **Do**, ma nulla vieta di iniziare con altre note. Come visto con il **La** fondamentale, è possibile ricavare le frequenze di tutte le note fissandone una di riferimento e conoscendo la «distanza» da questa.



Frequenza dei suoni - Armoniche

- Per la Serie di Fourier abbiamo definito armoniche, tutte le componenti con frequenza multipla di quella fondamentale.
- In generale, fissato un tono puro (e quindi una frequenza), possiamo definire le sue armoniche come tutti i toni puri con frequenza multipla di quella fissata.
- Le armoniche di uno stesso tono puro, se suonate insieme o in sequenza producono di solito un suono gradevole.
- Un esempio è l'accordo di **Do maggiore**, che si ottiene suonando il Do il Mi e il Sol, tutti multipli di un Do di ottave precedenti (es: Do a 261,6 Hz).



Frequenza dei suoni - Diapason



Tono puro a 440 Hz
generato tramite
software



VEDI
FILE
AUDIO



Suono emesso da un
diapason da 440 Hz
e registrato



Velocità del suono

- Come detto in precedenza le onde si propagano, ma a che velocità?
- La velocità delle onde dipende dalle proprietà chimiche e fisiche del mezzo di propagazione.
- Le onde sonore si propagano **nell'aria** a temperatura **20 °C** ad una velocità di **343,85 $\frac{m}{s}$**



Velocità del suono

In generale la velocità del suono in un mezzo può essere ricavata dalla seguente formula:

$$v_{i,T} = v_{i,0} + \alpha_i(T)$$

Dove T è la temperatura in gradi celsius, $v_{i,0}$ è la velocità del suono nel mezzo i a temperatura $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\alpha_i(T)$ una funzione che pesa l'influenza della temperatura nella velocità finale.

Nell'aria $v_{aria,0} = 331,45 \frac{m}{s}$, e $\alpha_{aria}(T) = 0,62 T$ (approssimato).
Per questo per $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ si ottiene $v_{aria,20} = 343,85 \frac{m}{s}$.



Lunghezza d'onda

Una volta fissata la velocità del suono e nota la frequenza, è possibile calcolare la **lunghezza d'onda**. Ricordiamo:

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

Quali sono le lunghezze d'onda udibili dagli esseri umani?

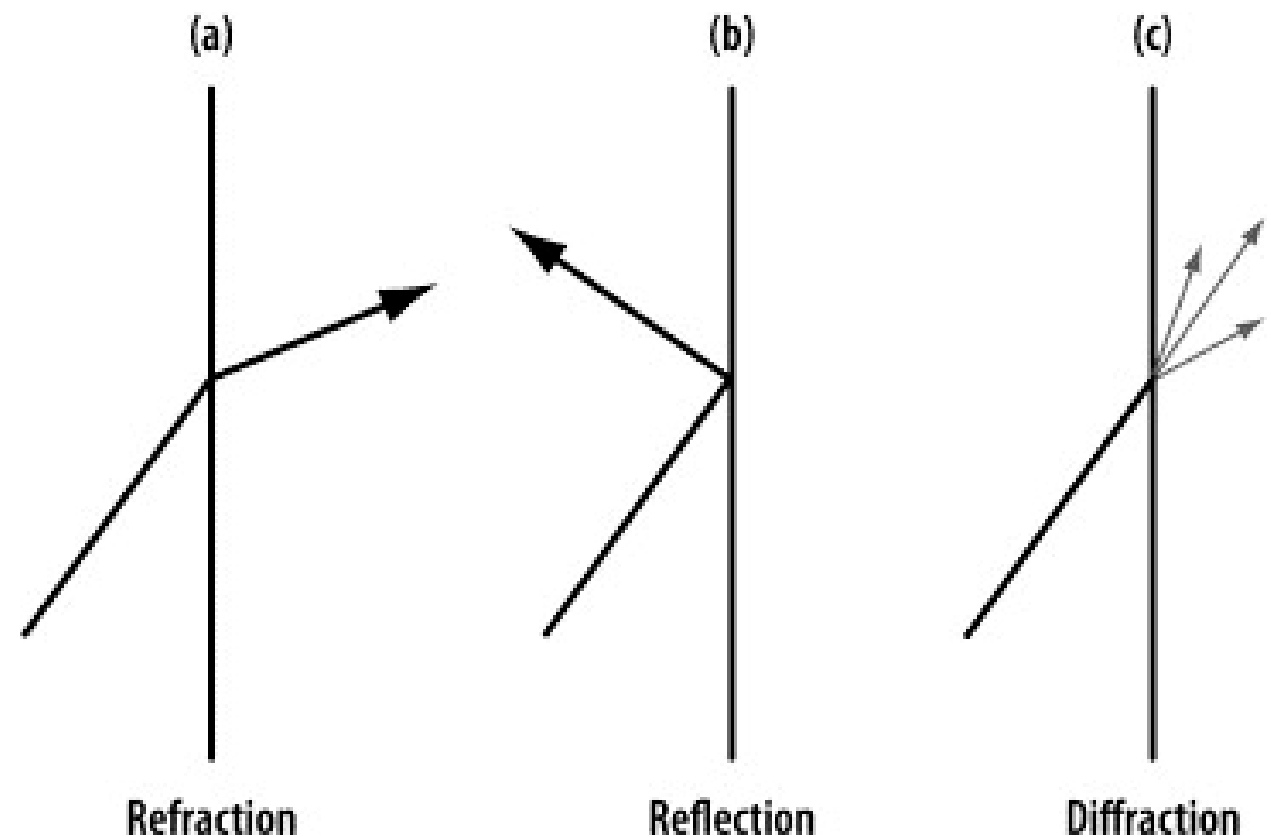
Sapendo che il range di frequenze udibili è $20\text{Hz} - 20\text{KHz}$, basta calcolare le lunghezze d'onda per gli estremi in frequenza. Nell'aria a 20°C , il range delle lunghezze d'onda udibili va da ***17 mm a 17 m***.



Deviazione delle onde sonore

Le onde in generale possono subire delle alterazioni durante la propagazione. In particolare le onde sonore possono subire delle deviazioni, che si verificano sotto diverse condizioni fisiche. Abbiamo:

- Rifrazione
- Riflessione
- Diffrazione





Rifrazione

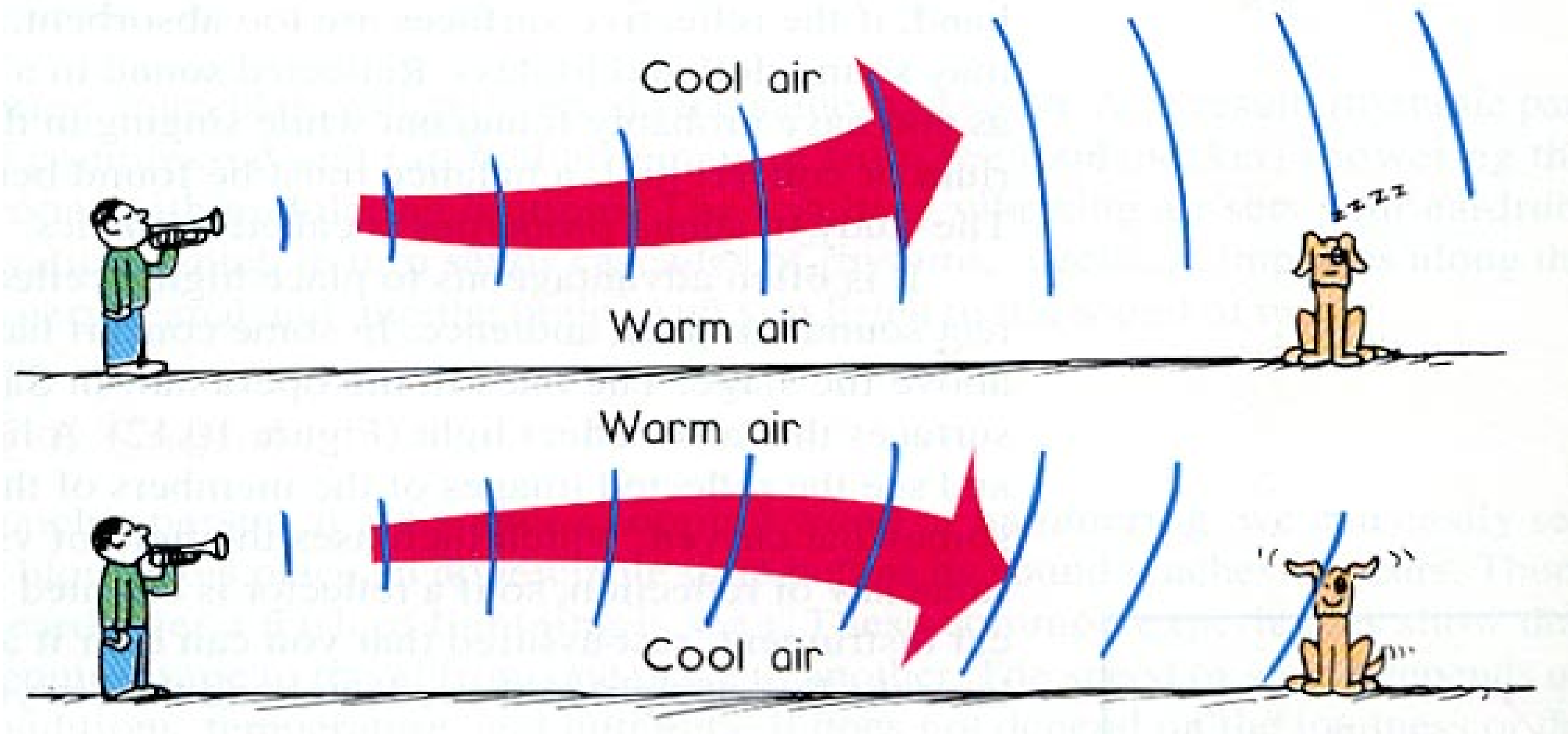
La **rifrazione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda causata da una variazione nella velocità di propagazione della stessa.

- La velocità varia se cambia la temperatura...
- ...oppure se cambia il mezzo di propagazione.





Rifrazione del suono - Fenomeni



Nell'aria fredda la velocità del suono è più bassa, mentre nell'aria calda è più alta. Quando l'aria vicino al suolo è calda (es: giorno) e sopra fredda, le onde vengono deviate verso l'alto. Viceversa vengono deviate verso il basso (es: notte). Per questo nelle serate fredde i suoni possono essere uditi più facilmente a parità di distanza dalla sorgente.

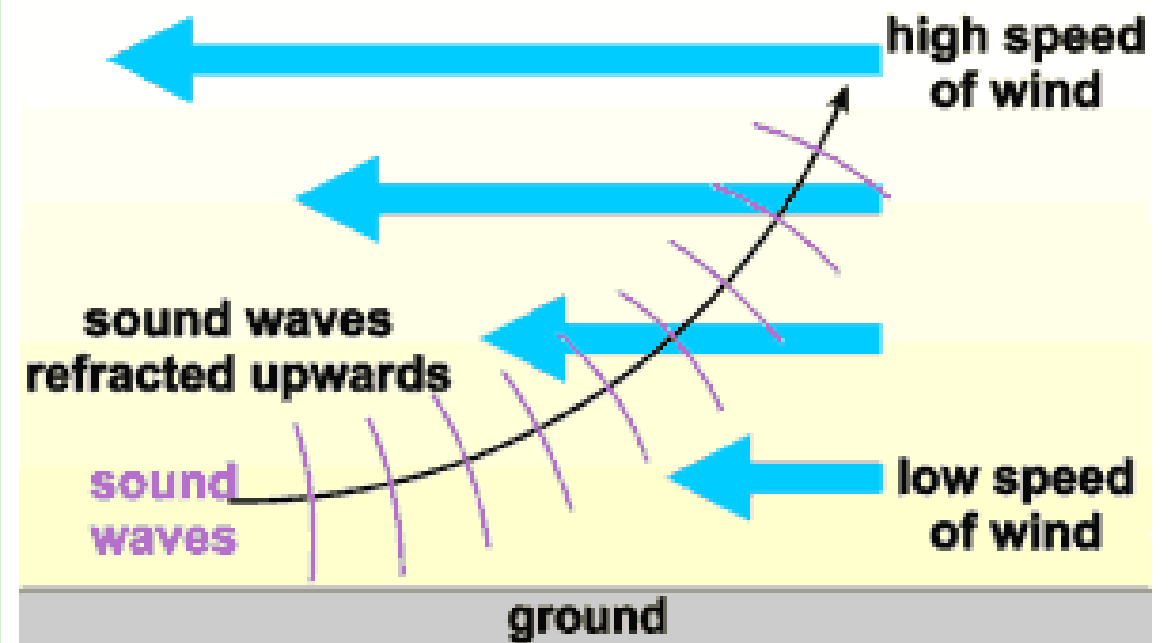
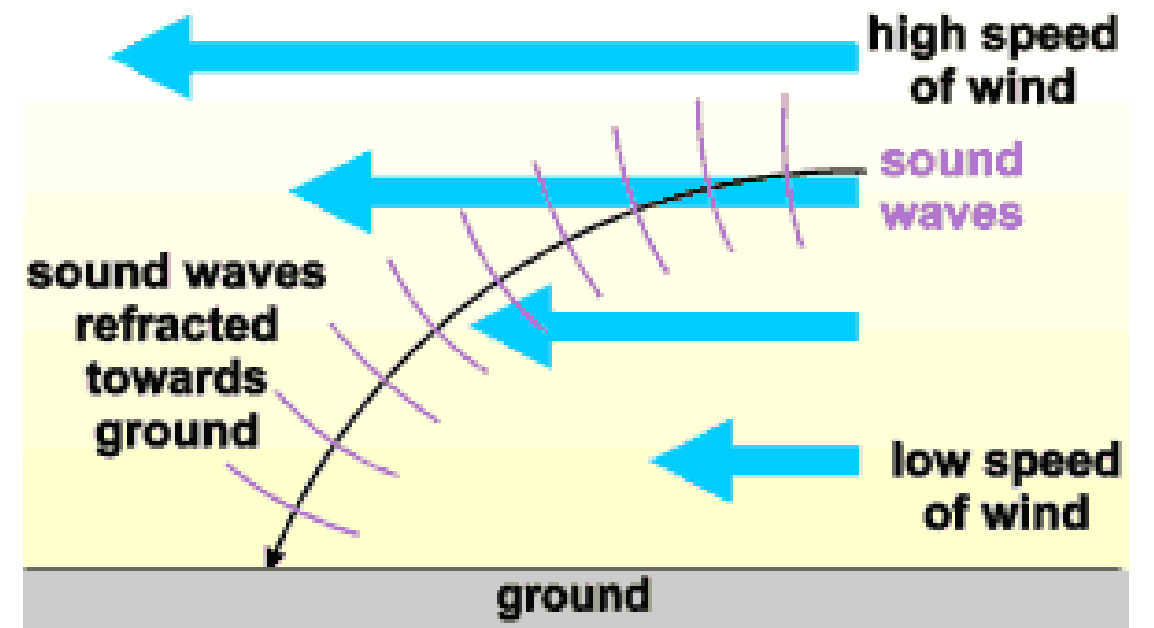


Rifrazione del suono - Fenomeni

Il vento trasporta le parole?

