



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

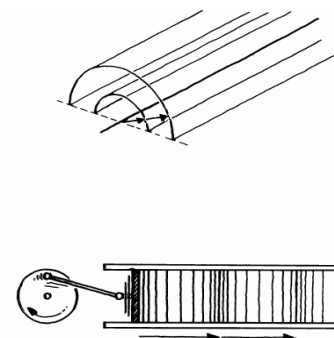
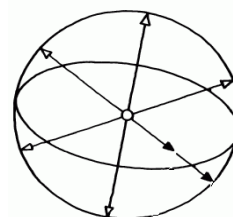
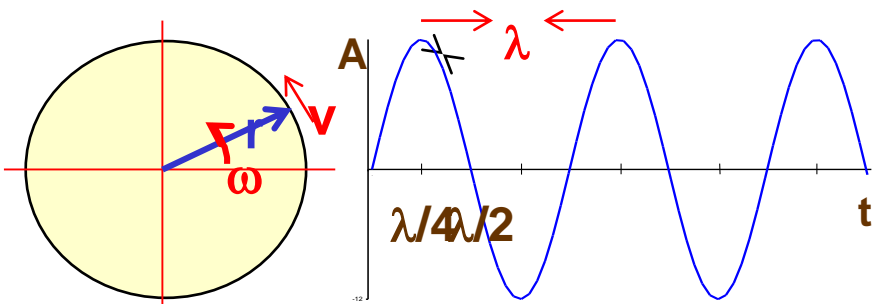
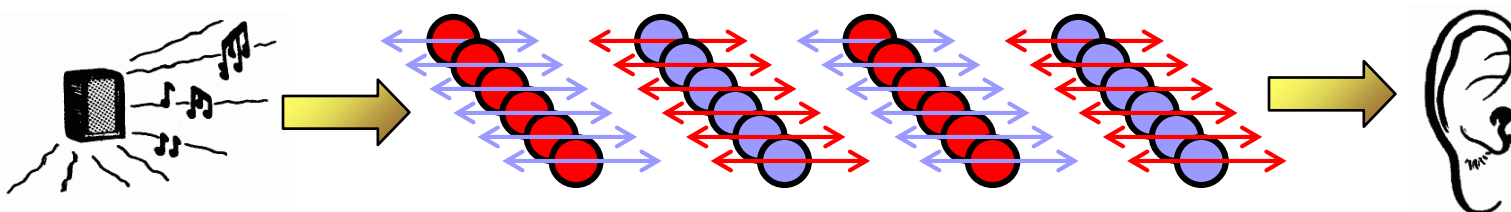
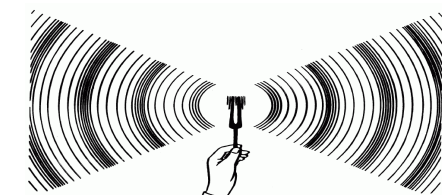
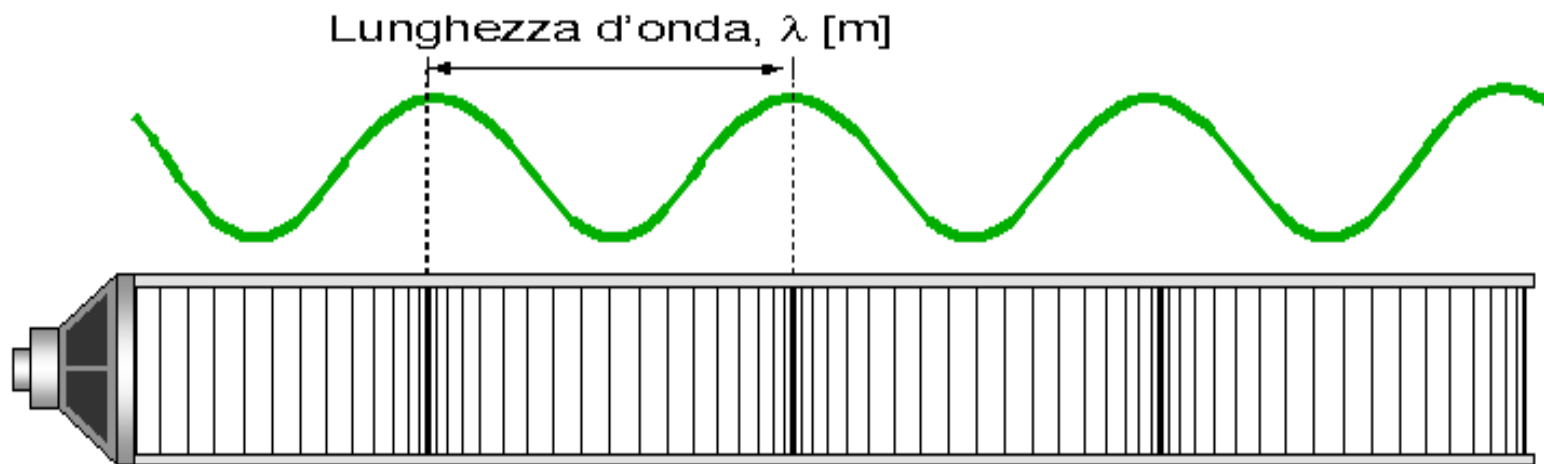
**PROGRAMMA DEL CORSO
INTRODUZIONE E SUGGERIMENTI
SISTEMA INTERNAZIONALE**

Docente: Paolo Guidorzi

L'acustica

1. Acustica fisica

La pressione acustica. Onde acustiche nei mezzi elastici. Cenni sull'equazione delle onde. La velocità del suono. Generazione dell'onda sonora. La lunghezza d'onda. Tipi di onde acustiche. Pressione efficace. Potenza, Intensità e Impedenza.

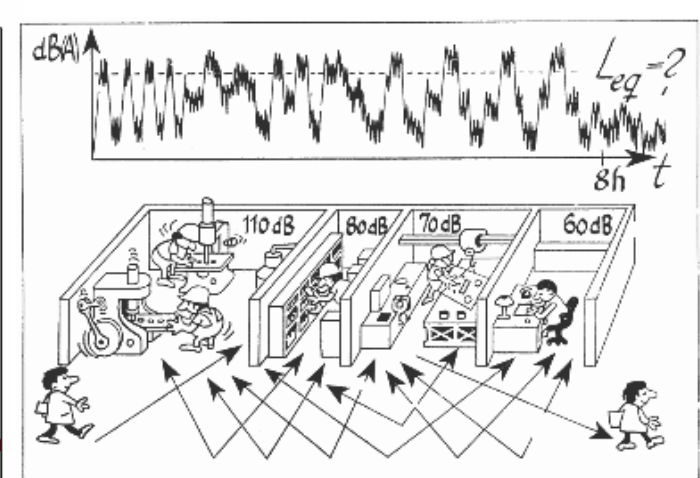
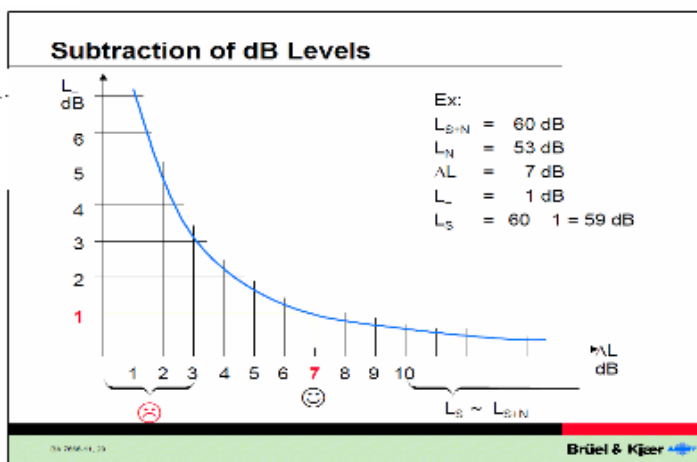
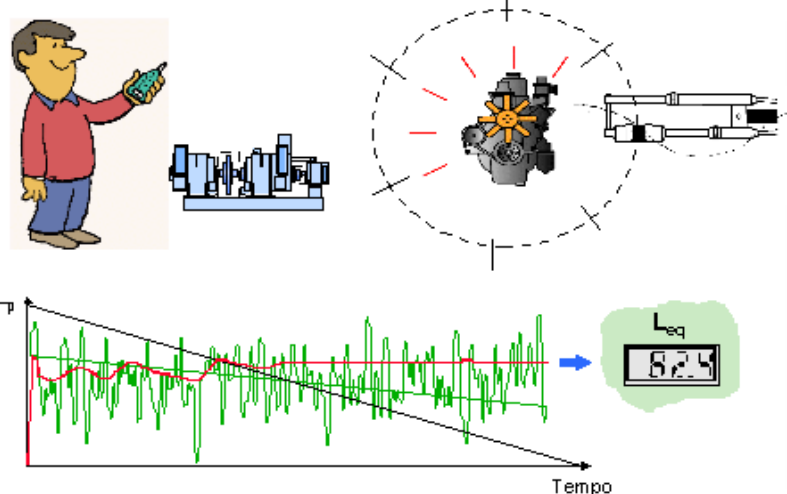
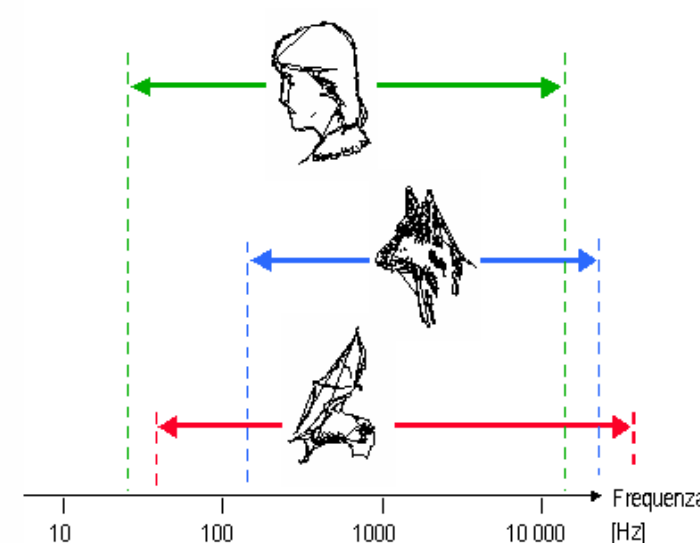
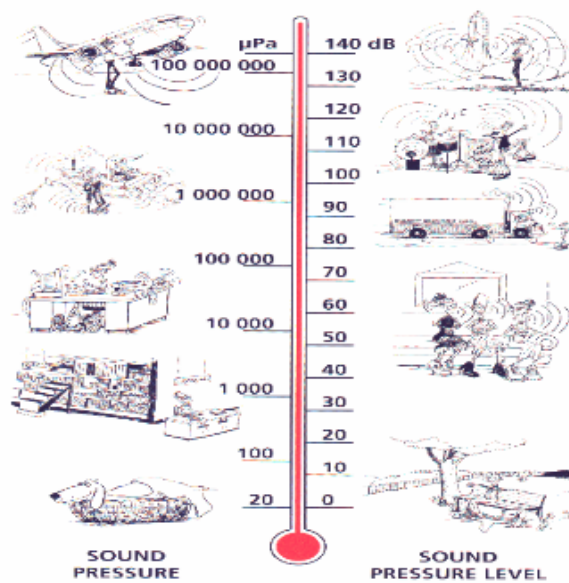
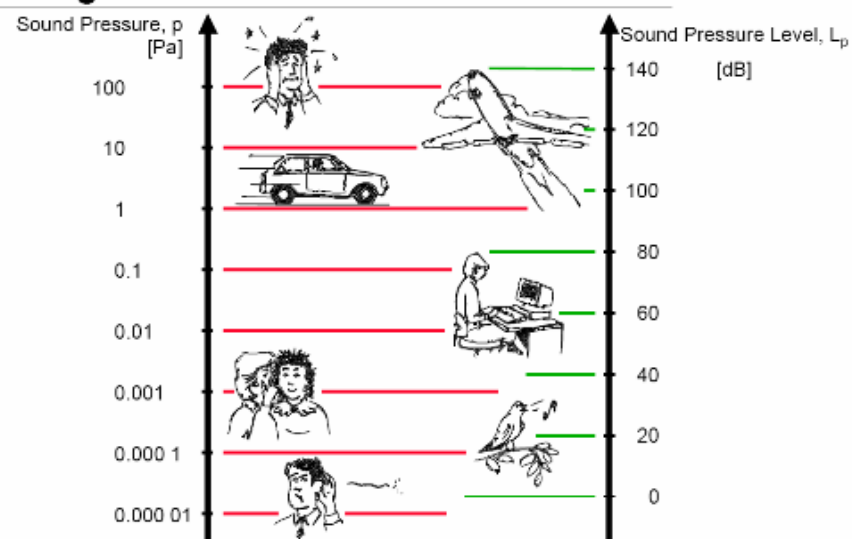


L'acustica

2. Livelli sonori, definizione di decibel

La scala dei decibel. Somma e sottrazione di livelli in dB. Livelli di potenza, intensità e densità. Misura della potenza sonora. Integrazione esponenziale e lineare: il Leq e il SEL.