Solitamente il vento soffia ad una velocità più bassa vicino al suolo e più elevata ad alta quota. La differenza tra queste due velocità induce una rifrazione. Nel caso in cui la direzione delle onde sonore è uguale alla direzione in cui soffia il vento, queste verranno rifratte verso il basso. Se la direzione è opposta le onde saranno rifratte verso l'alto.

Per questo si ha l'impressione che il vento «trasporti» le parole. In realtà le onde vengono deviate e non trasportate.

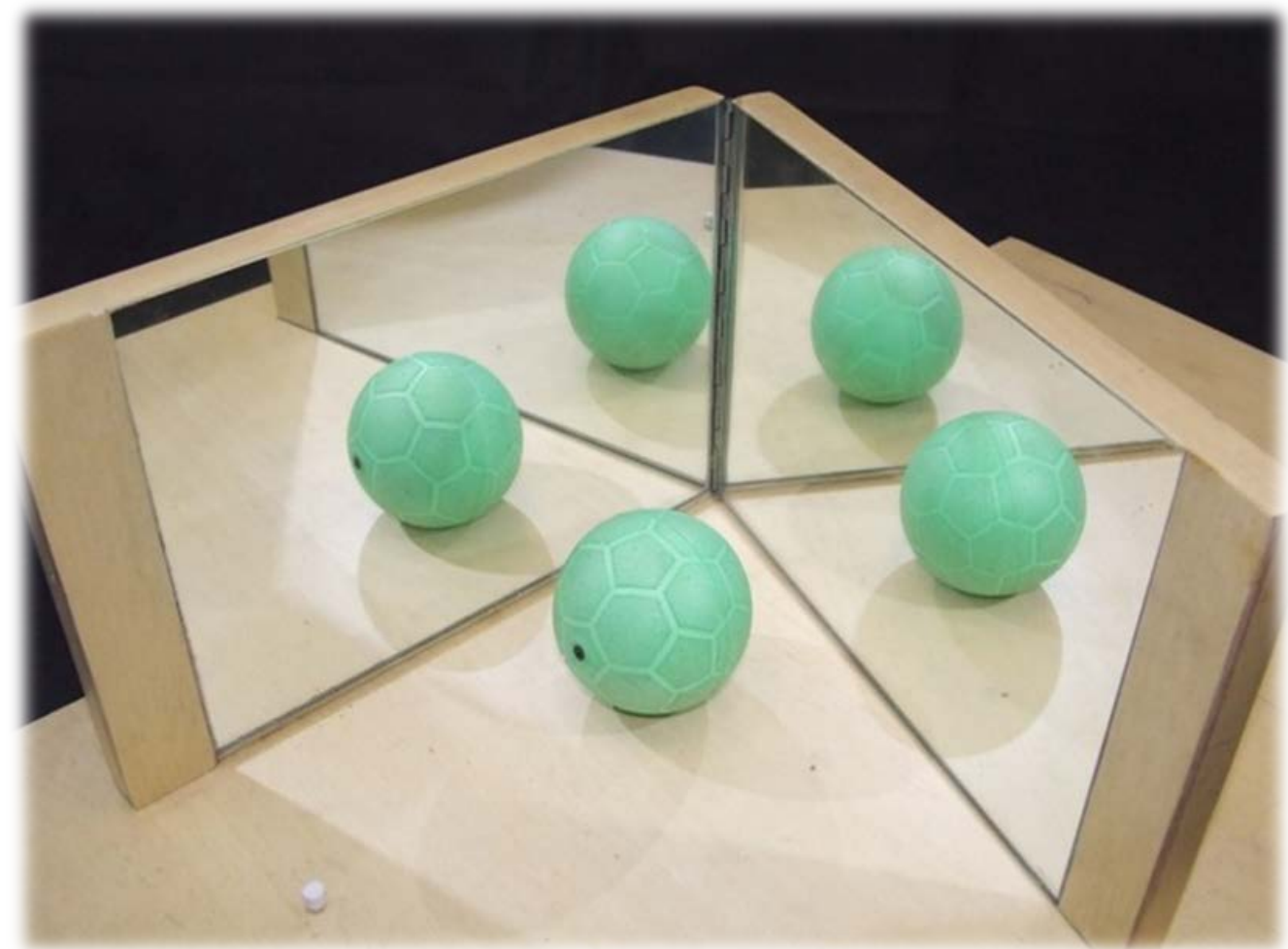




Riflessione

La **riflessione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda che colpisce la superficie di separazione tra due mezzi di propagazione differenti. Incapace di attraversare tale superficie, l'onda viene deviata.

- **ATTENZIONE!** La riflessione si verifica sotto determinate condizioni fisiche!
- Ci concentreremo sulla riflessione delle onde sonore.





Riflessione del suono

Affinché un suono che incontra un ostacolo sia riflesso, è necessario che la sua **lunghezza d'onda** sia molto più piccola dell'ostacolo.

- In ogni caso il suono riflesso perderà una parte della sua energia che dipende dal materiale della superficie con cui si scontra.
- Se in certi ambienti si vuole evitare la riflessione, si ricorre a materiali detti **fonoassorbenti**. Anche se le condizioni per la riflessione sono soddisfatte, la maggior parte dell'energia verrà comunque assorbita.



Riflessione del suono - Implicazioni

Poiché un'onda riflessa torna di norma alla sorgente, se si conosce la velocità v di propagazione è possibile calcolare la **distanza** D di un oggetto dalla sorgente. Infatti il tempo Δt che essa impiega per andare e tornare vale:

$$\Delta t = \frac{2 D}{v}$$

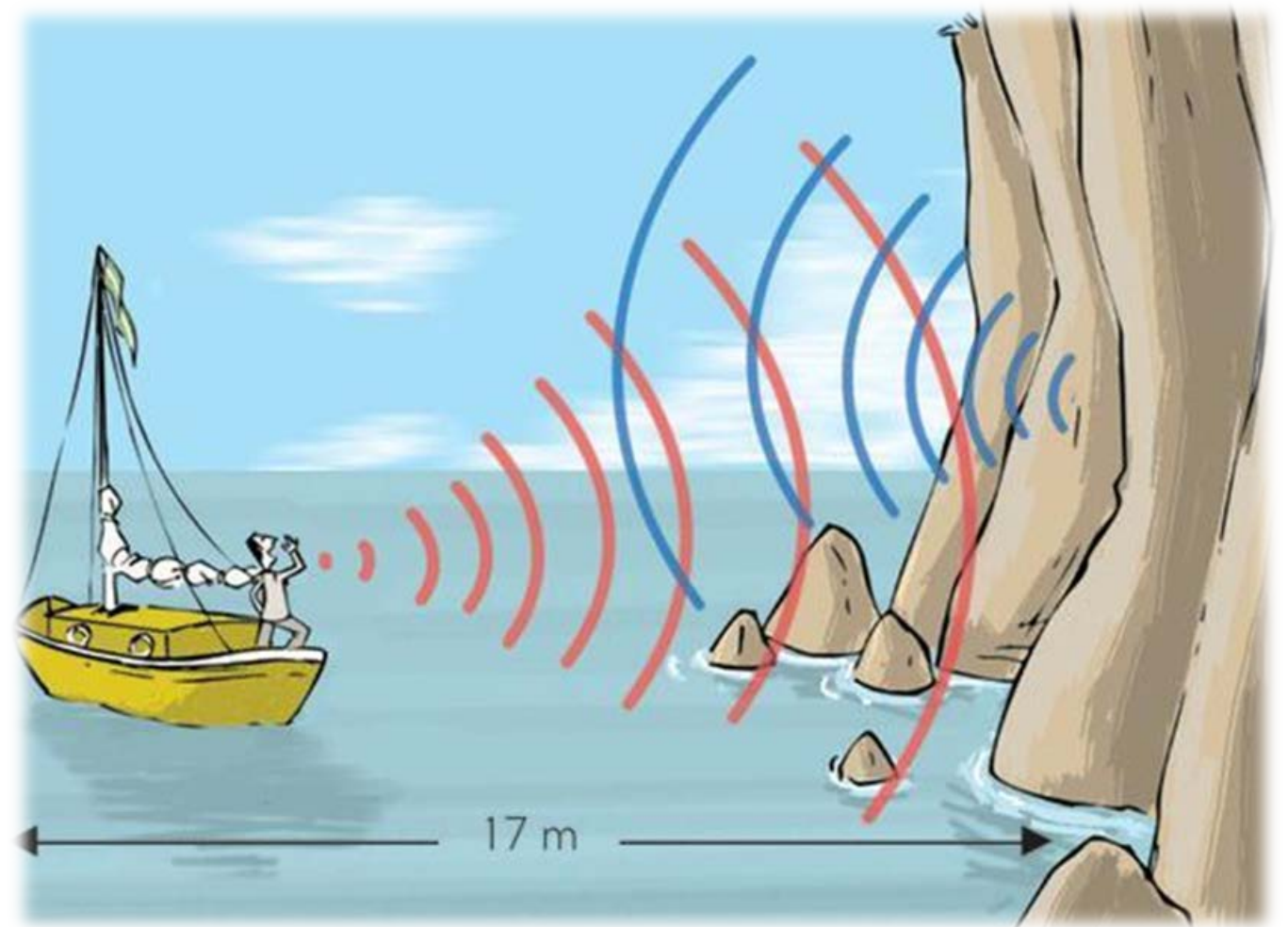
Il funzionamento dei **SONAR** si basa su quest'idea.



Riflessione del suono – Eco

Uno dei fenomeni più noti dovuti alla riflessione è quello **dell'eco**. Esso consiste nella sensazione che un suono emesso da una sorgente in una direzione, venga riemesso dopo un certo tempo da un'altra sorgente nella direzione opposta.

ATTENZIONE! Affinché l'essere umano possa apprezzare l'eco, non basta che l'onda venga riflessa. Serve che la superficie riflettente si trovi ad una certa distanza dalla sorgente!