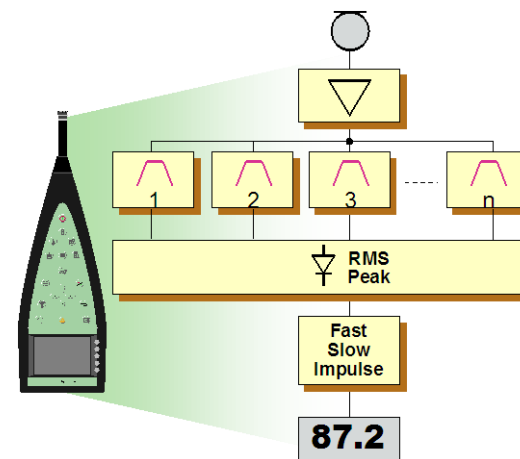
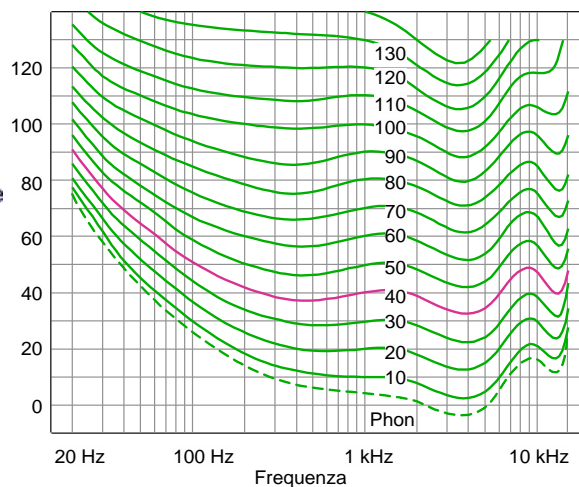
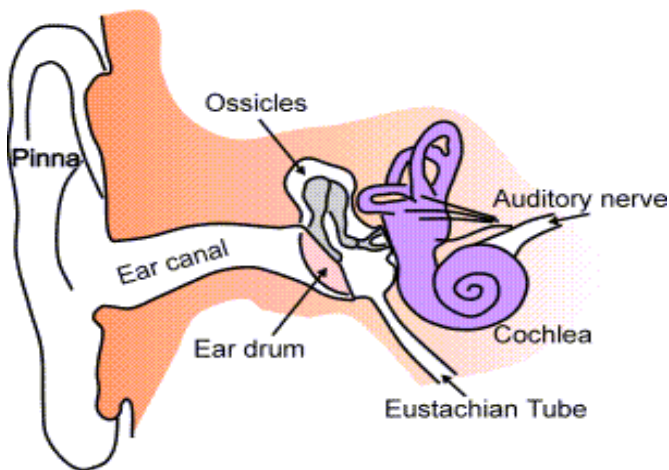
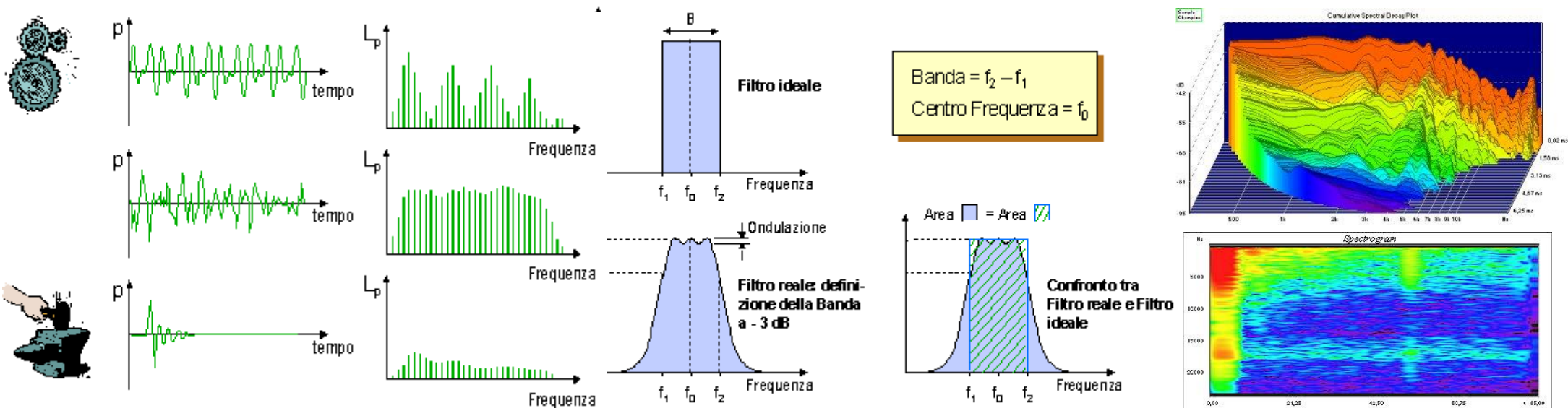
Range of Sound Pressure Levels



L'acustica

3. Analisi in Frequenza. Il sistema uditivo umano

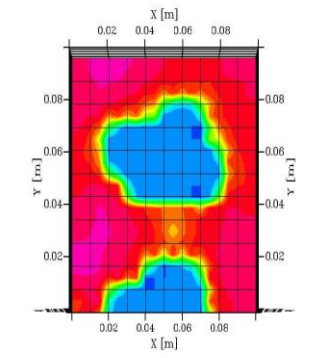
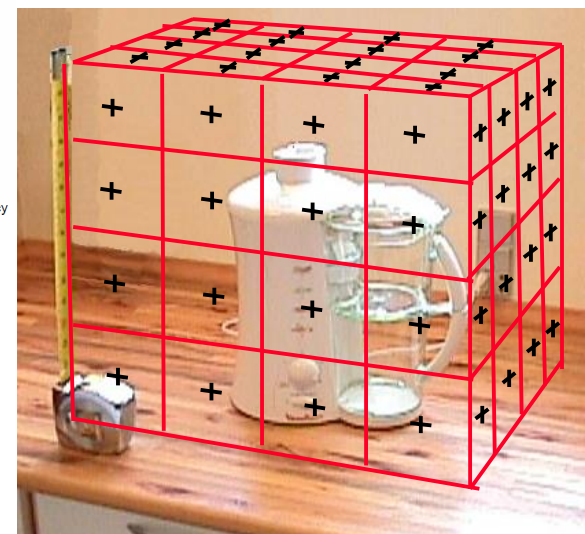
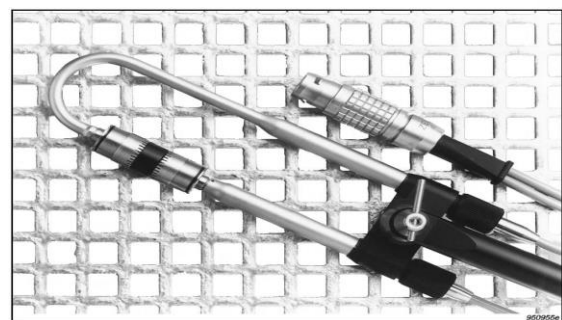
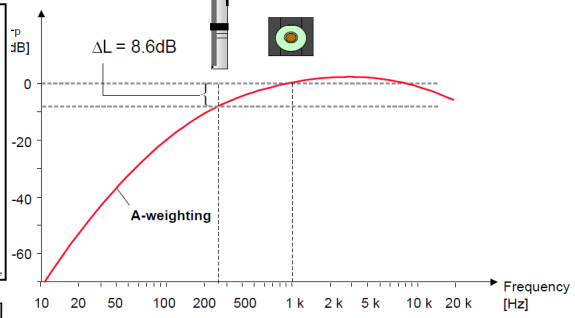
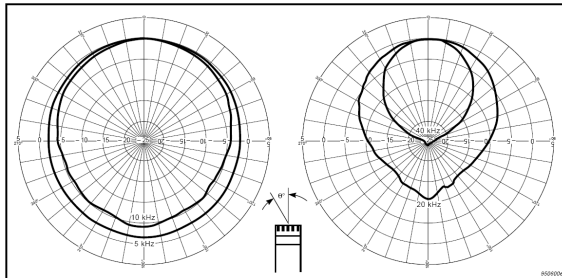
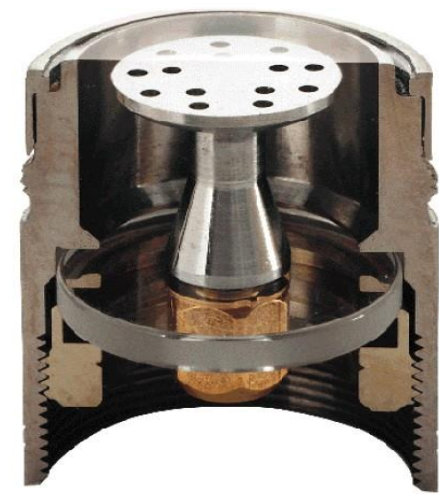
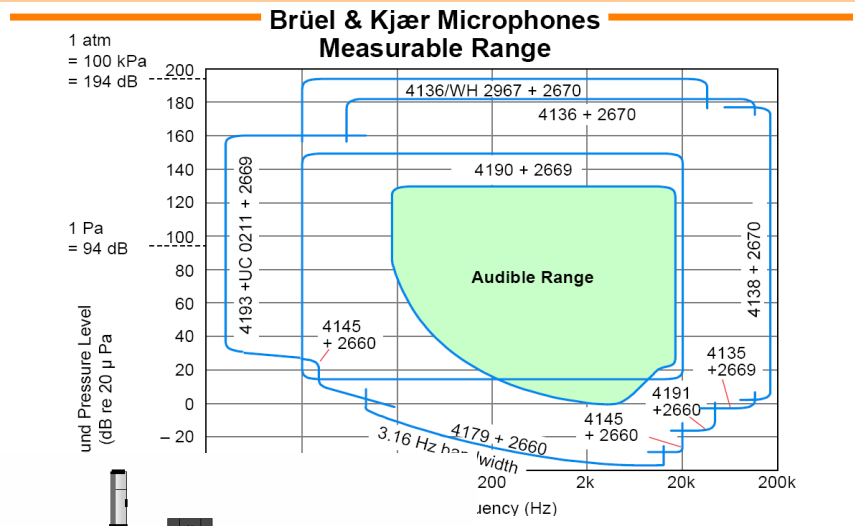
Analisi in frequenza. Filtri di 1/1 di ottava e 1/3 di ottava. Bande normalizzate IEC1260. Esempi di suoni e spettri. Il sistema uditivo umano. Curve isofoniche, pesatura "A". Pesatura e filtri nel fonometro. Descrittori acustici pesati.



L'acustica

4. Microfoni e fonometri. Misura dell'intensita' sonora

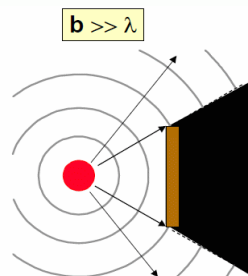
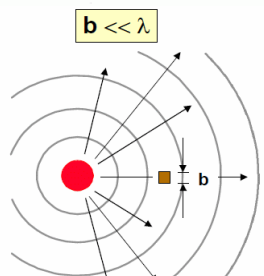
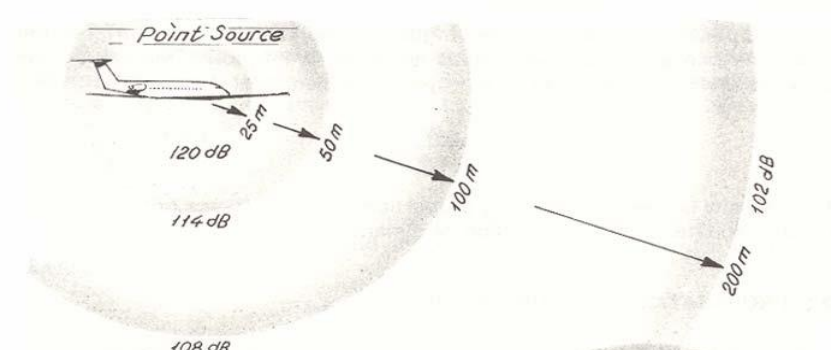
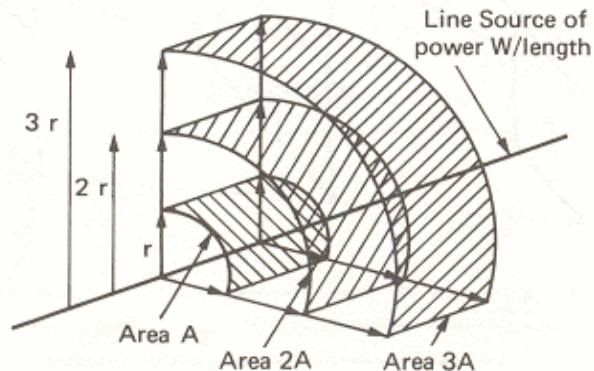
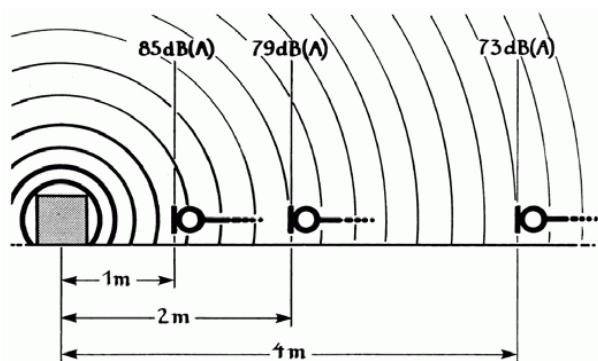
Il fonometro. Il microfono a condensatore. Misura dell'intensita' acustica. La trasformata di Fourier. Il prodotto di convoluzione. Delta di Dirac. Sistemi lineari-stazionari. Risposta all'impulso e risposta in frequenza.



L'acustica

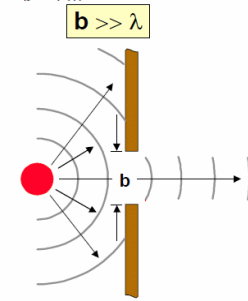
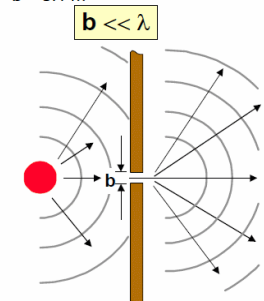
5. Rumore in ambiente esterno

La propagazione in campo aperto. Sorgente puntiforme, lineare e piana. La direttività della sorgente. Attenuazioni aggiuntive. Assorbimento dovuto all'aria. Effetto del suolo. La diffrazione. Relazione di Maekawa. Gradiente di temperatura e vento.



Example:
 $b = 0.1 \text{ m}$

Example:
 $b = 1 \text{ m}$

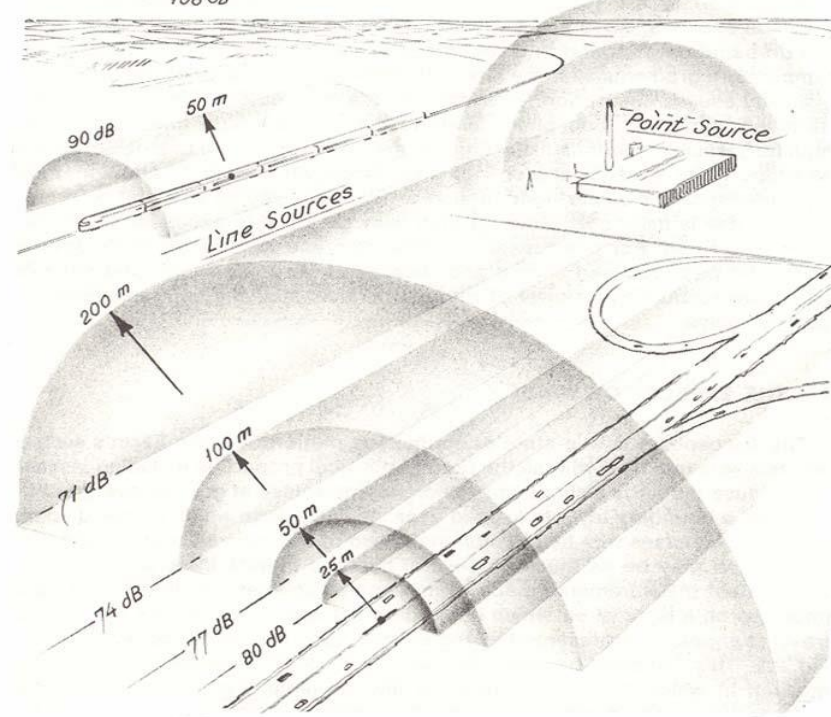
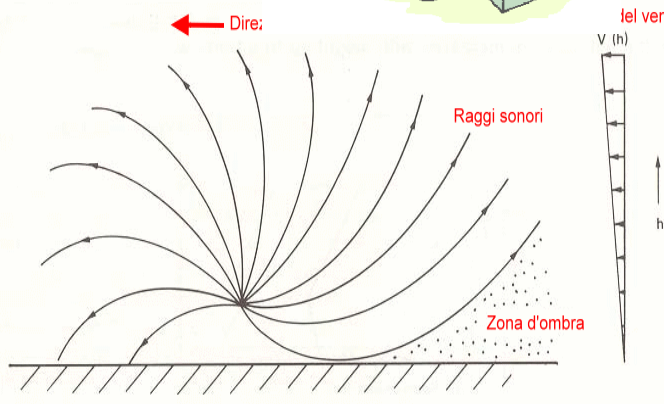
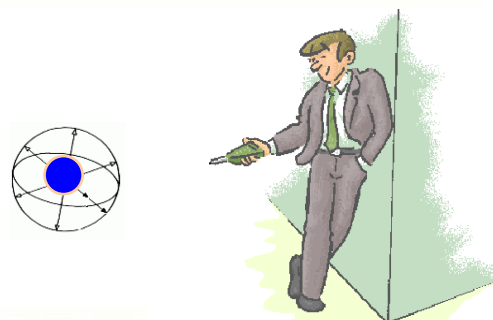


Example:
 $b = 0.1 \text{ m}$

$\lambda = 0.344 \text{ m}$ ($\approx f = 1 \text{ kHz}$)

Example:
 $b = 0.5 \text{ m}$

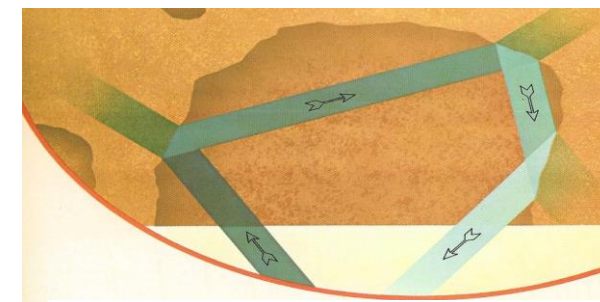
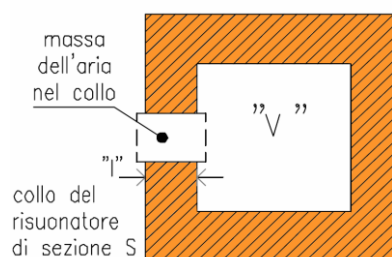
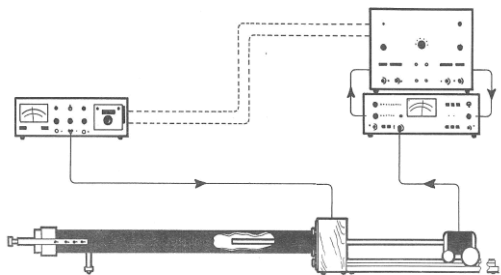
$\lambda = 0.344 \text{ m}$ ($\approx f = 1 \text{ kHz}$)



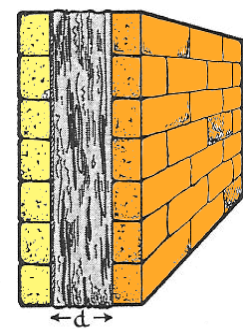
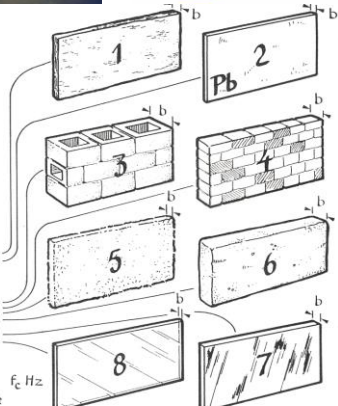
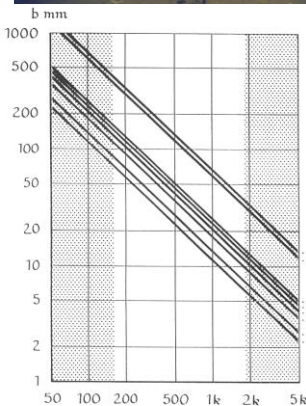
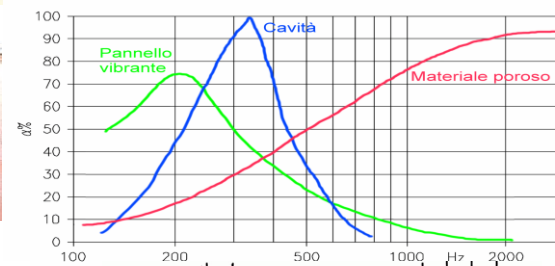
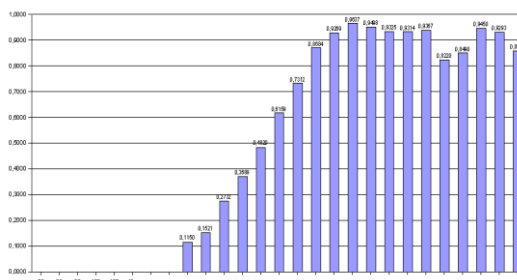
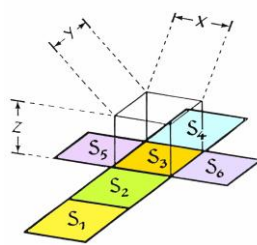
L'acustica

6. Assorbimento e trasmissione del suono

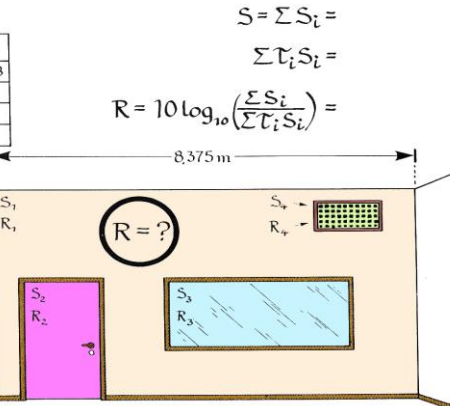
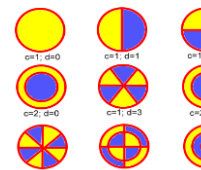
Il coefficiente di assorbimento acustico apparente. Materiali fonoassorbenti. Materiali fonoassorbenti porosi. Il risonatore di Helmholtz. I pannelli forati. I pannelli vibranti. Misura del coefficiente di assorbimento con vari metodi. Misura nel tubo a onde stazionarie. Misura in camera riverberante. Misura con metodo a riflessione. Il potere fonoisolante. La legge di massa. Deviazioni dalla legge di massa. La frequenza di risonanza. La frequenza critica. Risonanza di una cavità. Pareti doppie. Misura in laboratorio e in opera del potere fonoisolante. Pareti composte, elementi in parallelo. Livello di rumore da calpestio.



$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_6 S_6$$



R_i dB	τ_i	S_i m ²	$\tau_i S_i$
1	50	0,000001	28,0
2	25		3,0
3	14		2,0
4	7		0,5



$$S = \sum S_i =$$

$$\sum \tau_i S_i =$$

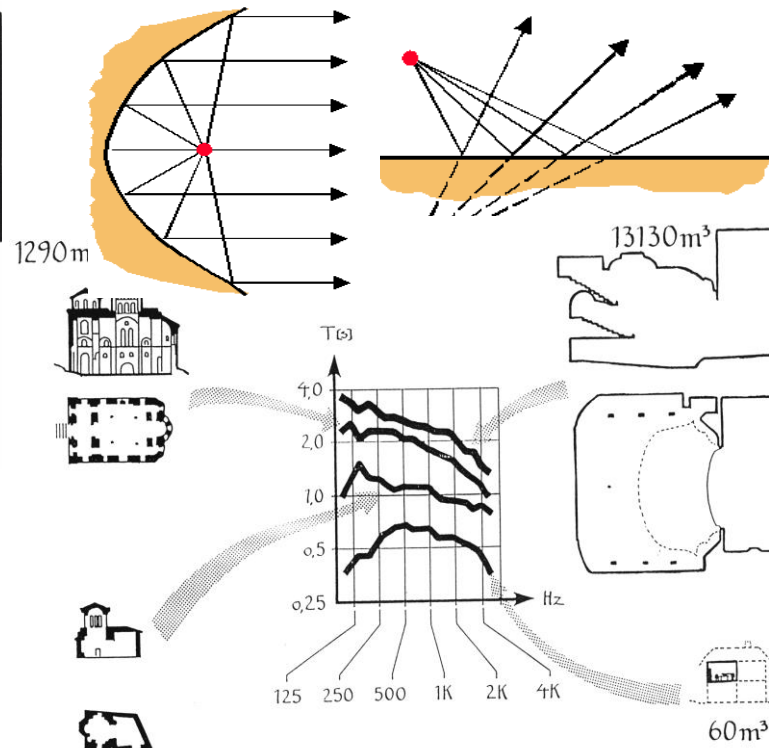
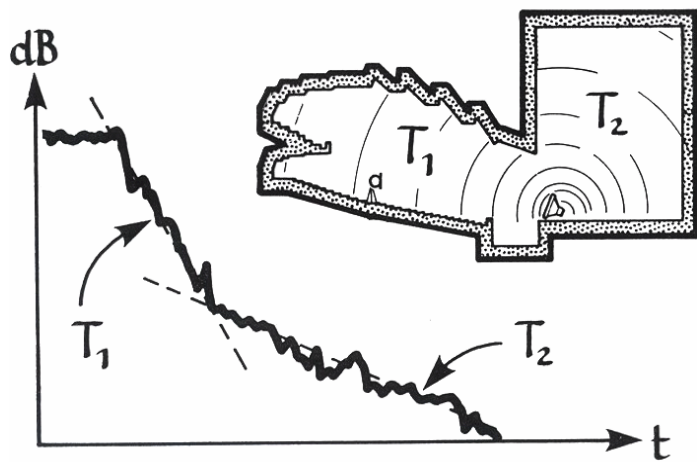
$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum S_i}{\sum \tau_i S_i} \right) =$$



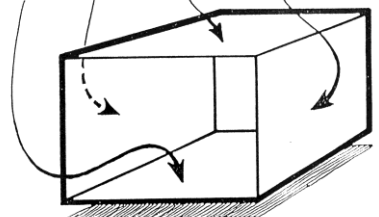
L'acustica

7. Acustica degli ambienti chiusi

Formazione del campo acustico riverberante. La coda sonora. Il tempo di riverberazione. La distanza critica. La formula di Sabine. La formula di Eyring. La formula di Millington-Sette. Correzione per l'assorbimento dell'aria. Il campo riverberante. Il campo semi-riverberante. La qualità' delle sale. Parametri acustici (ISO 3382). Modi normali di vibrazione.



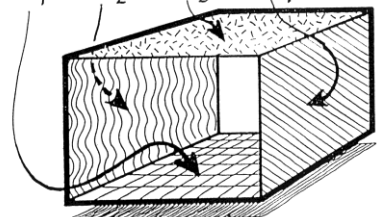
$\alpha_1 \cong \alpha_2 \cong \alpha_3 \cong \alpha_4 \dots$ Eyring



$$T = \frac{0,163 V}{-S \log_e (1 - \bar{\alpha})}$$

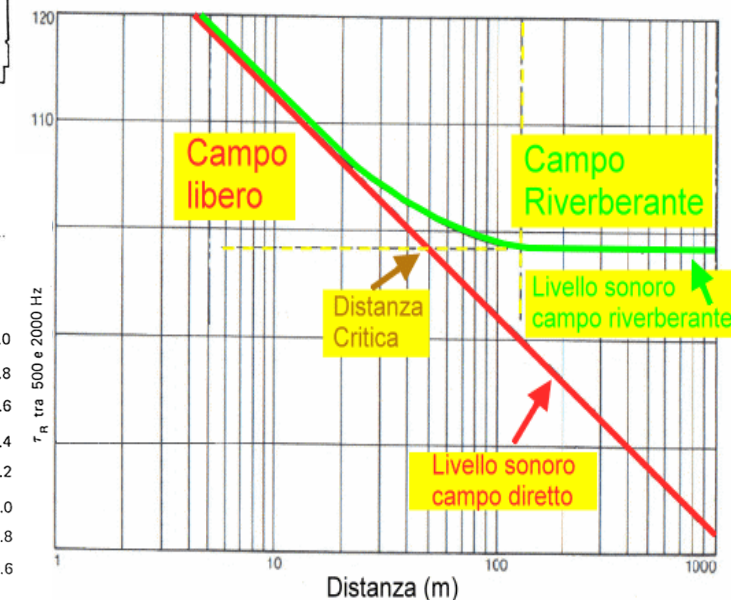
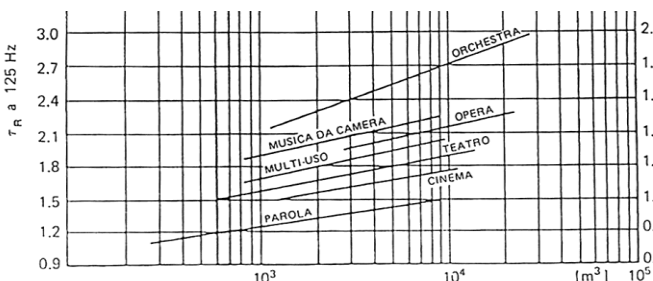
$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S}$$

$\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \dots$ Millington & Sette



230m³
Millington & Sette

$$T = \frac{0,163 V}{\sum -S_i \log_e (1 - \alpha_i)}$$



Introduzione

COME STUDIARE E COME NON STUDIARE

“Studio”

L'apprendimento di una materia consiste nell'assimilazione di un complesso di concetti e nozioni. I **concetti complessi** vanno scomposti nei loro **elementi costitutivi**: solo in questo modo la mente può comprenderli. Successivamente questi elementi saranno “riasmblati” dalla nostra mente e il concetto complesso sarà **assimilato**.

La mente ha bisogno di tempo perchè la nuova nozione appresa sia completamente assimilata e si stabiliscano legami con altre nozioni conosciute.