Riflessione del suono – Eco

Gli esseri umani possono distinguere due suoni differenti solo se questi arrivano all'apparato uditivo a distanza di tempo di almeno **0.1 s**

Ciò significa che:

- Se la superficie riflettente è troppo vicina alla sorgente, non si riuscirà a distinguere tra il suono originale e il suono riflesso.
- Per poter apprezzare l'eco nell'aria a 20 °C è necessario che la superficie riflettente sia ad una distanza D di almeno:

$$D = \frac{v \Delta t}{2}$$

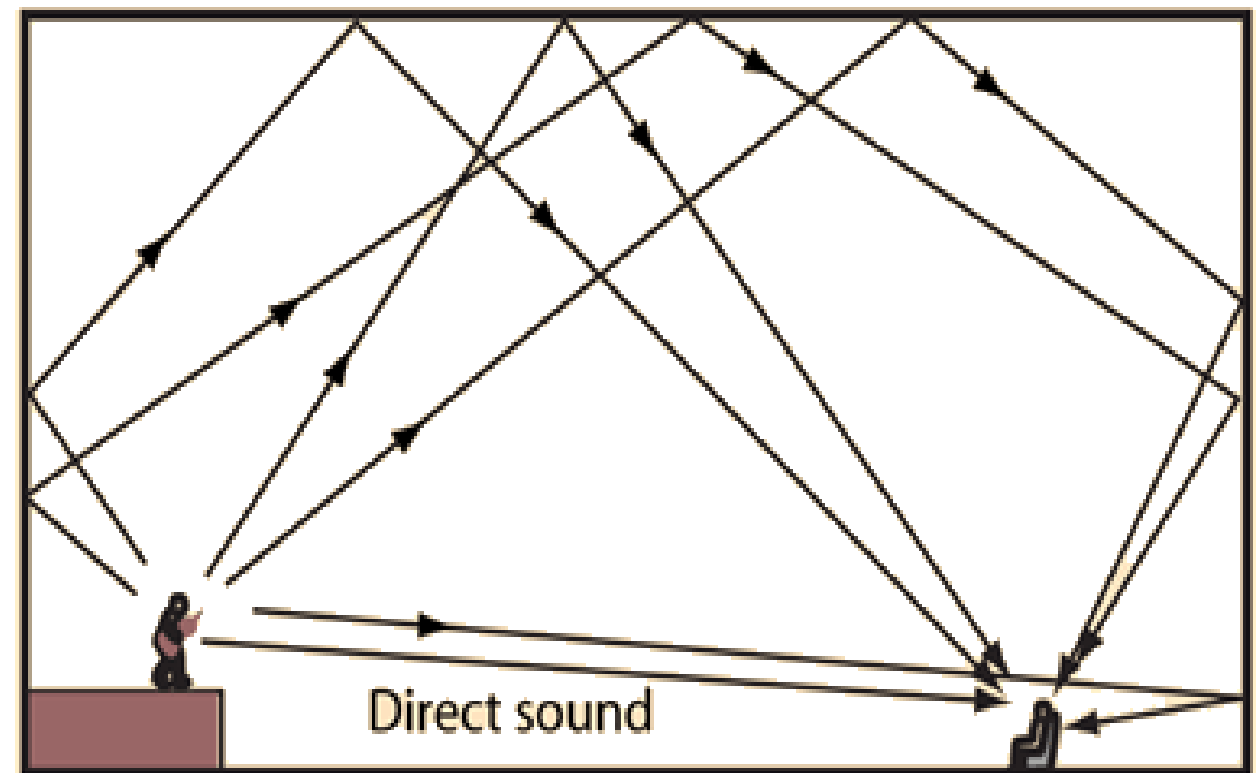
$$D \cong \frac{343 \times 0.1}{2} \cong 17 \text{ m}$$



Riflessione del suono – Riverbero

Se la superficie riflettente è a distanza **inferiore** di **17 m**, il suono originale e il suono riflesso si sovrapporranno. A livello percettivo si avvertirà un aumento di intensità e/o distorsione. Questo fenomeno prende il nome di **riverbero**.

- L'acustica delle sale si ottiene studiando e sfruttando il fenomeno del riverbero;
- In musica spesso si usa il riverbero per arricchire le melodie.

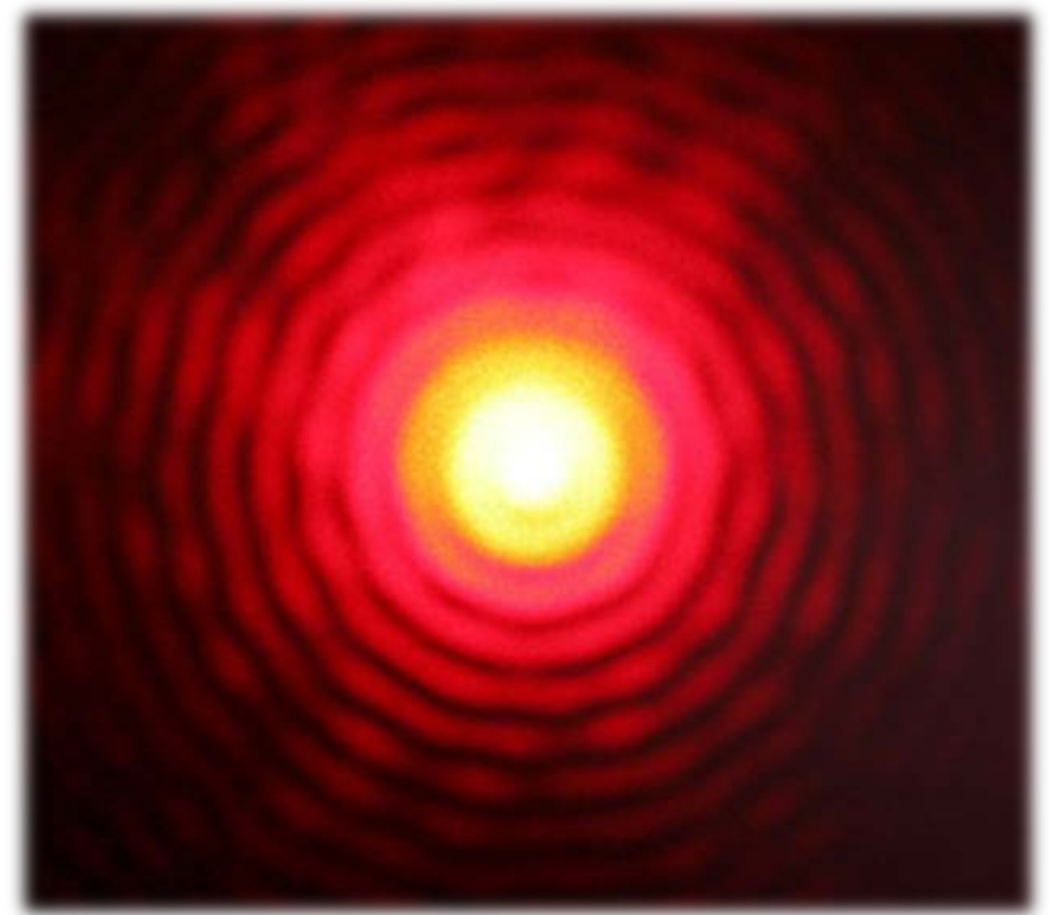




Diffrazione

La **diffrazione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda che incontra un ostacolo. Nel tentare di superarlo l'onda si allarga o si «spezza».

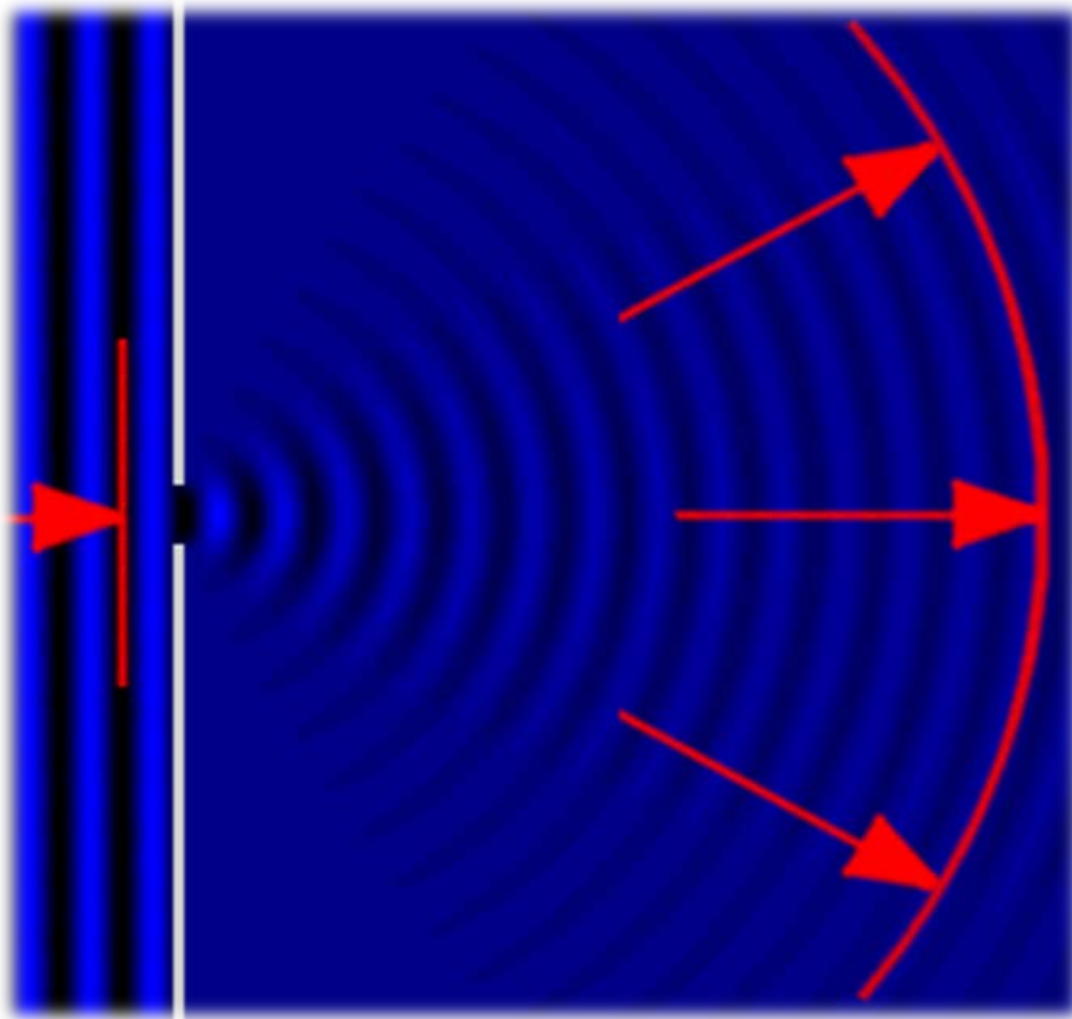
- **ATTENZIONE!** La diffrazione si verifica sotto determinate condizioni fisiche!
- Può essere vista come una un tentativo da parte dell'onda di procedere nella direzione preclusa dall'ostacolo.



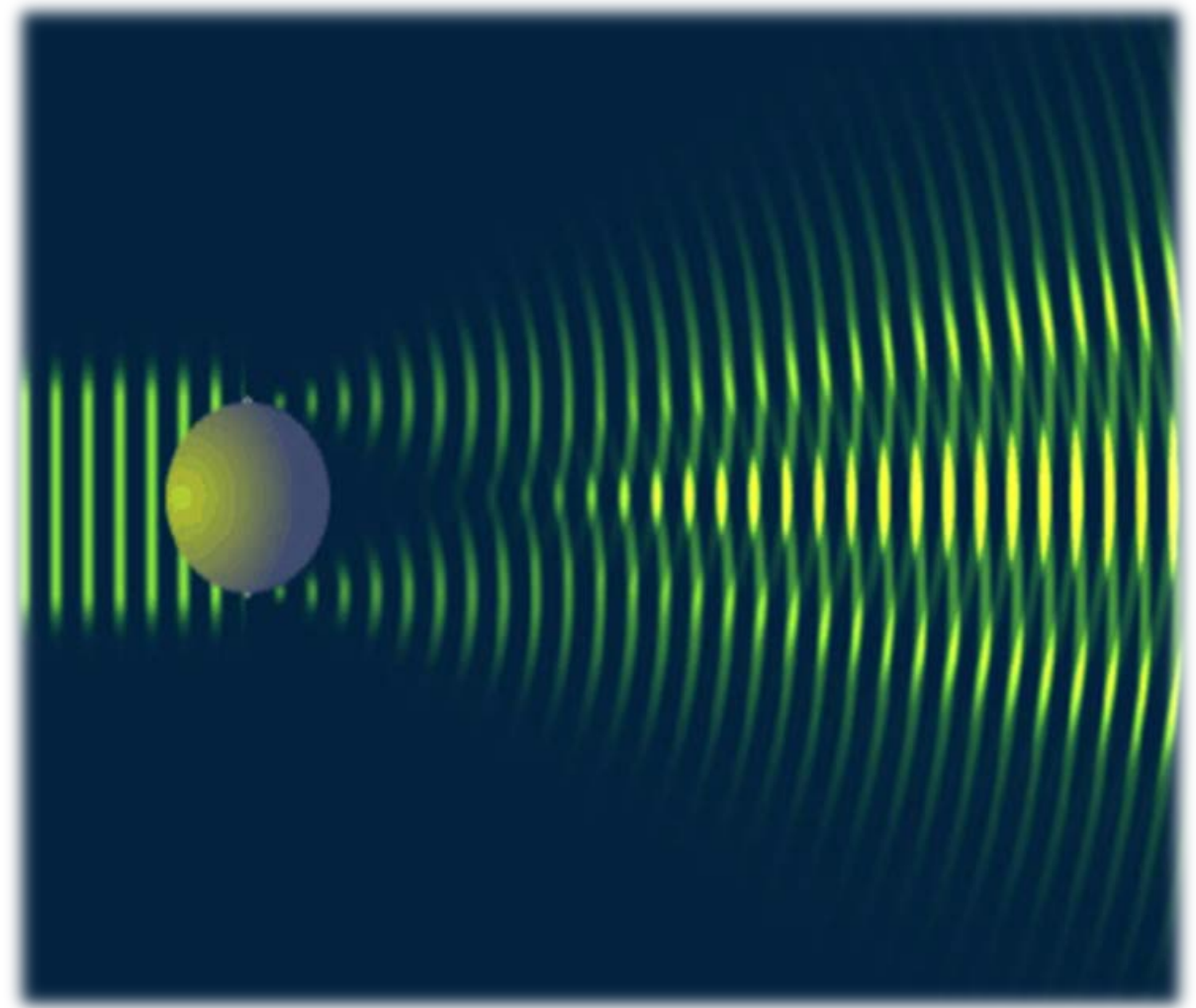


Diffrazione del suono

Affinché un'onda sonora che incontra un ostacolo o una fenditura sia diffratta, è necessario che la sua **lunghezza d'onda** sia molto più grande dell'ostacolo o fenditura.



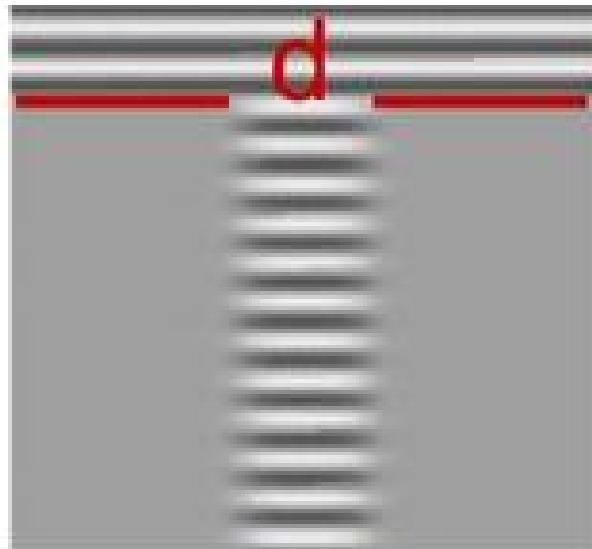
Fenditura



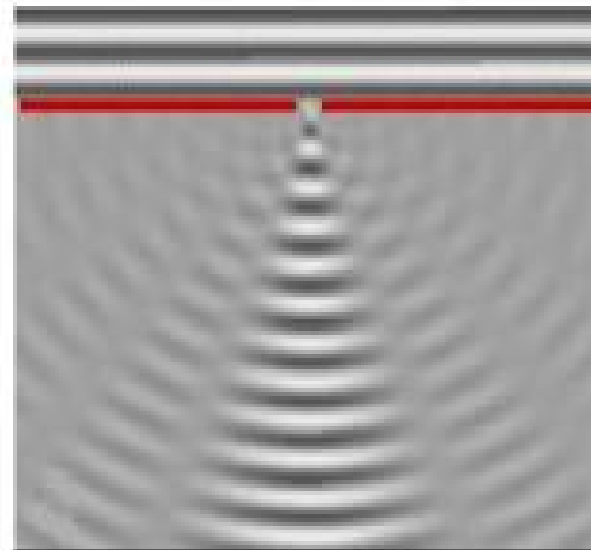
Ostacolo



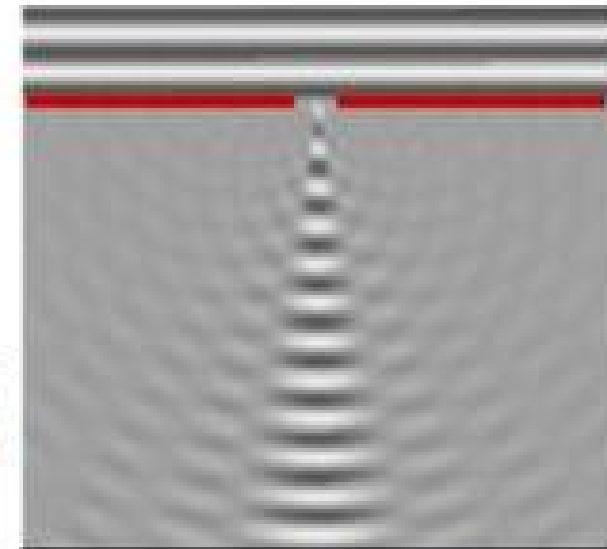
Diffrazione del suono – Esempio



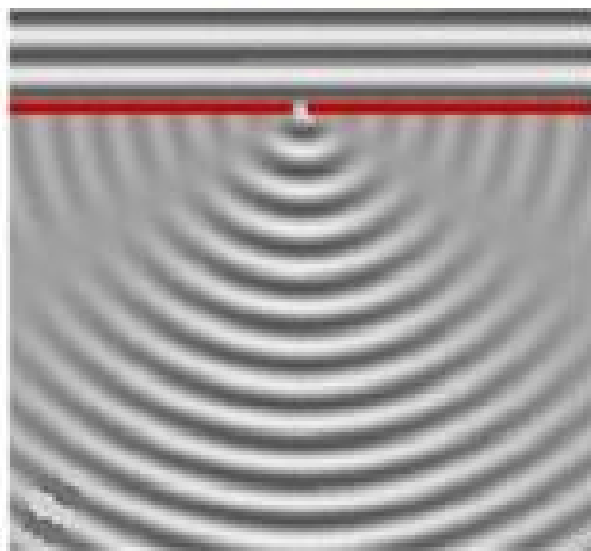
$$d \gg \lambda$$



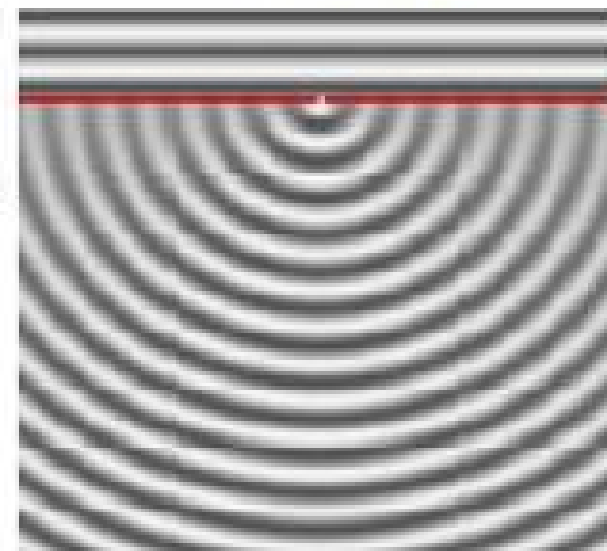
$$d \sim \lambda$$



$$d > \lambda$$



$$d < \lambda$$



$$d \ll \lambda$$



Diffrazione del suono – Fenomeni

I **suoni gravi** o a bassa frequenza aggirano più facilmente gli ostacoli rispetto a **suoni acuti** o alta frequenza. Il motivo è che a frequenze più basse corrispondono **lunghezze d'onda più grandi**, quindi bastano ostacoli piccoli per apprezzare la diffrazione. L'assenza di diffrazione sonora nel caso di lunghezze d'onda troppo piccole rispetto ad un ostacolo prende il nome di **ombra sonora**.

- Per gli esseri umani è quindi più difficile individuare la sorgente di un suono grave. Questo perché tendono ad aggirare la testa pervenendo ad entrambe le orecchie;
- La nostra bocca ha come scopo quello di migliorare la diffusione del suono sfruttando la diffrazione causata dal passaggio da una fenditura.



Frequenza – Variazione delle frequenza percepita

Ricordiamoci che:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{da cui segue} \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

Questo significa che variazioni della lunghezza d'onda o della velocità dell'onda, implicherebbero una variazione della frequenza.

Sappiamo dalla meccanica che se due corpi C_1 e C_2 si muovono ad una certa velocità v_1 e v_2 , la velocità di C_1 **percepita** da C_2 , in generale non sarà v_2 , ma dipenderà anche da v_1 . Possiamo concludere che se la sorgente o il ricevitore dell'onda sonora sono in movimento, allora la velocità da considerare nella relazione sopra non sarà più v !



Frequenza – Effetto Doppler

Attenzione! **Non** significa che la velocità nel mezzo di propagazione cambi ma che, dal punto di vista della sorgente o del ricevitore, bisogna considerare una componente **relativa**. Di conseguenza anche la **frequenza percepita** dal ricevitore sarà in generale diversa. Il fenomeno prende il nome di **Effetto Doppler**.

In particolare, sia f_0 la frequenza reale, v la velocità dell'onda nel mezzo, v_s la velocità della sorgente e v_r la velocità del ricevitore, allora la frequenza f effettivamente percepita sarà:

$$f = \left(\frac{v - v_r}{v - v_s} \right) f_0$$



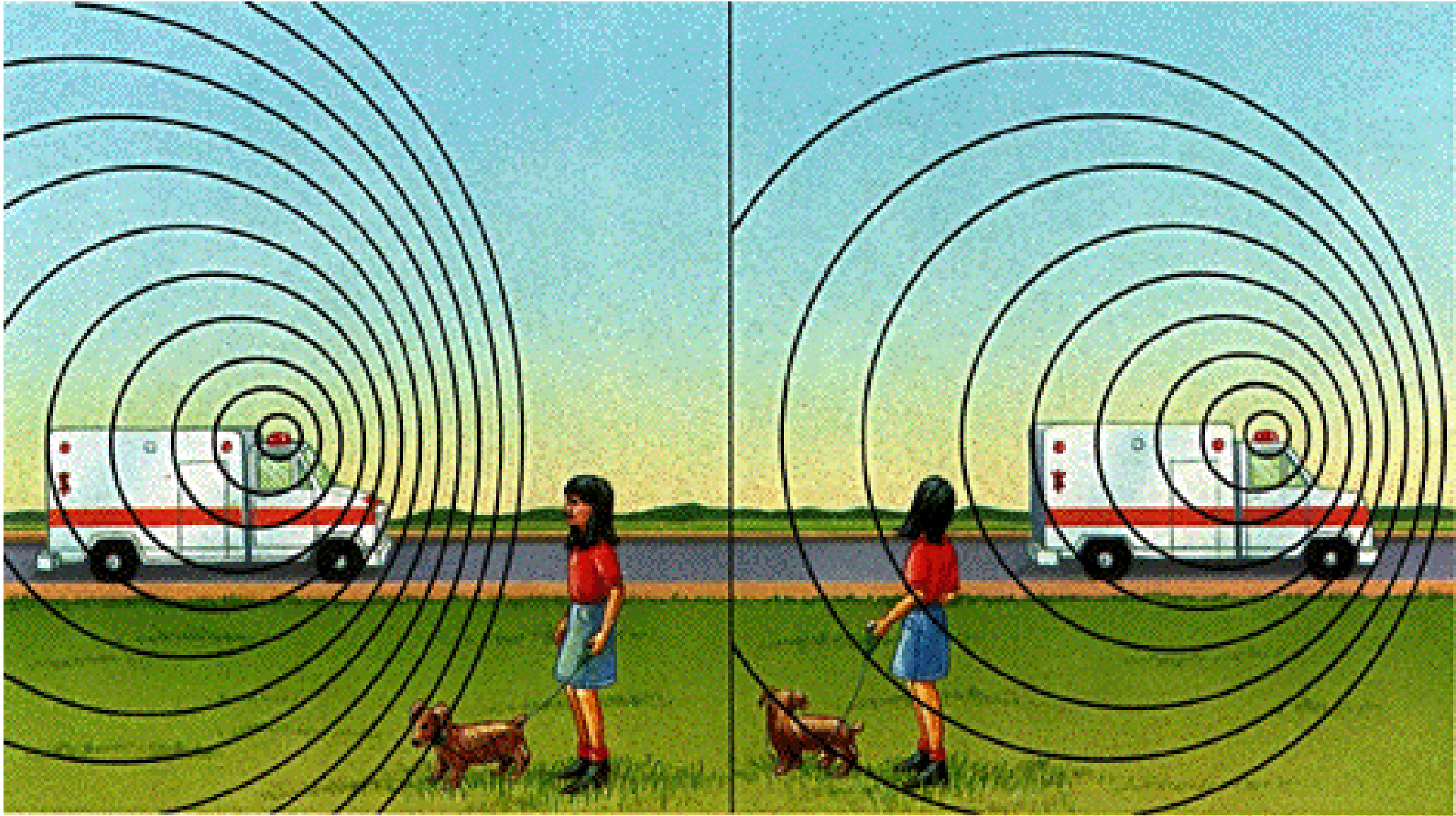
Frequenza – Formula effetto doppler

Nota bene:

- Nella formula vista, il segno di v_s e v_r sarà positivo se il verso sarà lo stesso di v , negativo altrimenti;
- La formula vale solo per valori di v_s e v_r che non azzerino il denominatore e non diano luogo a frequenze negative.
- Se il denominatore si azzerà, $v = v_s$, cioè la sorgente segue l'onda sonora emettendo oscillazioni sovrapposte che giungeranno tutte in una volta al ricevitore (Bang supersonico).
- Se v_s supera v , allora le oscillazioni emesse dalla sorgente arriveranno all'ascoltatore in ordine inverso. Questo accade perché le oscillazioni emesse saranno superate dalla sorgente stessa.