Cosa **NON** fare:

- cercare di imparare a memoria e senza capire
- studiare in fretta

Introduzione

ANALISI



SPINACI

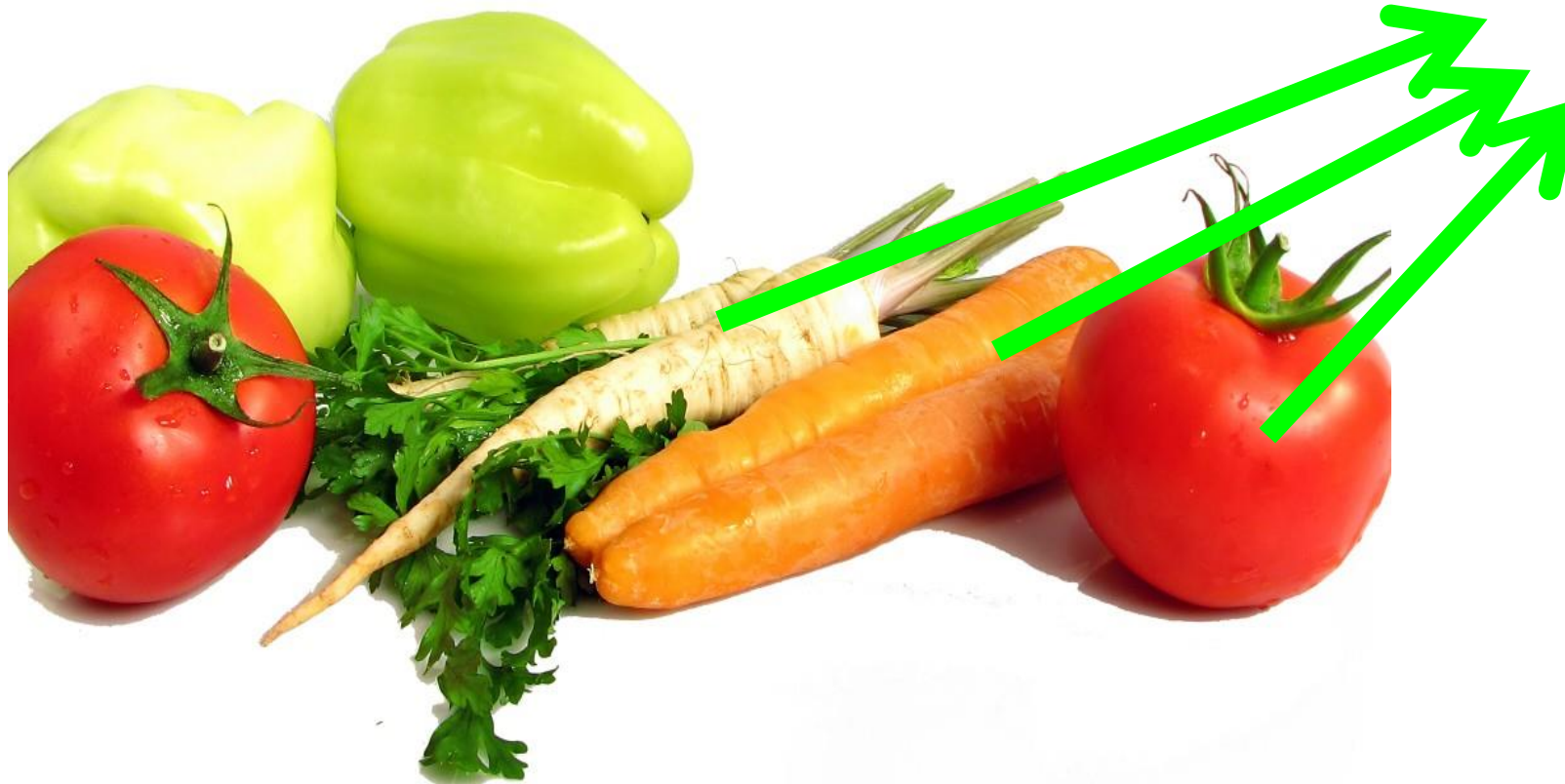
CAROTA

POMODORO

SEDANO

Introduzione

SINTESI



MINESTRONE

Capire un concetto complesso significa trovare le connessioni tra i suoi "pezzi", ovvero trovare gli ingredienti del minestrone, e successivamente capire la "ricetta" che li tiene insieme. **ANALISI ⇒ COMPrensIONE ⇒ SINTESI**

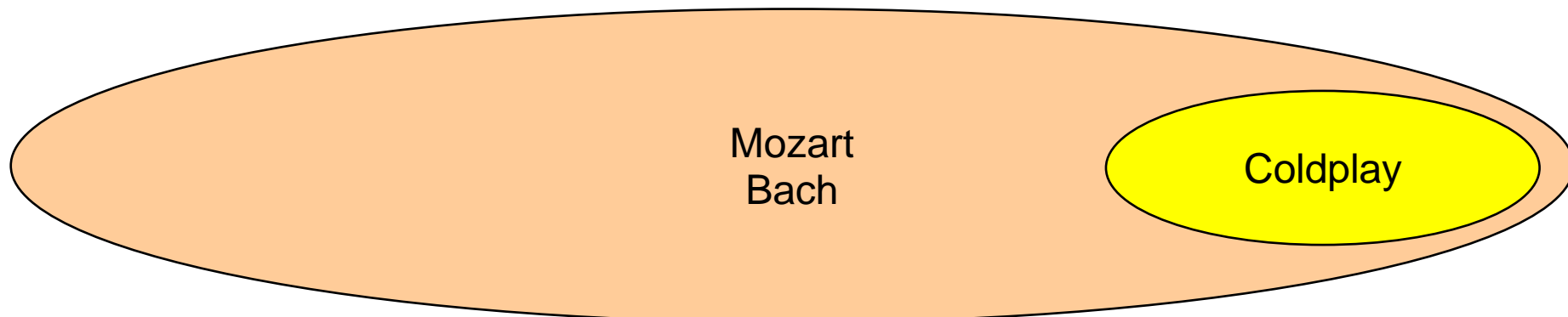
Introduzione

LA COMUNICAZIONE E IL RENDIMENTO

Occorre **capire** i concetti spiegati a lezione *giorno per giorno!* I concetti spiegati nelle lezioni successive non potranno essere capiti senza il bagaglio di nozioni spiegate precedentemente.

ESEMPIO

- Se una persona vissuta ai tempi di Mozart o Bach avesse ascoltato una canzone dei Coldplay, l'avrebbe apprezzata?
- Un nostro contemporaneo, amante dei Coldplay, può facilmente apprezzare le opere di Mozart o Bach?



Introduzione

ALTRO ESEMPIO

- Una persona dall'orecchio *non allenato* apprezzerà un brano di musica dodecafonica o la troverà noiosa e insulsa?
- Un grande compositore apprezzerà il motivetto Jingle Bells o lo troverà noioso e insulso?



In modo più formale:

L'**informazione** è il messaggio trasmesso (da una composizione artistica ma anche in una lezione universitaria)

Detta **I l'informazione** in una **comunicazione C**:

La quantità di informazione **I** ricevuta dipende anche dalla condizione di chi la riceve, e specialmente dall'insieme di conoscenze acquisite dal ricevitore. Questo insieme di conoscenze si chiama **thesaurus Th**. Esso condiziona la capacità di una persona di capire una comunicazione, traendone nuove informazioni.

Introduzione

Si può scrivere

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}(\mathbf{C}, \mathbf{Th})$$

per indicare che la quantità di informazioni ricevute \mathbf{I} dipende dalla comunicazione \mathbf{C} e dal tesaurus \mathbf{Th} .

Per ogni comunicazione \mathbf{C} , ci sono 2 casi estremi in cui l'informazione ricevuta \mathbf{I} è nulla:

- quando \mathbf{Th} è troppo povero e non permette di capire \mathbf{C}
- quando \mathbf{Th} è troppo ricco e \mathbf{C} era già conosciuto

Per esempio se \mathbf{C} è un libro di calcolo infinitesimale: un bambino non ne trarrà nessuna informazione, uno studente di matematica ne ricaverà il massimo di informazione e un professore di analisi non ne trarrà nessuna nuova informazione.

Lo stesso si può dire sulla comprensione della musica: *l'informazione artistica* è massima quando la composizione è differente ma non troppo dagli schemi che l'ascoltatore si aspetta.

Introduzione

Tutto ciò per ribadire il concetto che se non si capiscono i concetti delle lezioni precedenti non si capirà nulla delle lezioni successive!

ATTENZIONE a non focalizzarsi sulle formule o sulle dimostrazioni! Occorre **capire il concetto** che sta dietro una certa formula.

Se si è capito il concetto, la formula si impara facilmente. Imparare a memoria una formula senza averne capito il significato è solo un'inutile dispendio di energia (e non aiuta per niente a passare l'esame..).

Stesso discorso vale per gli esercizi: per risolvere un esercizio non serve a nulla avere imparato a memoria una certa formula se non si è capito il suo significato e come e quando si applica!



Introduzione

Un grande stimolo allo studio è la **curiosità intellettuale** in ciò che si sta apprendendo. La curiosità nasce sia dal desiderio di conoscenza che dallo studio dei fenomeni naturali.

La curiosità nella materia che si sta studiando è una grande alleata e permette di fare molta meno fatica nell'apprendimento.

Una volta che si sono appresi differenti argomenti di una materia, è necessario avere una visione organica e d'insieme e fare collegamenti tra ogni argomento. Solo così si avrà finalmente "capito" tutto l'esame.

Una somma di concetti non legati tra loro non è la stessa cosa di un insieme organico di nozioni organizzate e collegate.



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

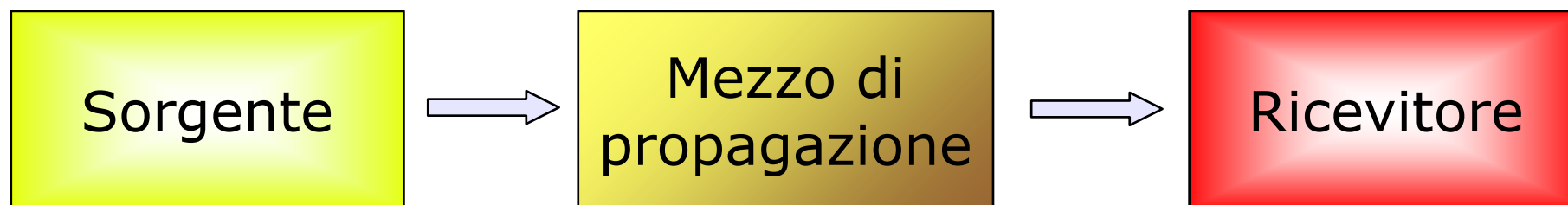
***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

Dispensa n. 1

ACUSTICA FISICA

Docente: Paolo Guidorzi

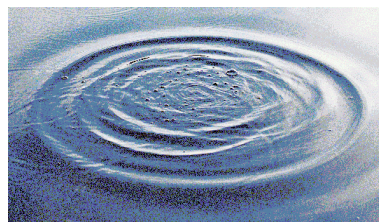
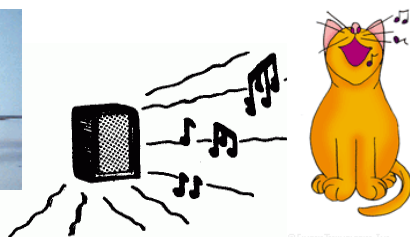
- L'acustica è la branca della fisica che studia il suono e la propagazione delle onde sonore nei mezzi elastici
- Le onde hanno bisogno di un mezzo elastico per propagarsi



- Voce
- Corpo solido che vibra
- Altoparlante
- Rumore derivante da impianti
- Rumore aerodinamico

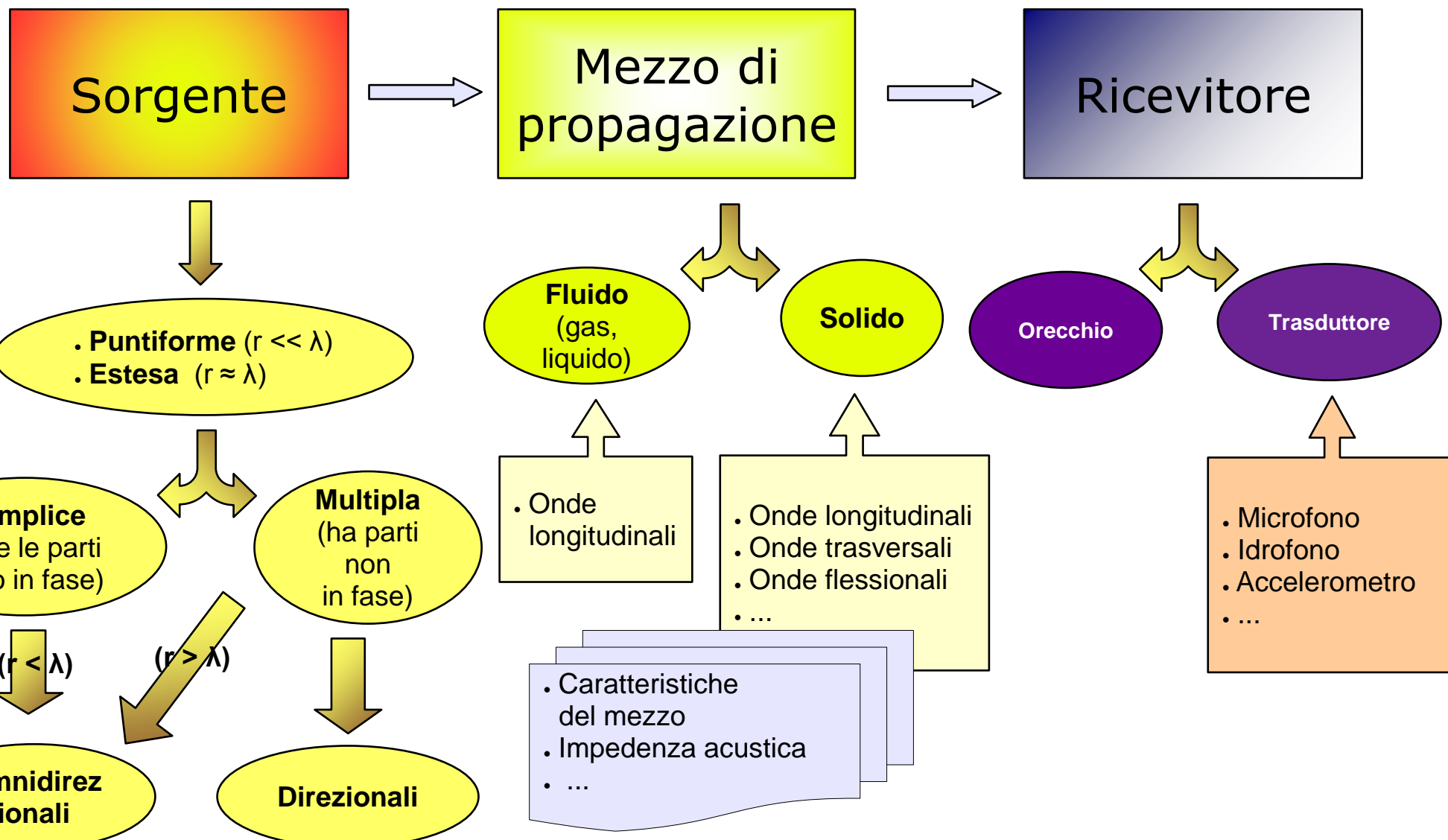
- Fluido (gas o liquido)
- Solido

- Orecchio
- Microfono

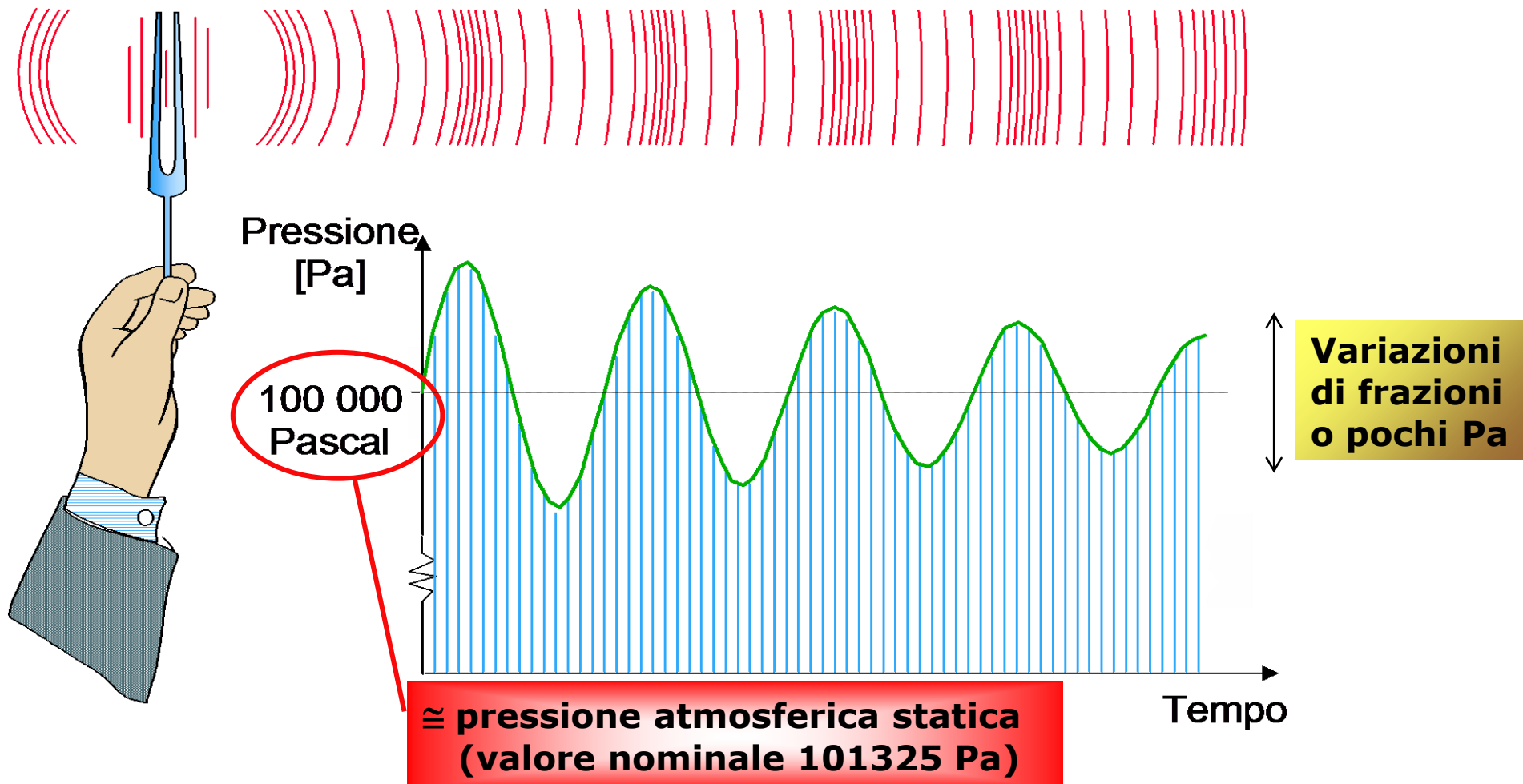


- La propagazione delle onde acustiche può avvenire in modo diverso nei diversi mezzi (gas, liquidi o solidi)
- Il tipo di onde ammissibili in un mezzo dipende dalle sue caratteristiche meccaniche e fisiche
- Il mezzo deve essere elastico
- L'onda si propaga nel mezzo in forma di perturbazione

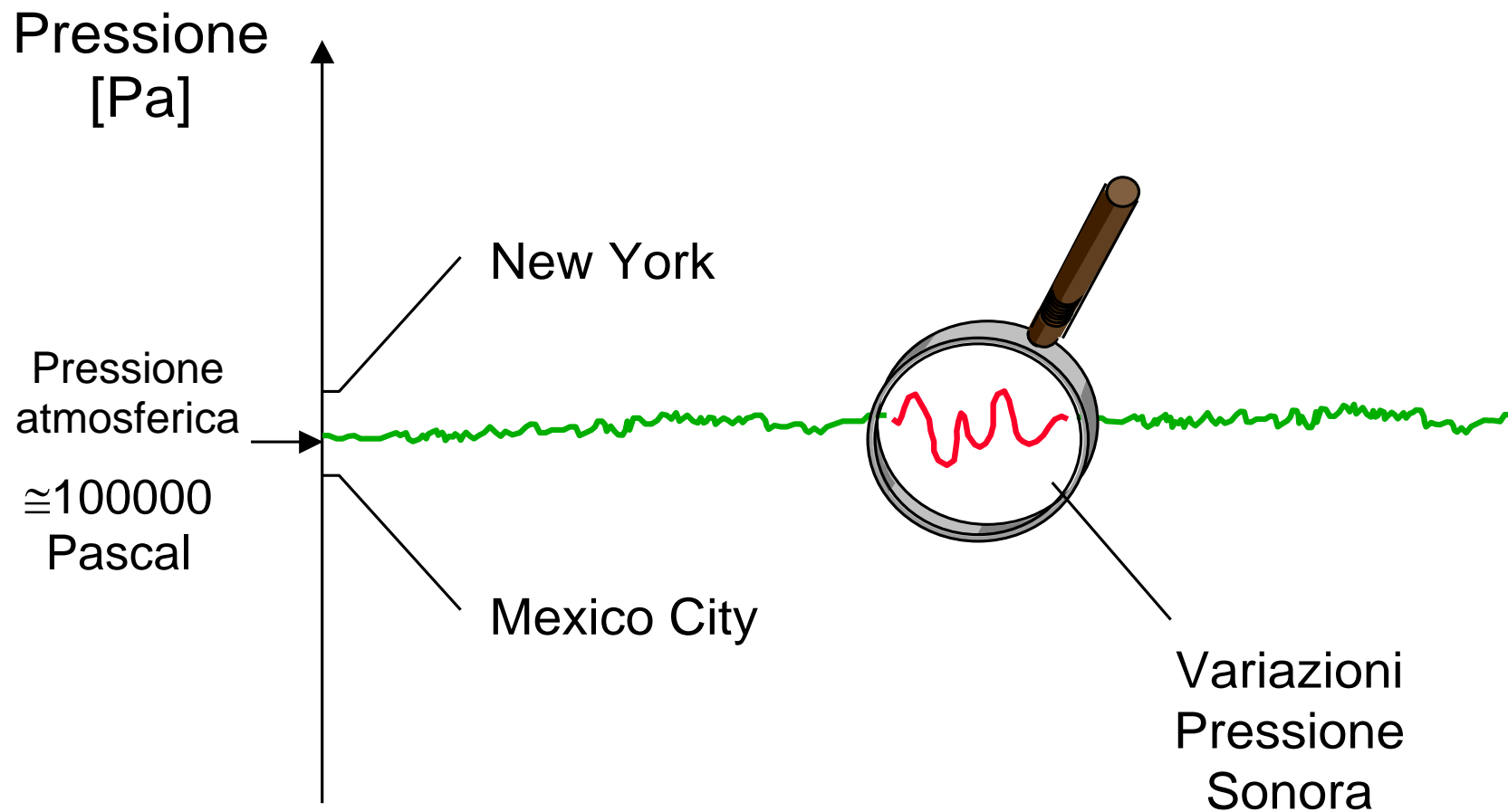
- Le onde sonore derivano dalla propagazione di un moto oscillatorio attraverso le particelle del mezzo
- Il suono (l'informazione trasportata dalle onde) si può caratterizzare da un'ampiezza e da un contenuto spettrale
- L'orecchio percepisce suoni in un ristretto range di frequenze
(convenzionalmente da 20 Hz a 20 kHz)
- I suoni nell'aria sono trasportati da variazioni di pressione. La soglia di udibilità (in ampiezza) dei suoni per l'orecchio umano si pone convenzionalmente a 20 μPa



- L'onda si propaga attraverso le particelle del mezzo
- La pressione sonora è una oscillazione rispetto alla pressione atmosferica

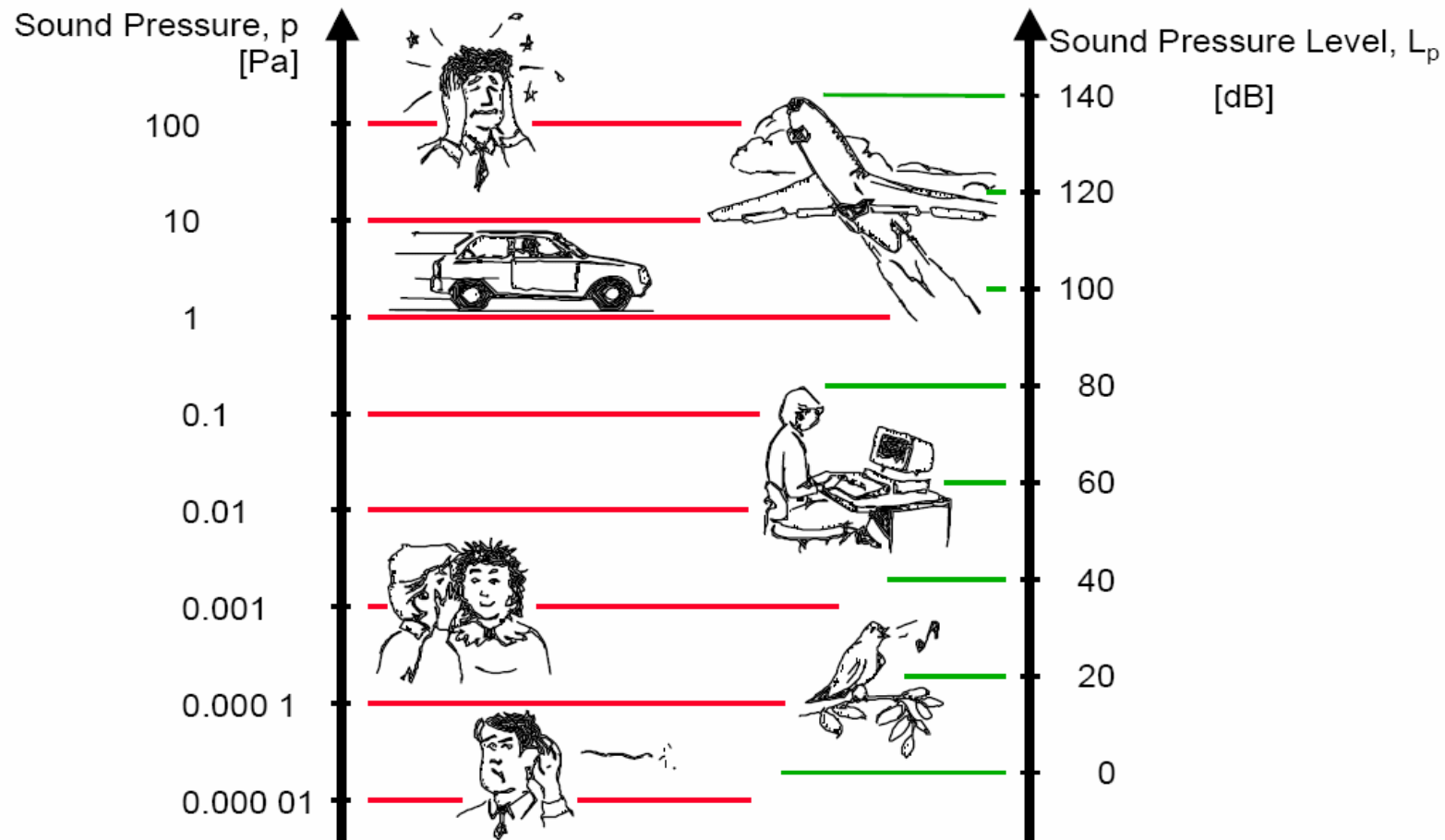


- La pressione acustica si sovrappone alla pressione atmosferica



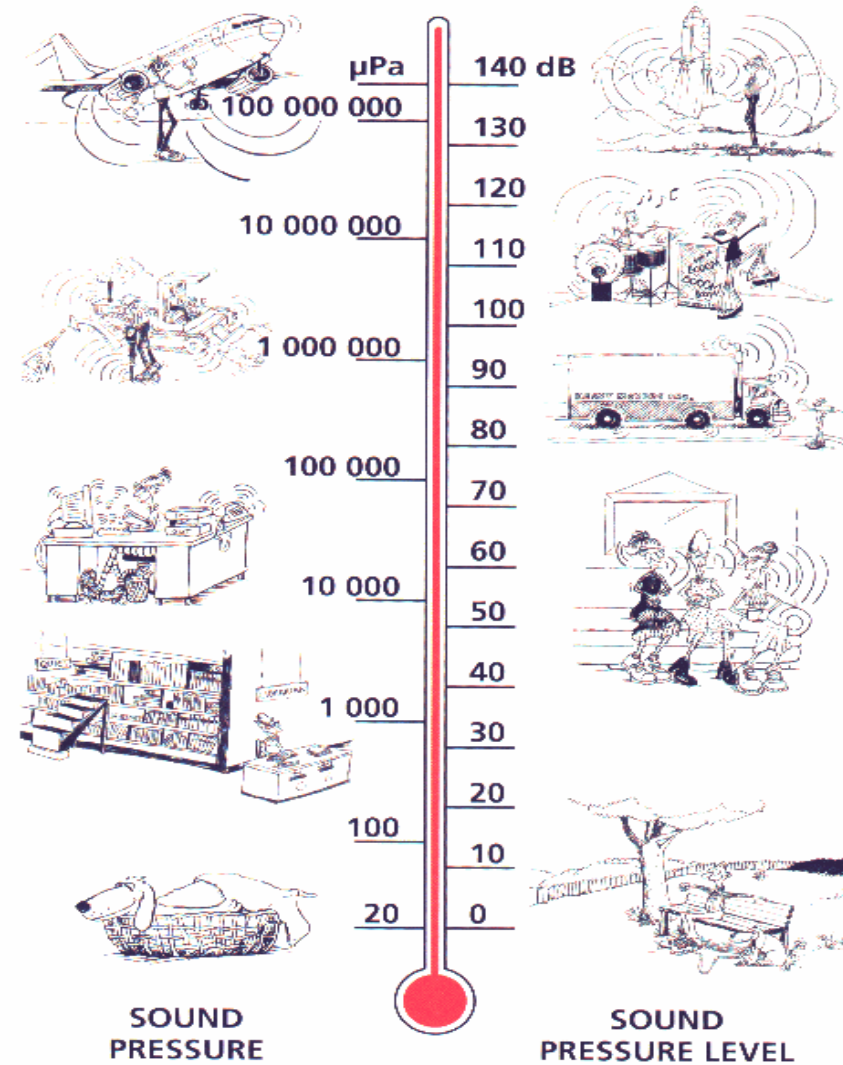
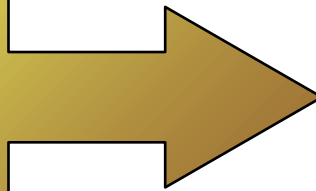
- Le variazioni di pressione dovute alle onde acustiche sono molto minori della pressione atmosferica statica (circa 100000 Pa)