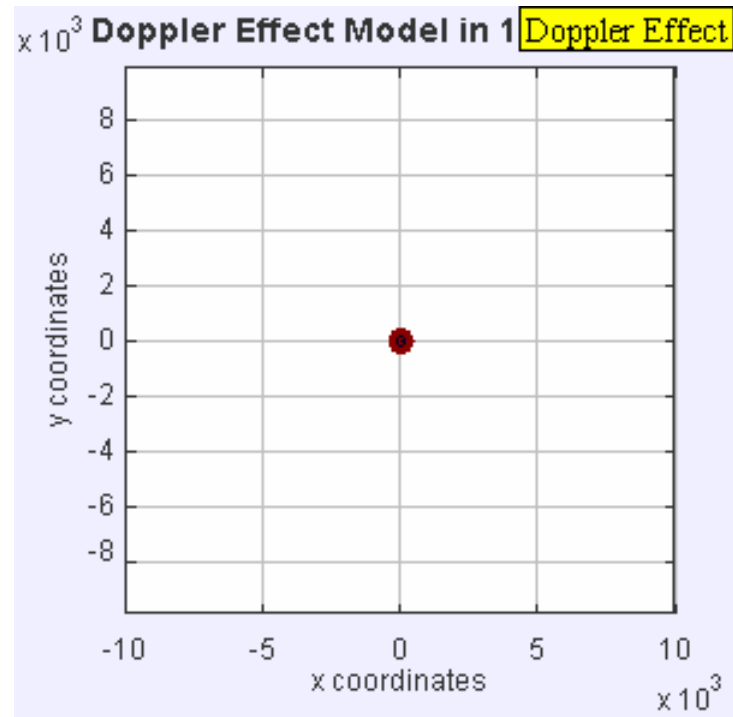
Effetto Doppler – Esempi



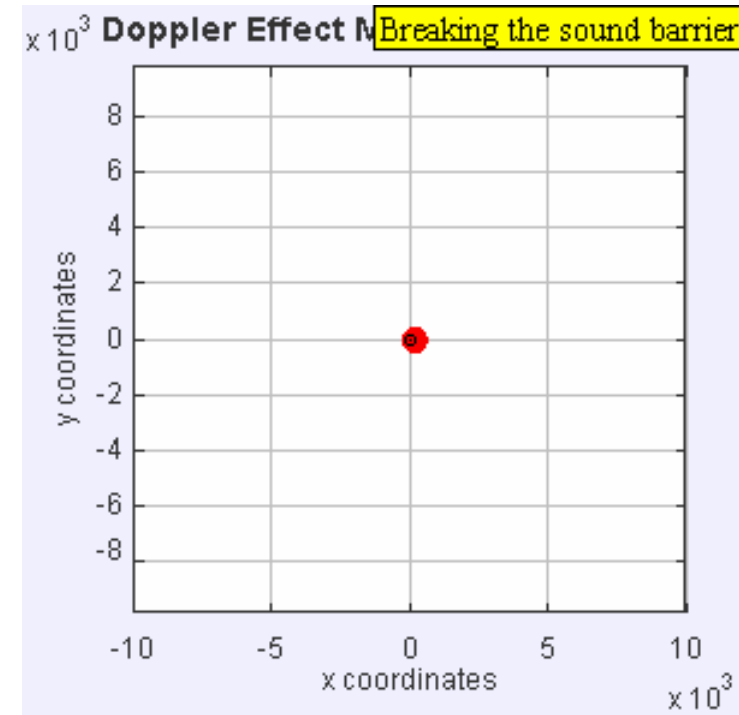
Le sirene vengono udite ad una frequenza più alta quando ci vengono incontro, e ad una frequenza più bassa quando si allontanano.



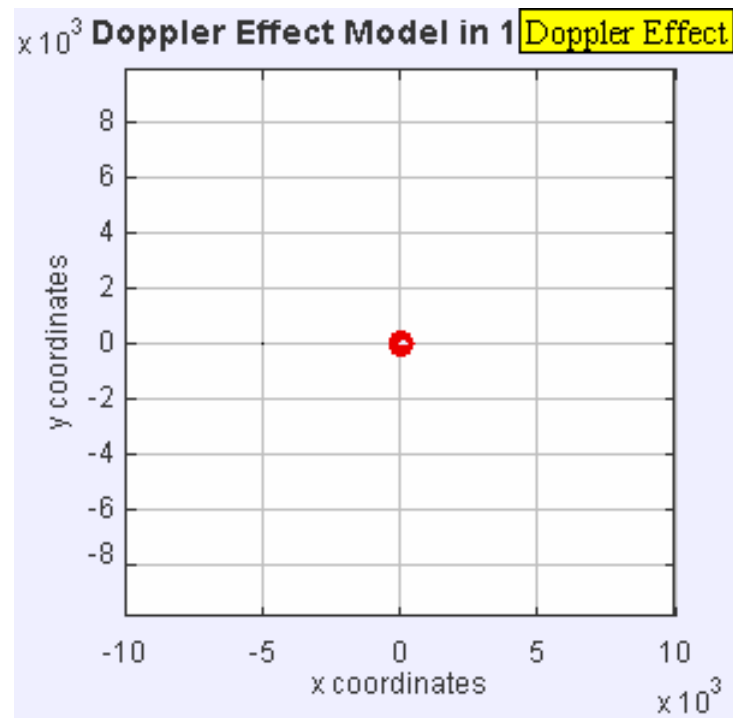
Effetto Doppler – Esempi



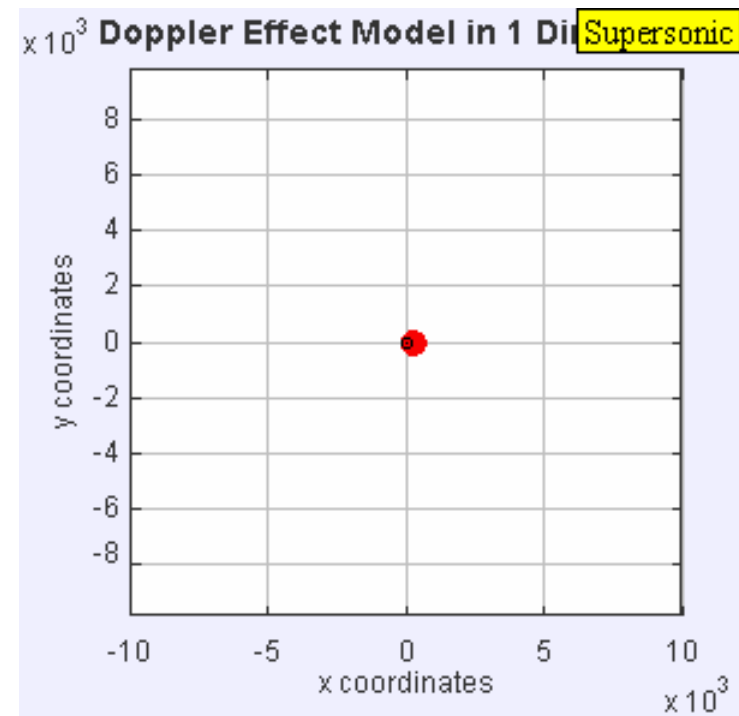
Sorgente
Ferma



Sorgente a
velocità del
suono



Sorgente a
velocità
inferiore a
quella del
suono.



Sorgente a
velocità
superiore al
suono



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**.



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 $25 \mu\text{Pa}$. 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
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.



Ampiezza – Inviluppo

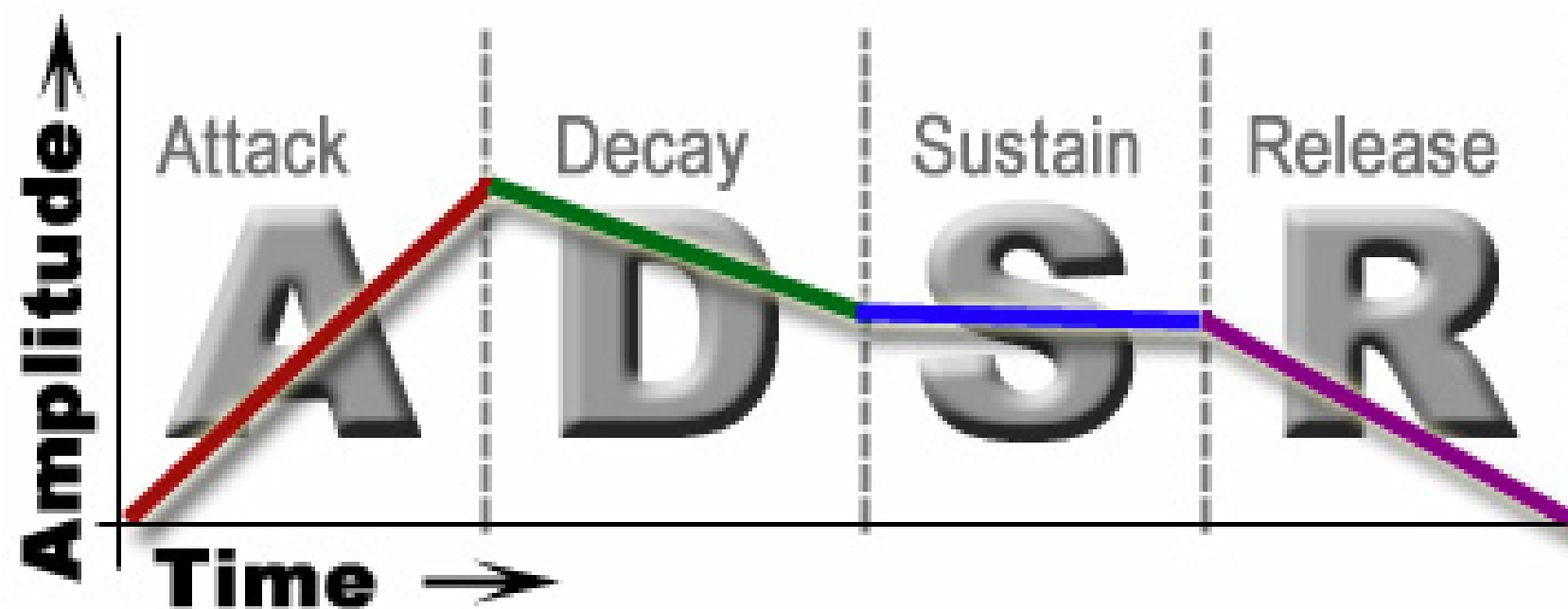
- Normalmente un suono inizia in un certo istante di tempo e termina in un altro. Prima e dopo troviamo silenzio.
- Come si comporta il volume di un suono durante il suo tempo di vita?
- In generale la variazione dell'ampiezza segue un certo andamento, detto **inviluppo**.



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 – Involuppo 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.



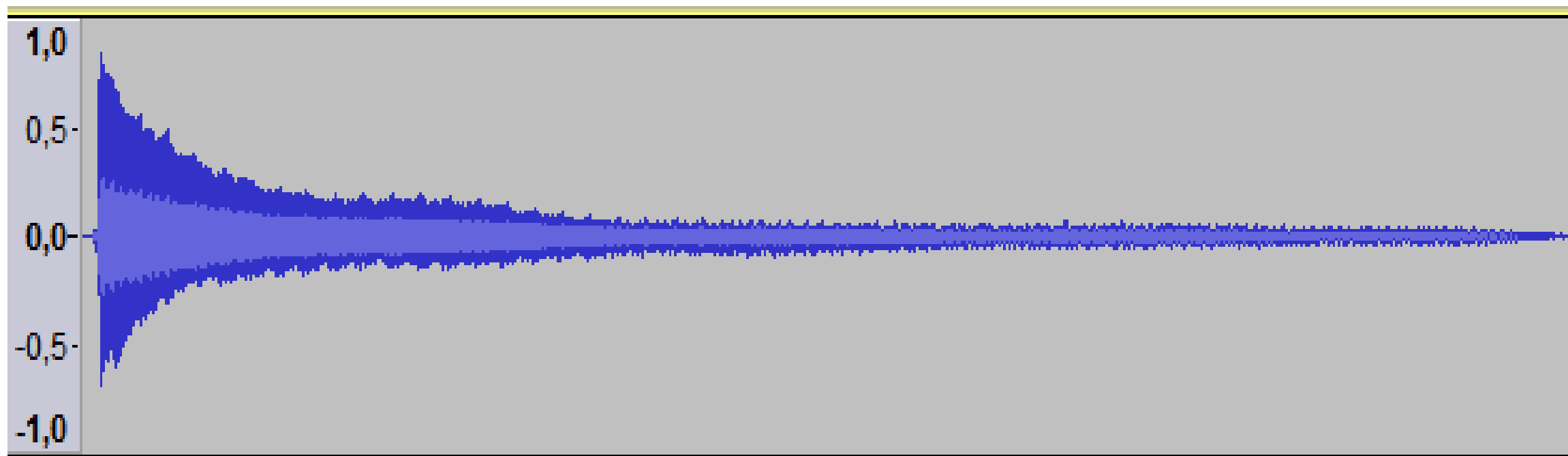
Ampiezza – Inviluppo ADSR



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



Ampiezza – Esempio inviluppo

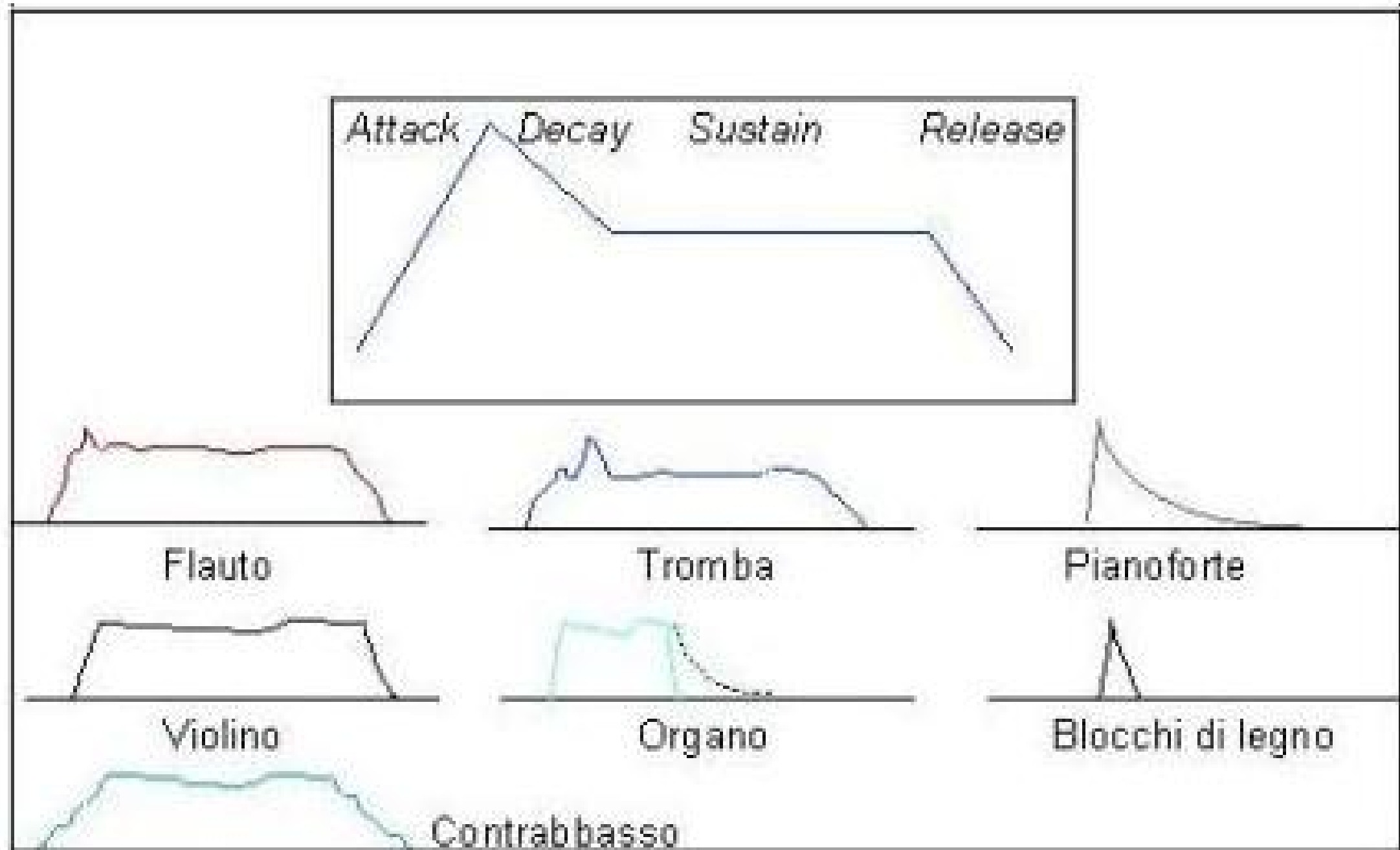


VEDI
FILE
AUDIO

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.



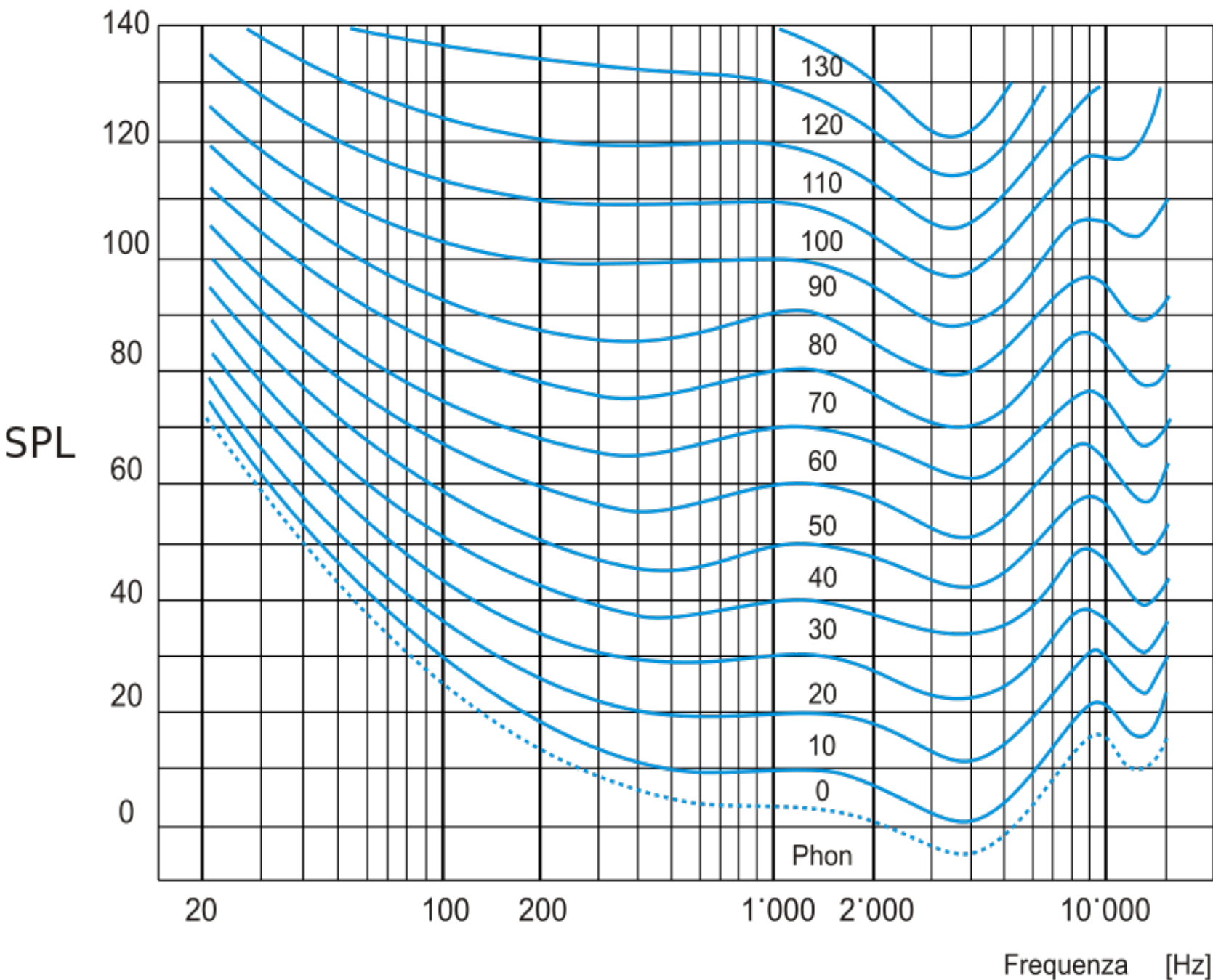
Ampiezza – Curve isofoniche

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.



Spettro

Lo **spettro** di un suono ne caratterizza il **timbro**, ossia quell'insieme di proprietà che determinano la distinzione tra due suoni anche a parità di ampiezza e frequenza.

Quindi la voce umana, una chitarra e un pianoforte avranno un **timbro** diverso. Infatti anche emettendo la stessa nota, questi possono essere distinti con facilità.

La caratterizzazione è data dal numero e dal contributo delle varie frequenze nello spettro (diverse da quella principale). Il timbro può essere usato per identificare il tipo della sorgente sonora.



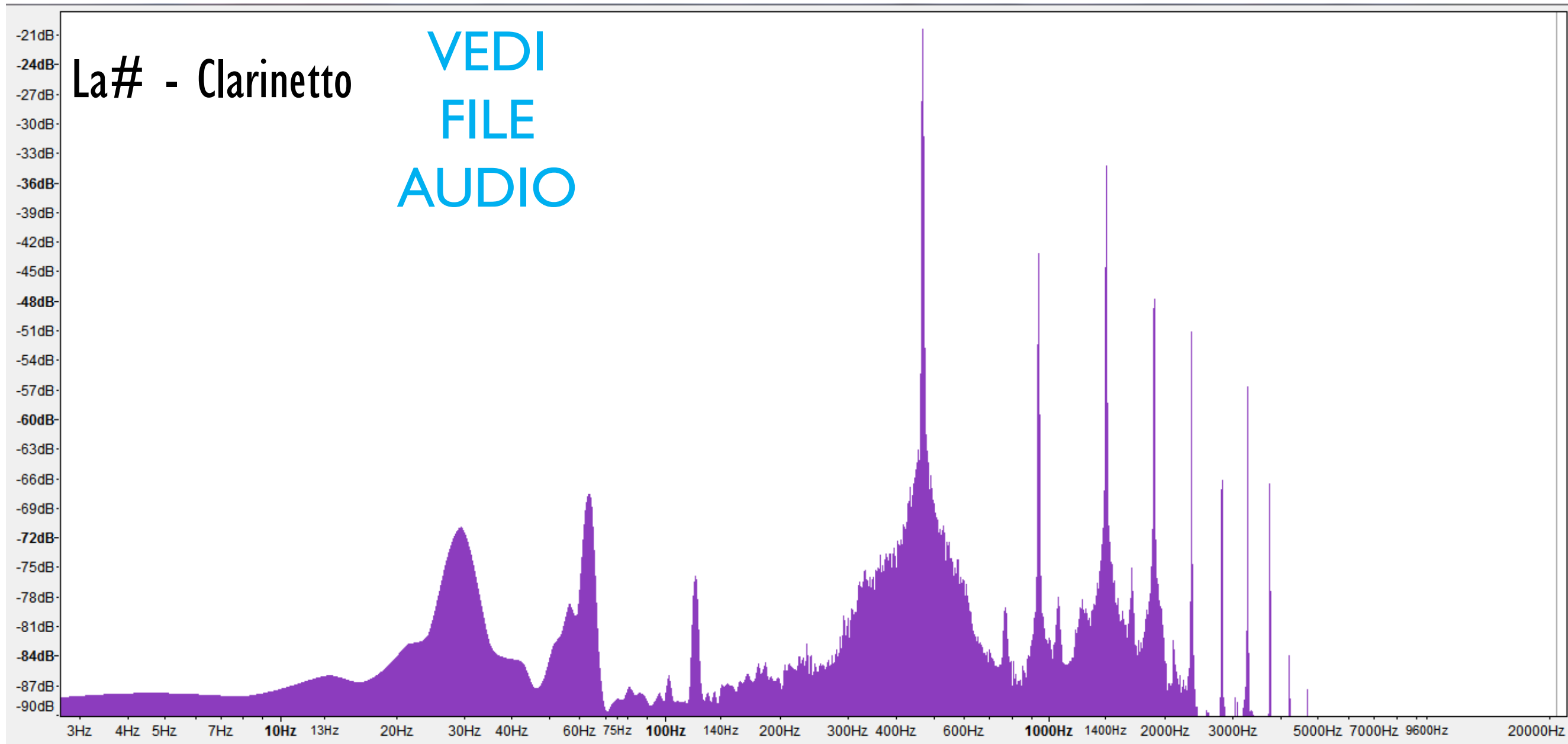
Spettro - Esempi

Ricordiamo che lo spettro è molto utile per la descrizione di suoni **complessi**. Tutti i fenomeni visti che interessano frequenza, ampiezza e lunghezza d'onda, continuano a valere. Ovviamente si applicheranno alle singole componenti.

Ad esempio la **diffrazione** si verificherà comunque, interessando maggiormente le lunghezze d'onda più grandi e meno quelle più piccole, producendo difatti una distorsione.