Range of Sound Pressure Levels



Pressione atmosferica:
circa 100000 Pa

Variazioni di pressione
dovuta alle
onde sonore

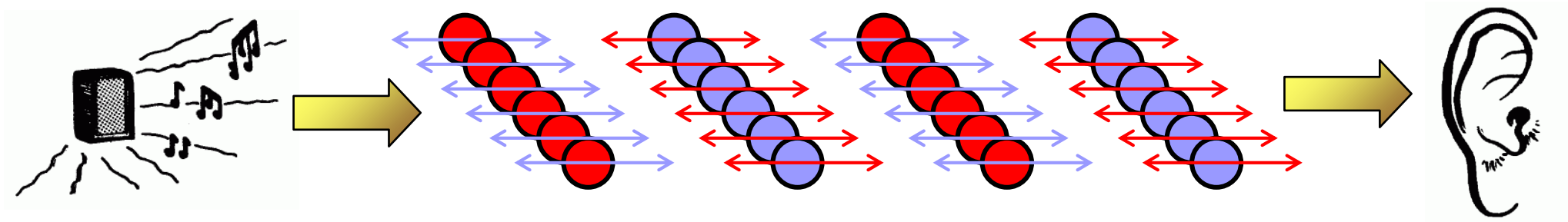


SOUND PRESSURE

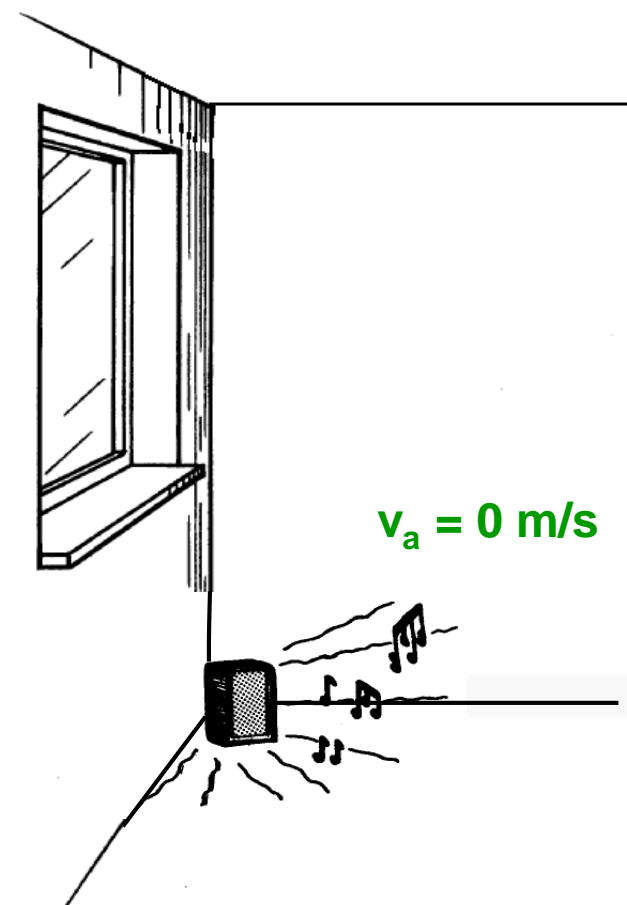
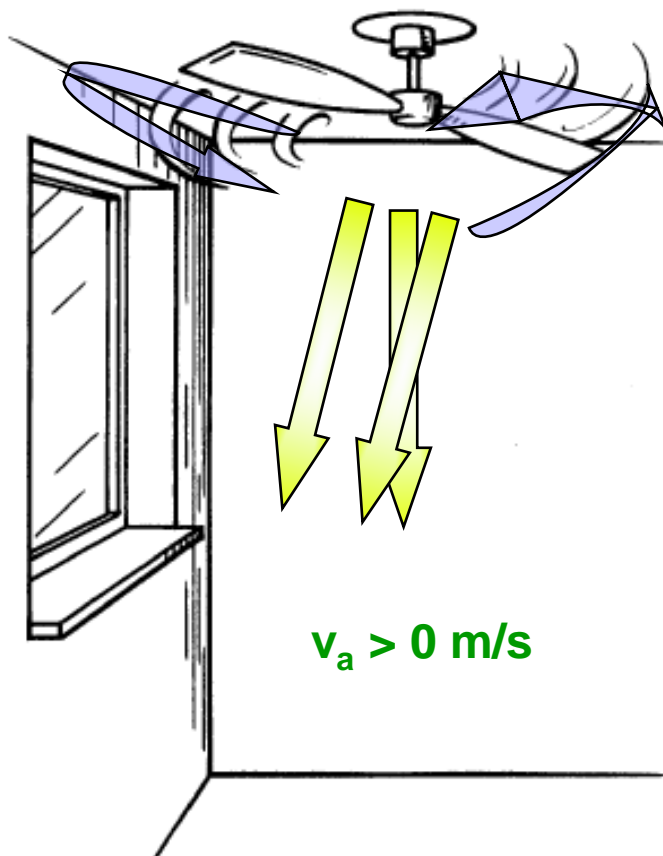
SOUND PRESSURE LEVEL

000111

- L'onda si propaga attraverso le particelle del mezzo trasportando energia
- L'onda acustica non trasporta massa



- L'onda acustica non trasporta massa



Tipo di moto

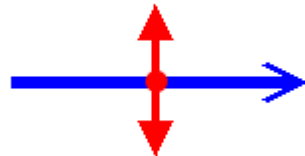
Mezzo

Onde
longitudinali



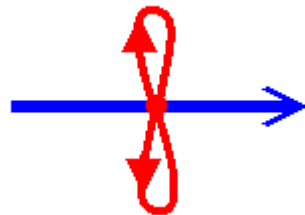
- . Gas
- . Liquidi
- . Solidi

Onde
trasversali



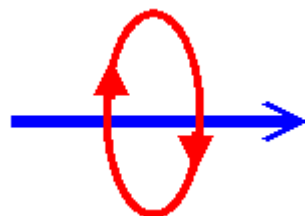
- . Solidi
- . Corde

Onde
flessionali

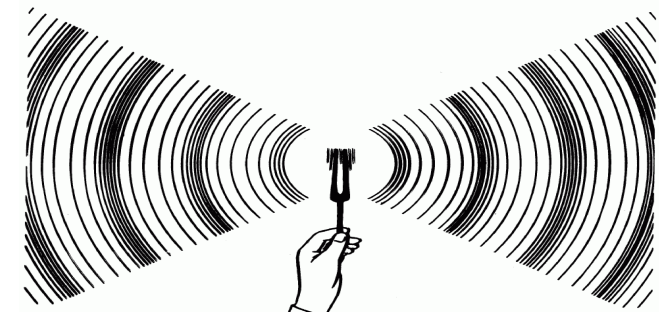


- . Tondini
- . Superfici
piane

Onde
di Rayleigh



- . Superfici
dei solidi





MATERIALE	VELOCITÀ DEL SUONO (m/s)	RISPETTO ALL'ARIA
ARIA	344	0
PIOMBO	1220	3,5
ACQUA	1410	4,1
METACRILATO	1800	5,2
MATTONI	3000	8,7
LEGNO	3400	9,9
CEMENTO ARMATO	3400	9,9
VETRO	5200	15,1
ALLUMINIO	5200	15,1
ACCIAIO	5200	15,1
CARTONGESSO	6800	19,8

- Per descrivere dinamicamente i diversi tipi di moto delle onde occorre conoscere spostamento, velocità e accelerazione della materia perturbata in funzione del tempo
- Nel caso dei gas occorre anche quantificare la variazione dello stato in concomitanza del passaggio del fronte d'onda
- Occorre quindi distinguere tra pressione, temperatura e densità allo stato di riposo e perturbato

L'equazione delle onde acustiche lineari (di D'Alembert)

Ipotesi:

- Il fluido sia omogeneo e isotropo
- Il fluido sia perfettamente elastico
- Il fluido sia ideale (viscosità nulla); si trascurino le forze di massa (es. gravità)
- Le perturbazioni acustiche (pressione e densità) siano piccole rispetto ai valori di equilibrio (acustica lineare)
- Si trascurino eventuali dissipazioni

- ▣ Variabili statiche

Pressione p_0
Densità ρ_0
Temperatura T_0

- ▣ Variabili di perturbazione

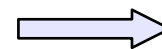
Pressione p
Densità ρ
Temperatura T
Spostamento ξ
Velocità u
Accelerazione a

- Ad ogni istante la pressione locale in un punto del gas vale $p = p_0 + p'$ ←
- Ad ogni istante la densità locale in un punto del gas vale $\rho = \rho_0 + \rho'$ ←
- Ad ogni istante la velocità locale delle particelle in un punto del gas vale $u = u_0 + u'$ ←
- u_0 si può porre uguale a zero

Perturbazione
dovuta al suono

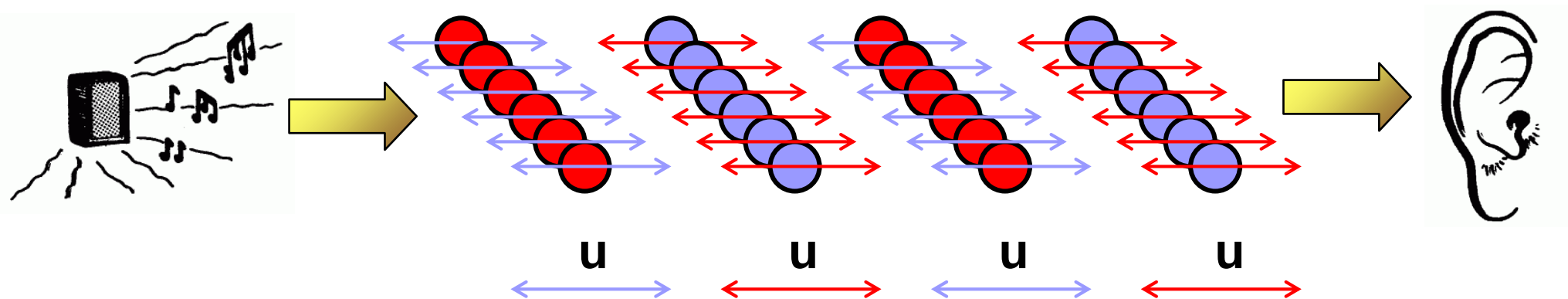
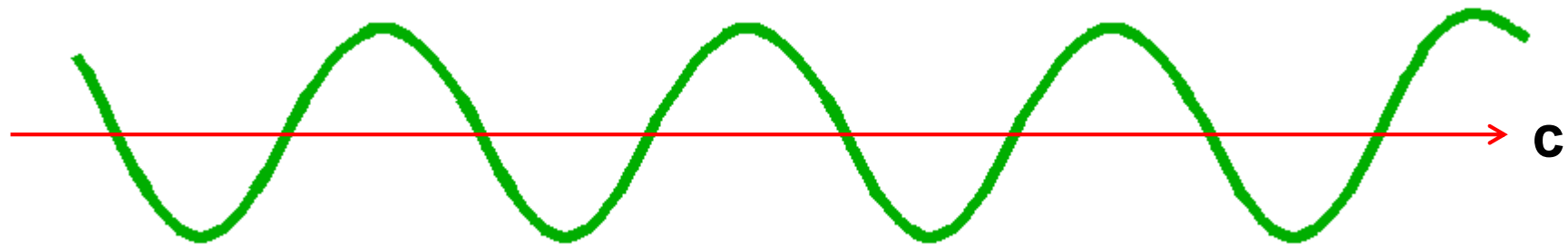
$$\begin{aligned} p &= p_0 + p'; & p' \ll p_0 \\ \rho &= \rho_0 + \rho'; & \rho' \ll \rho_0 \\ u &= u_0 + u'; & u_0 = 0 \end{aligned}$$

Ipotesi di acustica lineare ←

Equazione delle onde lineari
o di D'Alembert

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

- Velocità dell'onda c
- Velocità di oscillazione delle particelle u



c è la velocità di fase del suono
u è la velocità delle particelle del mezzo



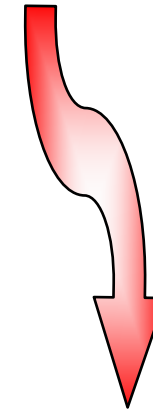
La velocità del suono è rappresentata da **c**

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} \Rightarrow c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}}$$

La propagazione del suono in aria è una trasformazione termodinamica

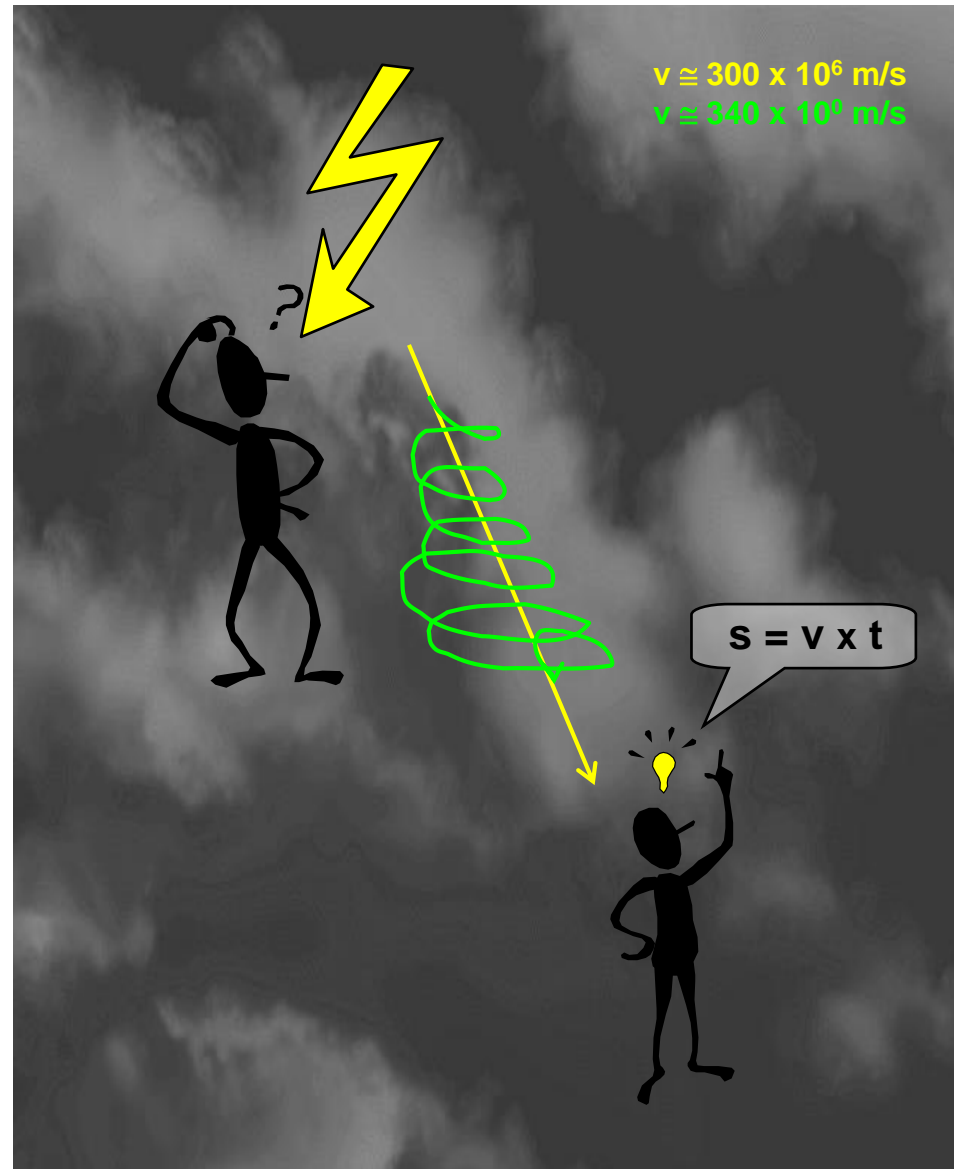
Nell'aria (considerata gas perfetto):