Spettro - Esempi

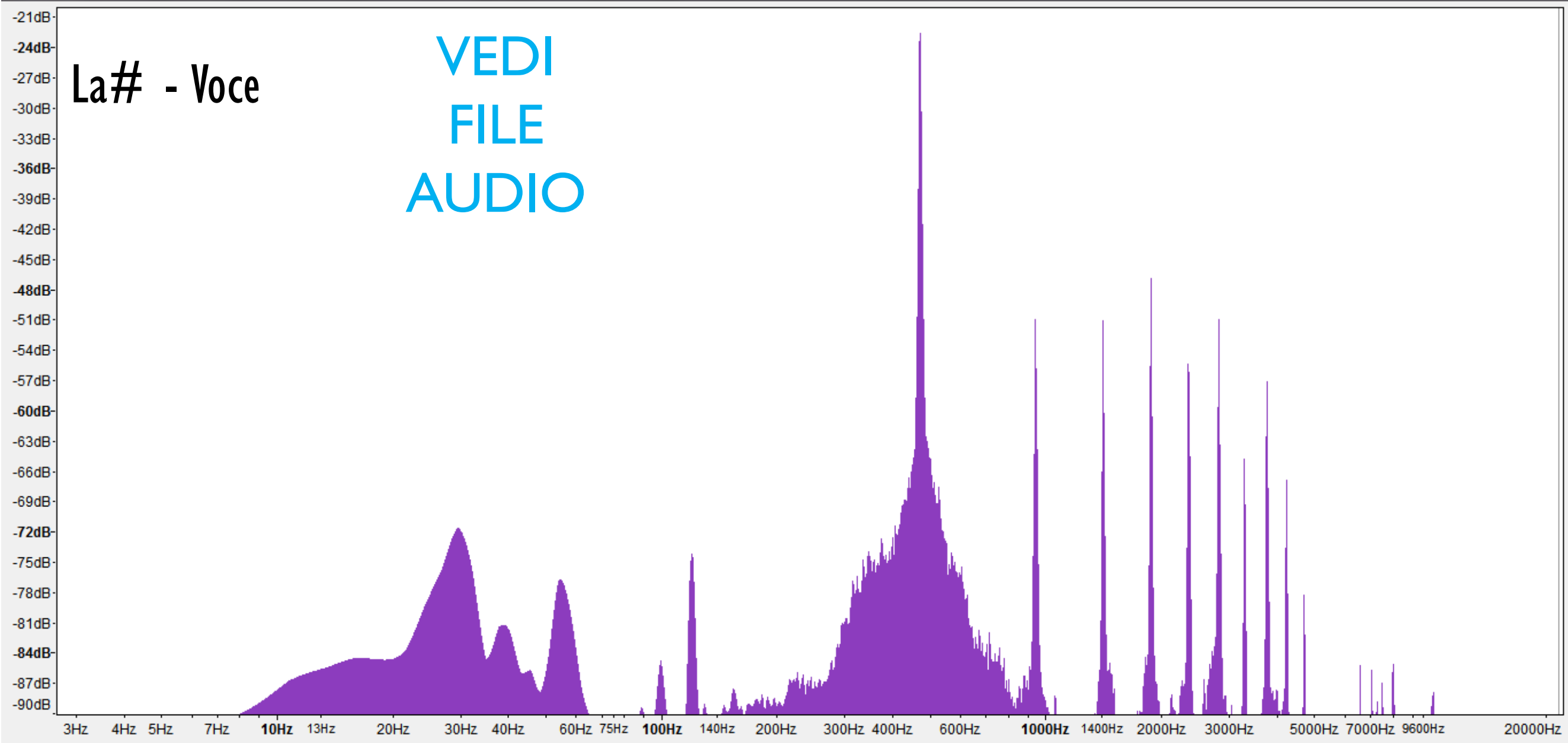




Spettro - Esempi

La# - Voce

VEDI
FILE
AUDIO





Spettro – Rumori colorati

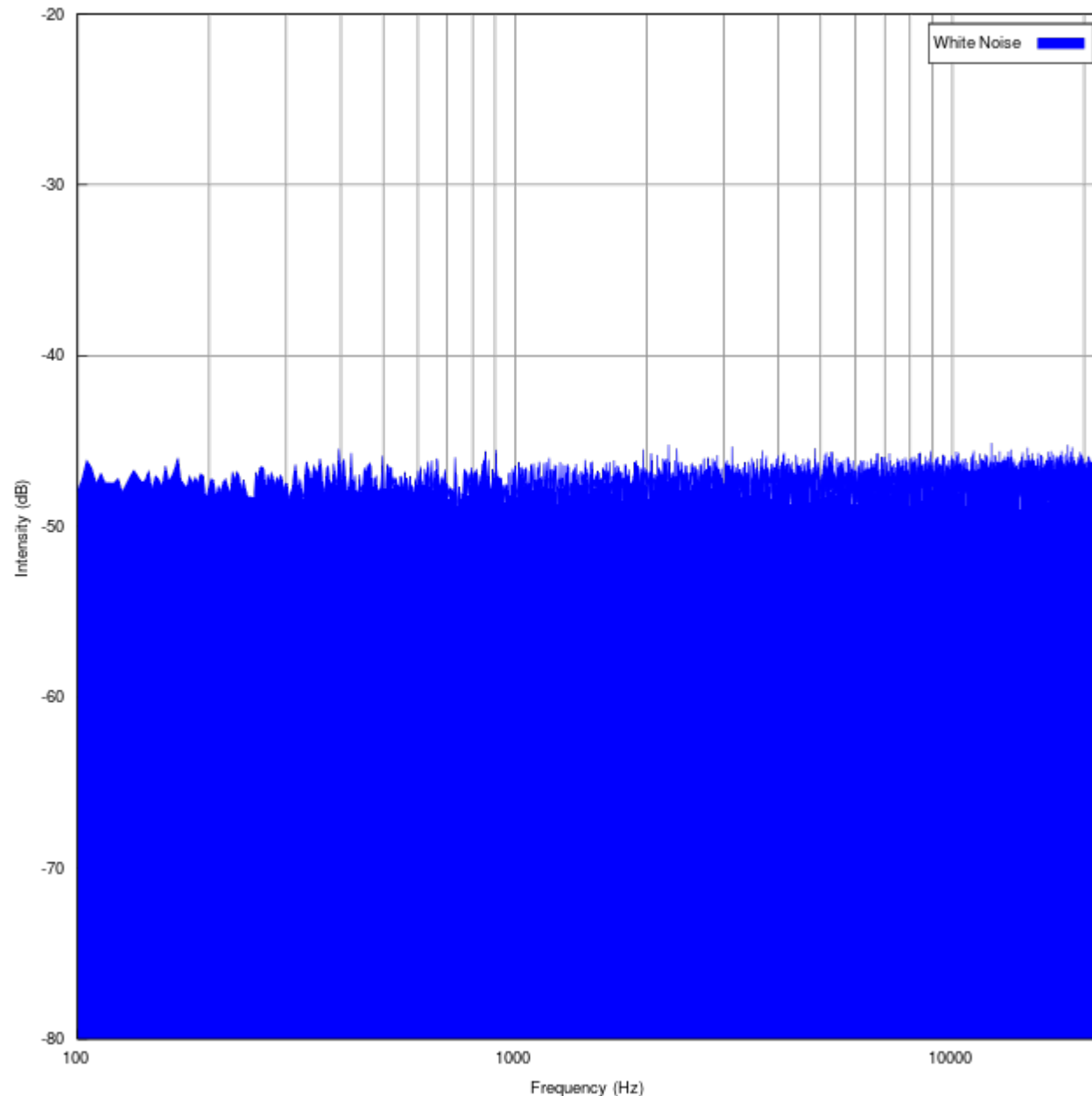
Il **rumore** in generale, è un segnale non desiderato e imprevedibile, che sommandosi ad altri segnali, li distorce in maniera più o meno grave. Poiché nella maggior parte dei casi non è voluto, si cerca di attenuarlo il più possibile.

Tuttavia nell'acustica, esistono particolari onde sonore, con uno **spettro** ben noto che vengono chiamati *rumori*, ma solo perché caratterizzati da una componente *aleatoria*. In realtà questi *rumori* vengono studiati e utilizzati in maniera vantaggiosa. Vedremo il **rumore: bianco, rosa, marrone, blu, viola e grigio.**



Rumore bianco

VEDI
FILE
AUDIO

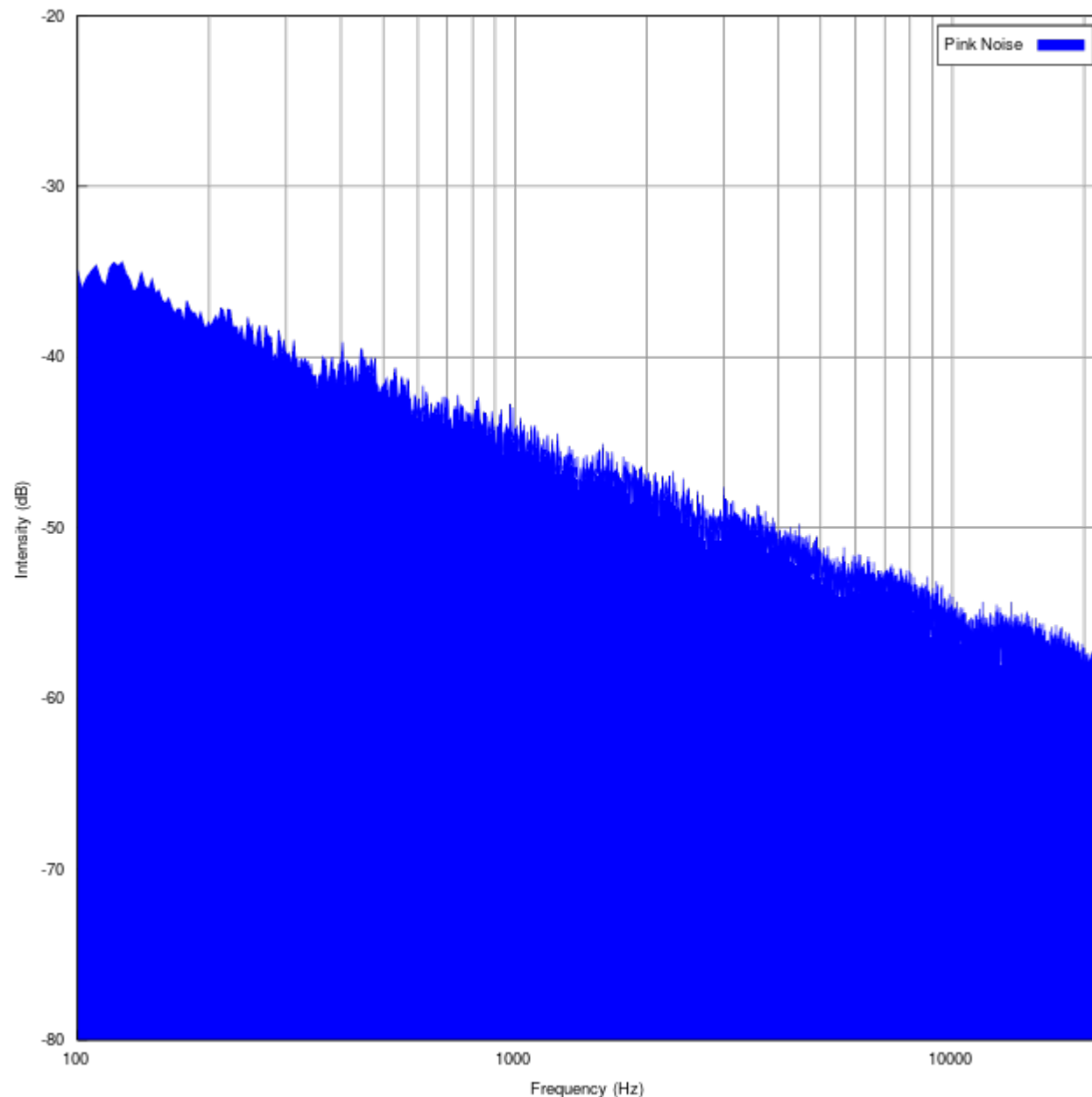


- Caratterizzato da valori di ampiezza del tutto casuali rispetto al tempo, e costanti rispetto alle frequenze (solo idealmente). **I valori seguono una legge di probabilità uniforme.**
- Esiste solo teoricamente, ma può essere approssimato digitalmente o osservando fenomeni naturali aleatori.
- Usi: test per la risposta in frequenza dei sistemi acustici, generazione di numeri casuali, rilassamento.



Rumore rosa

VEDI
FILE
AUDIO

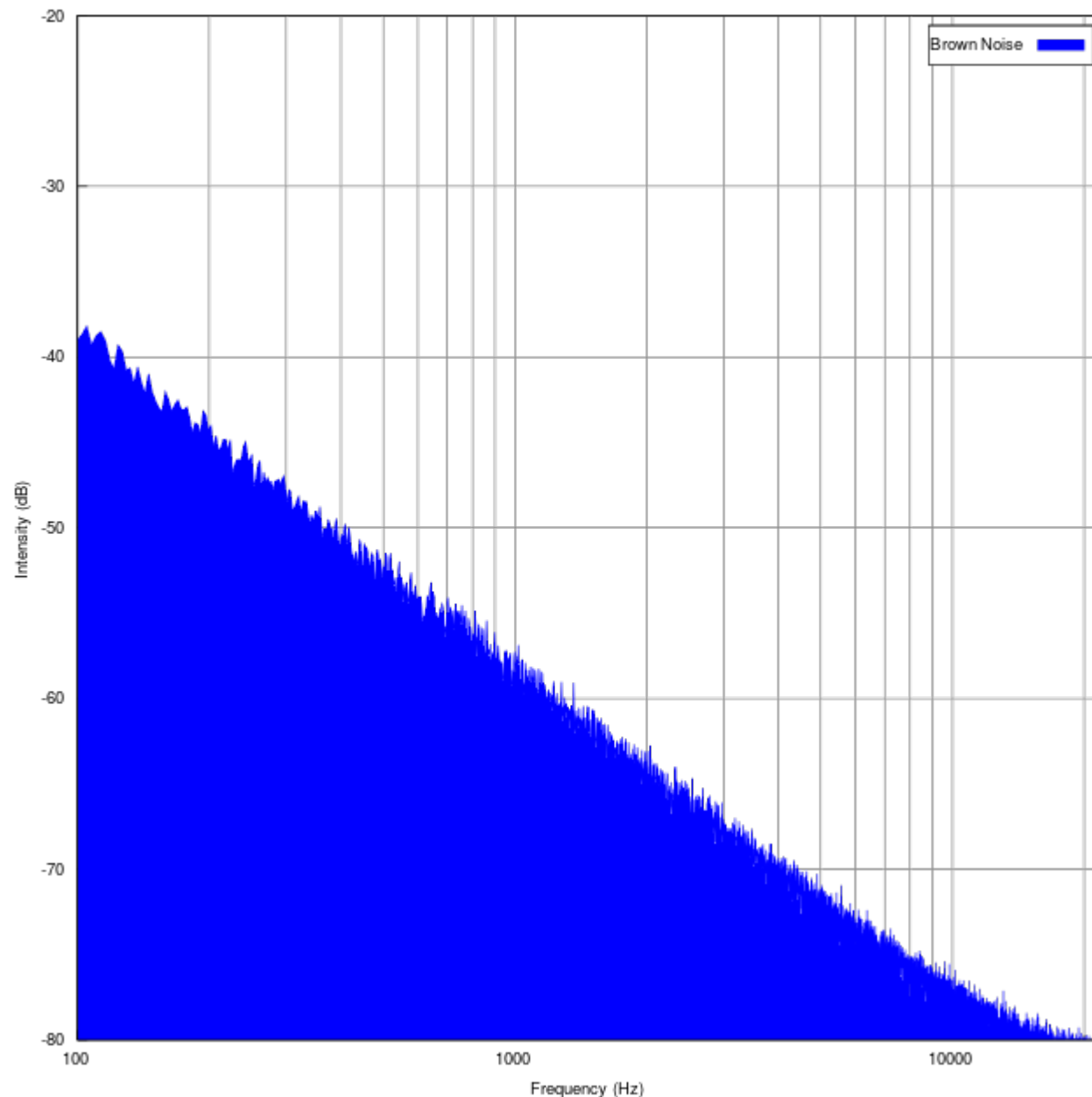


- Lo spettro presenta una relazione inversamente proporzionale tra frequenza e ampiezza.
- In particolare l'intensità si dimezza quando raddoppia la frequenza. Questo corrisponde ad un **decremento di 3 dB per ottava**.
- Generato da fenomeni naturali, a livello acustico ricorda il suono della pioggia. Viene usato come modello per l'equalizzazione della musica, cioè per amplificare maggiormente frequenze più basse e meno le alte.