- A bassa frequenza: **TRASFORMAZIONE ISOTERMA**
- Alle frequenze audio il calore non riesce a propagarsi (l'aria è un cattivo conduttore di calore): **TRASFORMAZIONE ADIABATICA**
- Ad altissima frequenza (lunghezza d'onda $\lambda \approx$ spostamento delle molecole, ultrasuoni): fenomeno convettivo è più efficiente: **TRASFORMAZIONE ISOTERMA**

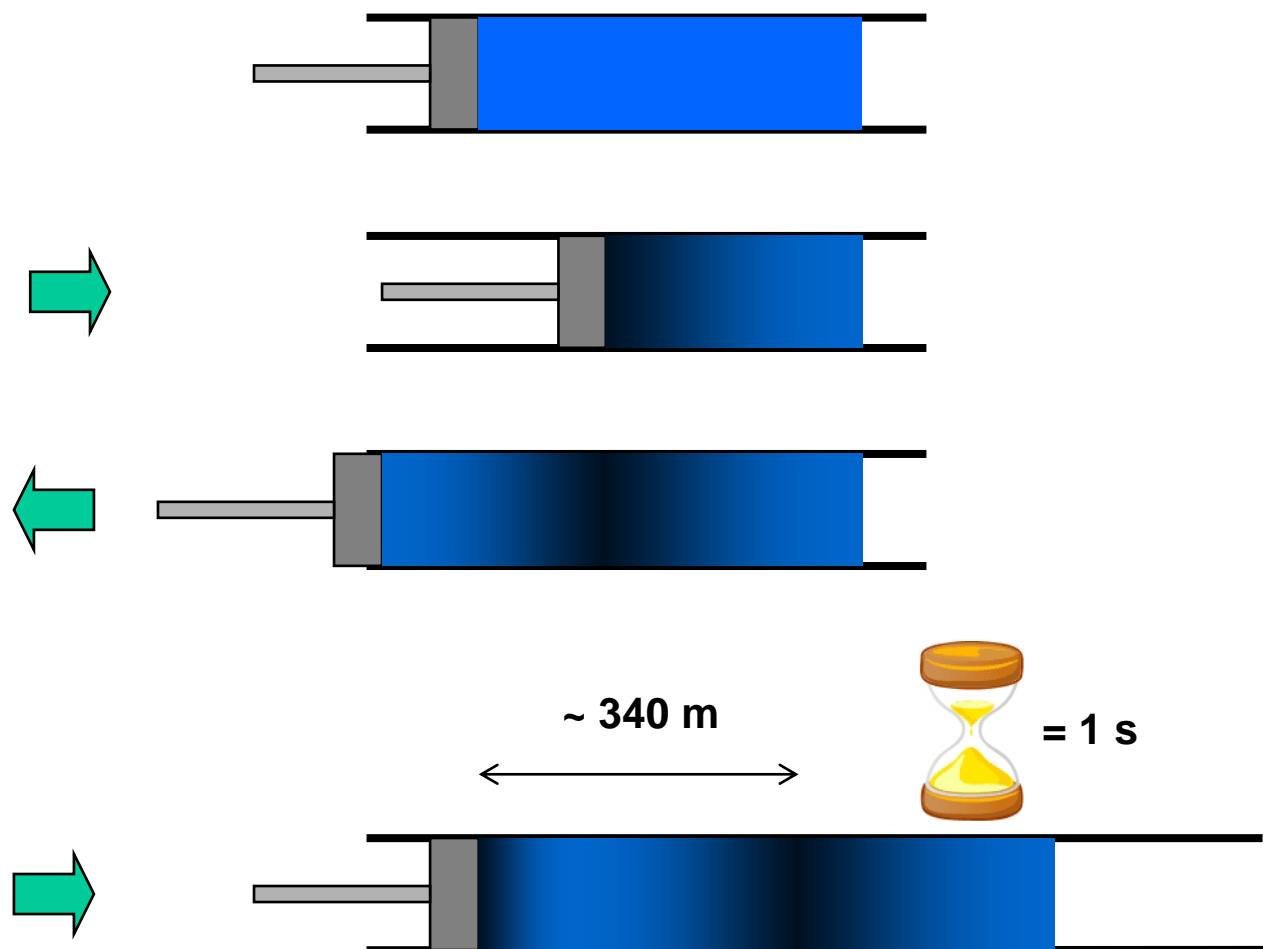


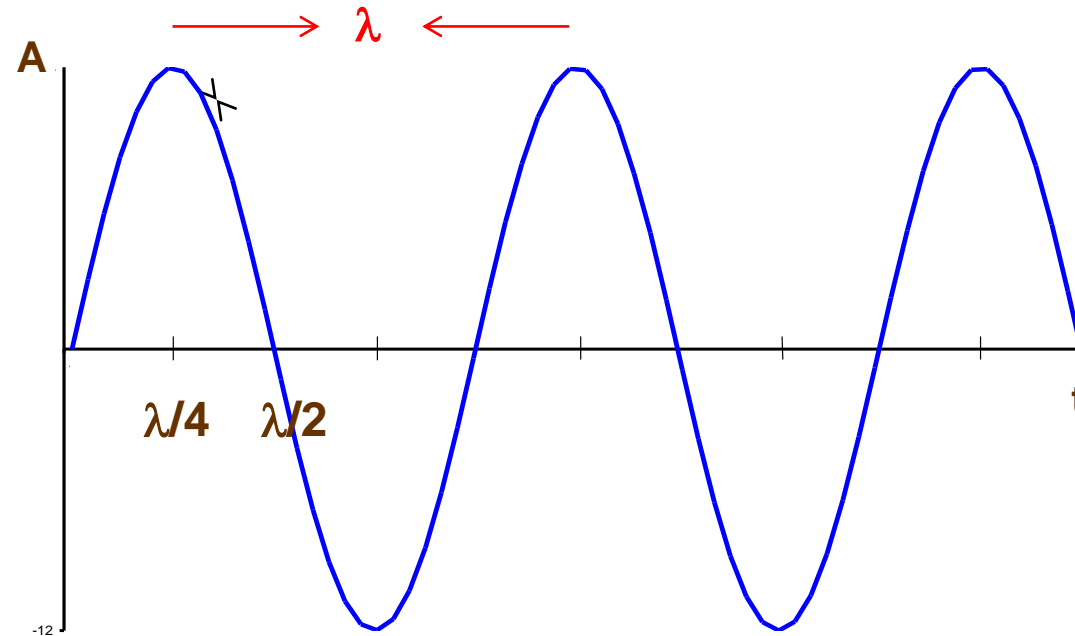
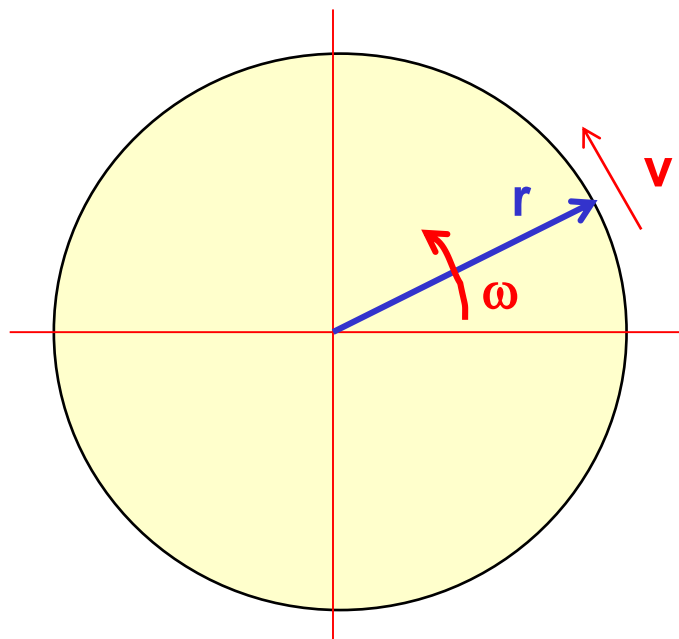
Espressione della velocità del suono
in aria in funzione della temperatura

$$c = 331,6 + 0,6 T$$



Generazione dell'onda piana





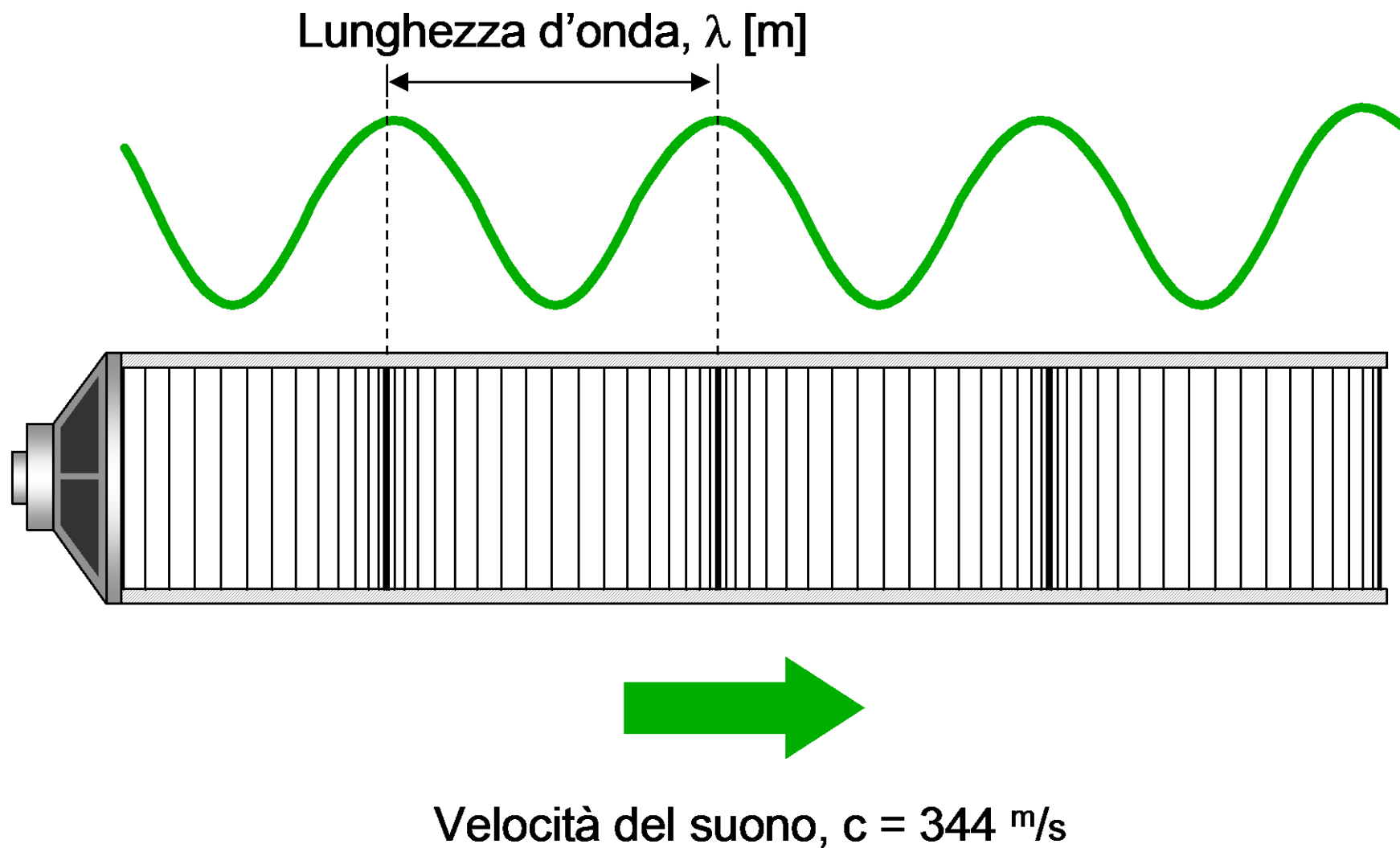
$$v = \omega r = 2\pi f \cdot r$$

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

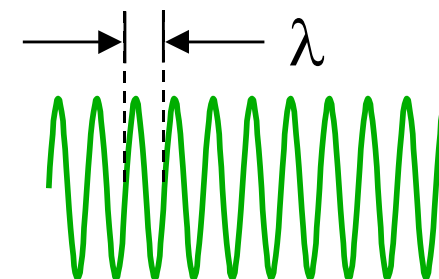
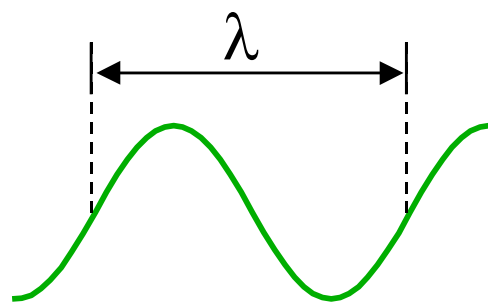
v: velocità lineare [m/s]
 ω: velocità angolare [rad/s]=[s⁻¹]
 T: periodo [s] (tempo per
 percorrere un angolo giro)
 f: frequenza [s⁻¹]=[Hz] (giri per
 unità di tempo)
 λ: lunghezza d'onda [m]