Rumore marrone

VEDI
FILE
AUDIO

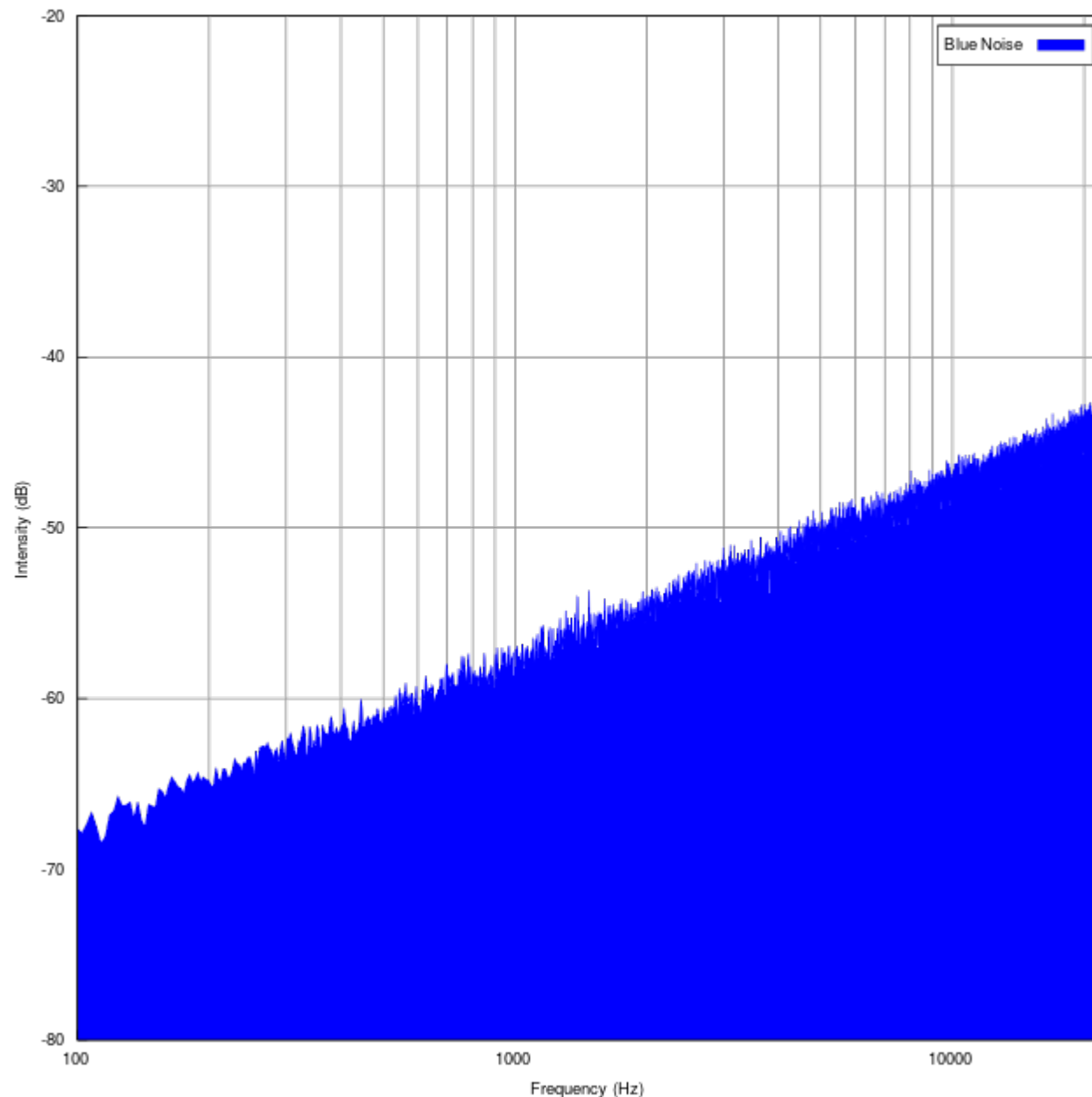


- Come il rumore rosa lo spettro presenta un relazione inversamente proporzionale tra frequenza e ampiezza.
- L'intensità si riduce però di un quarto quando raddoppia la frequenza. Questo corrisponde ad un **decremento di 6 dB per ottava**. Il decremento è quindi più rapido rispetto al rumore rosa.
- Segue la legge del moto Browniano delle particelle di un fluido. Ricorda il fragore delle cascate d'acqua.



Rumore blu

VEDI
FILE
AUDIO

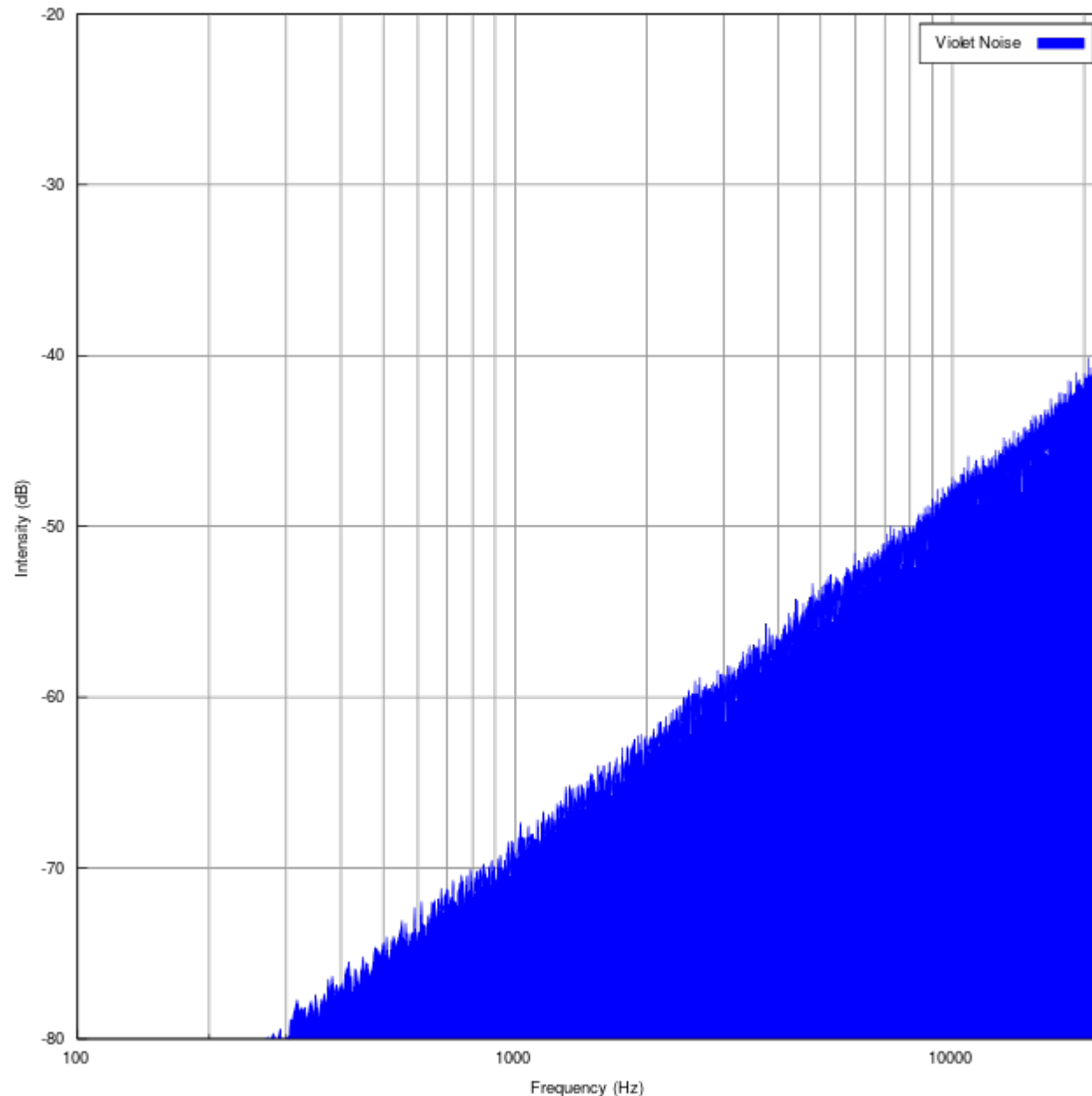


- Lo spettro presenta una relazione direttamente proporzionale tra frequenza e ampiezza.
- In particolare si ha un **incremento di 3 dB per ottava**. E' quindi speculare al rumore rosa.
- Un rumore casuale con questo spettro è adatto al Dithering, un processo di riduzione della distorsione introdotta dalla *riquantizzazione*.



Rumore viola

VEDI
FILE
AUDIO

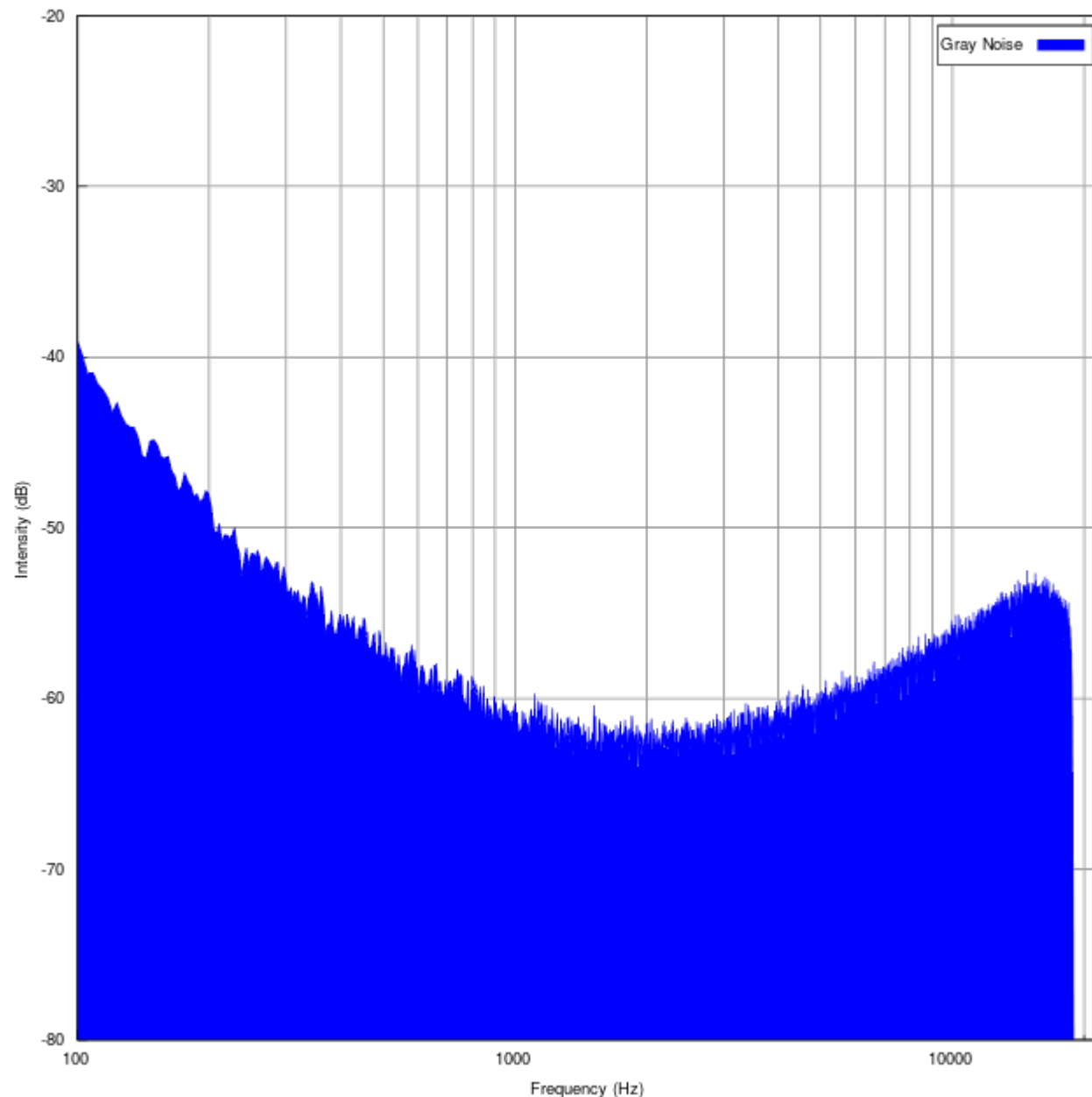


- Come nel rumore blu lo spettro presenta un crescita in intensità all'aumentare della frequenza.
- Si ha un **incremento di 6 dB per ottava**, più grande rispetto al rumore blu. E' speculare al rumore marrone.
- Il rumore viola è un segnale adatto al trattamento degli acufeni (disturbi uditivi). Il suono prodotto ricorda quello di un getto di vapore.



Rumore grigio

VEDI
FILE
AUDIO



- Caratterizzato da valori di ampiezza del tutto casuali come tutti gli altri rumori.
- Lo spettro segue esattamente le curve isofoniche. Viene utilizzato per equalizzare i segnali audio in modo tale che tutte le frequenze vengano percepite allo stesso volume da parte di un ascoltatore umano.