$$\lambda = cT = c \cdot \frac{2\pi r}{2\pi f \cdot r} = \frac{c}{f}$$

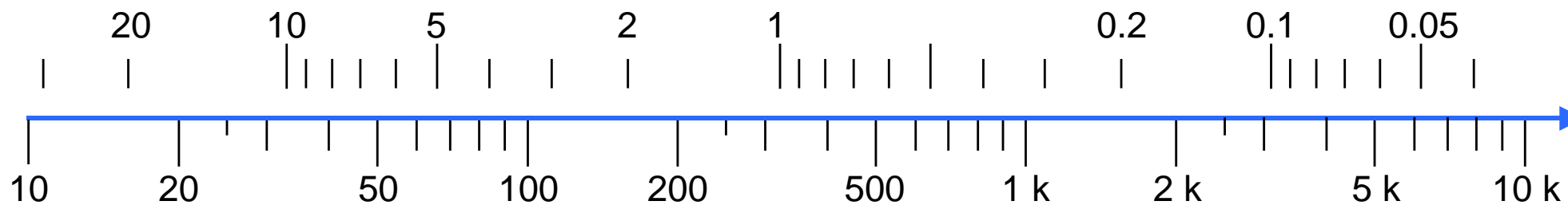




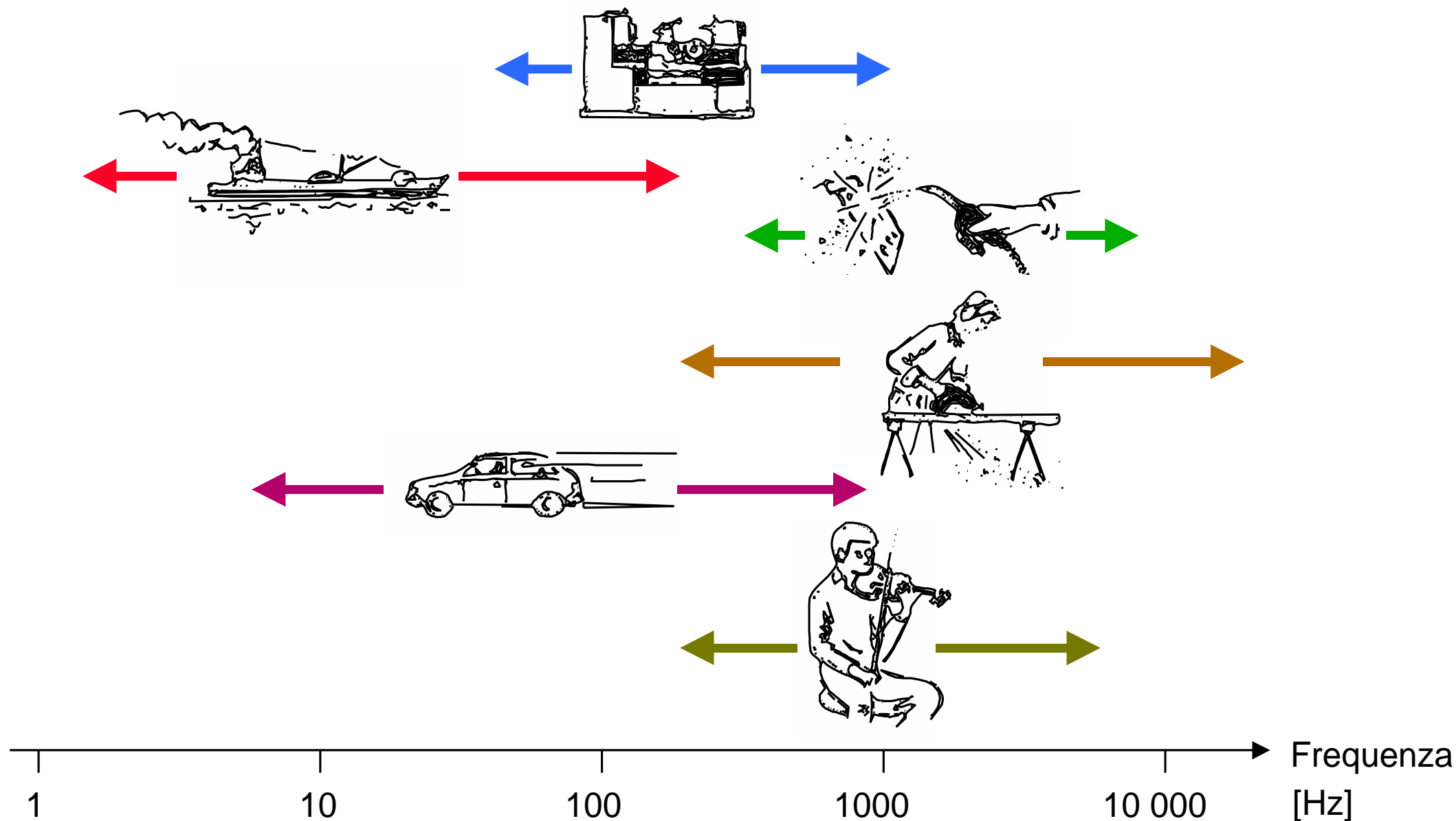
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

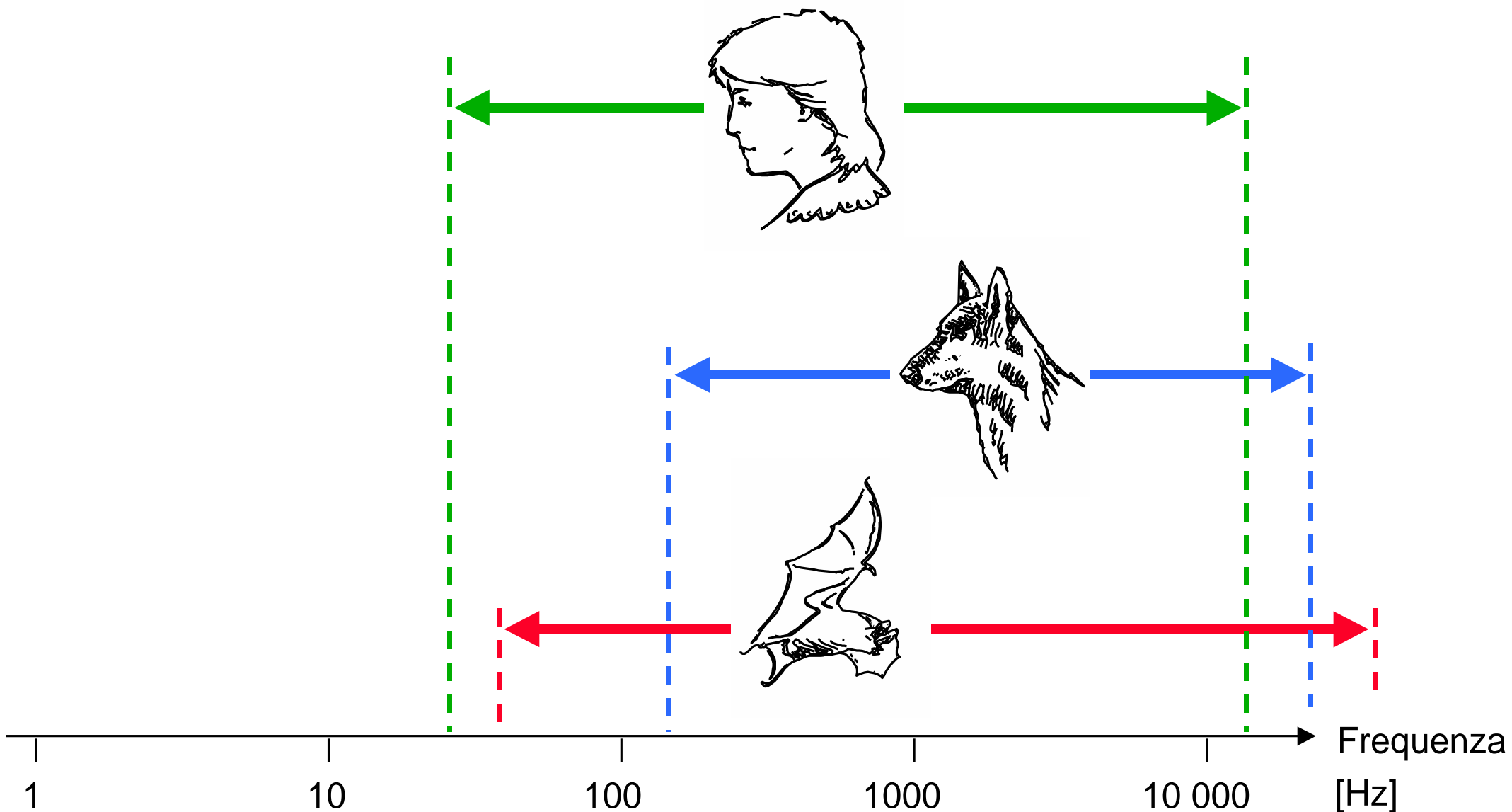


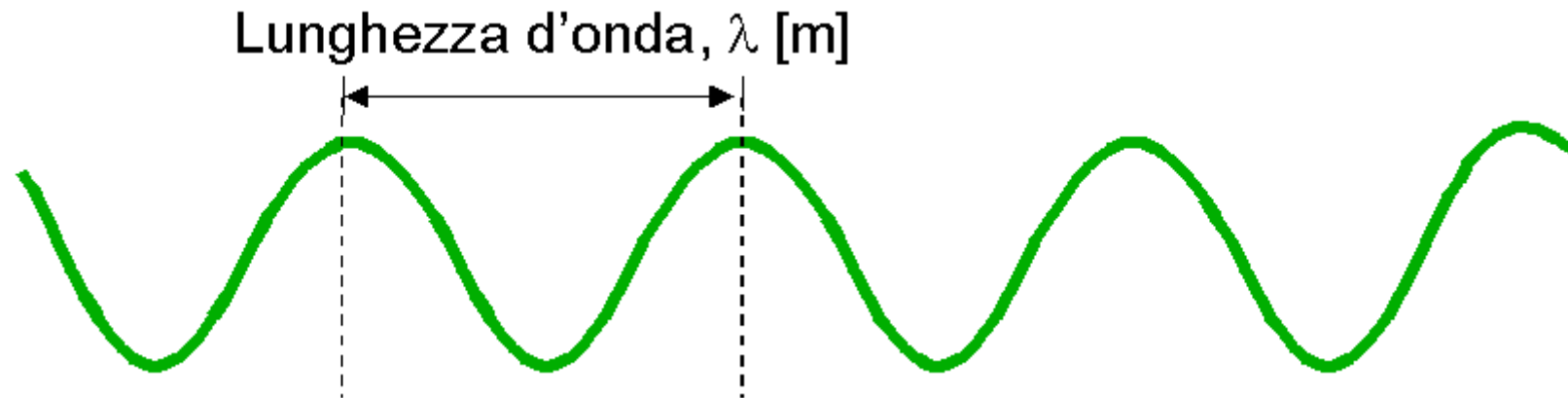
Lunghezza d'onda, λ [m]



Frequenza, f [Hz]



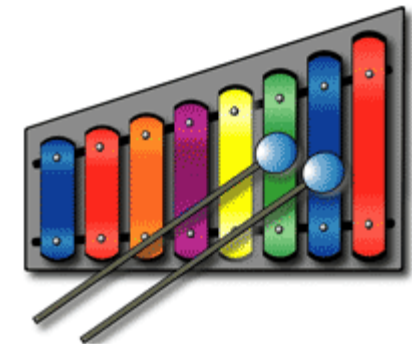




In l'aria ($c = 340$ m/s a 14 °C):

$f = 10$ Hz	$\lambda = 340/10 = 34$ m
$f = 20$ Hz	$\lambda = 340/20 = 17$ m
$f = 50$ Hz	$\lambda = 340/50 = 6,8$ m
$f = 100$ Hz	$\lambda = 340/100 = 3,4$ m
$f = 340$ Hz	$\lambda = 340/340 = 1$ m
$f = 1000$ Hz	$\lambda = 340/1000 = 0,34$ m
$f = 10000$ Hz	$\lambda = 340/10000 = 0,034$ m

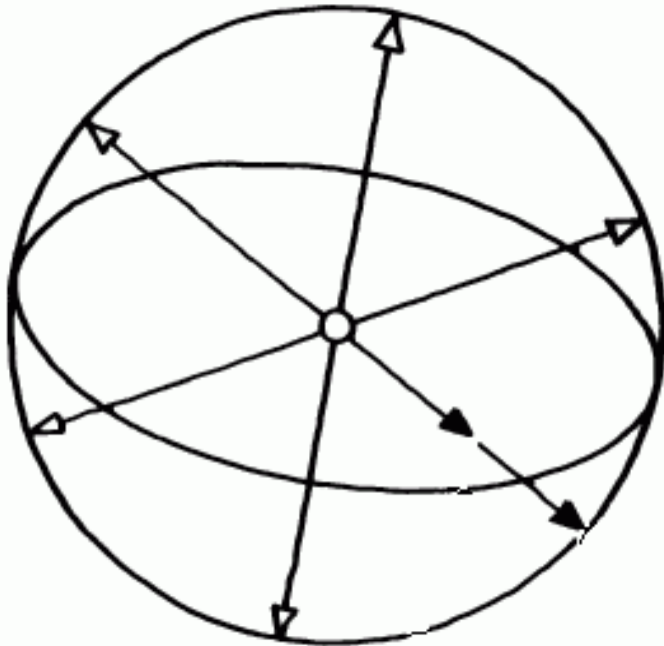
$$\lambda = \frac{c}{f}$$



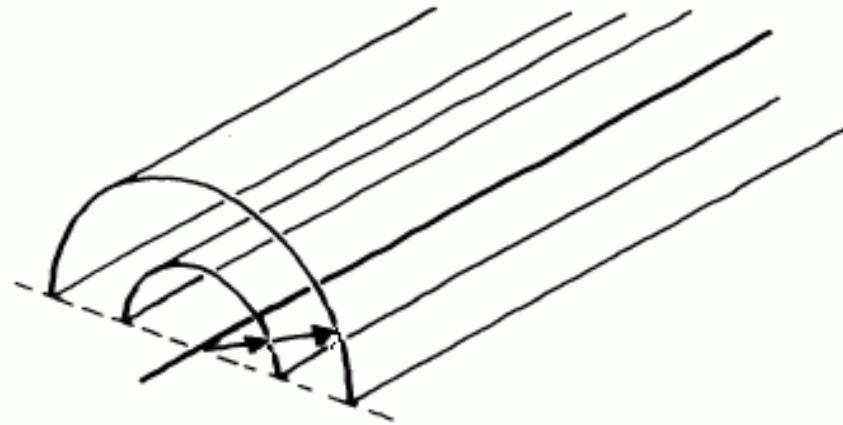
Fissata la frequenza della sorgente, la lunghezza d'onda dipende dalla velocità del suono nel mezzo.

Tipi di onde acustiche:

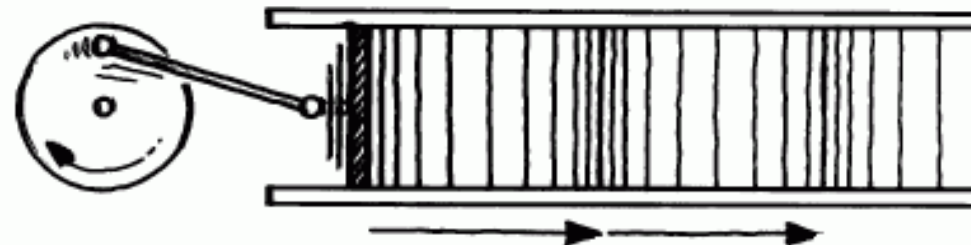
Onde sferiche



Onde cilindriche



Onde piane



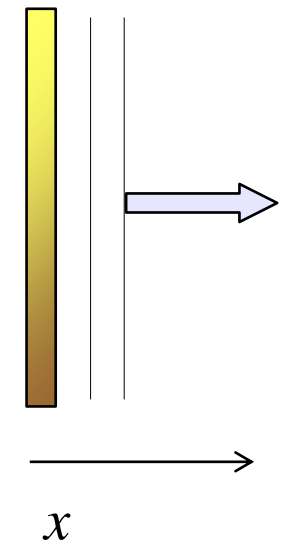
Soluzioni dell'equazione delle onde

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

ONDE PIANE

La soluzione dell'equazione diventa:

$$p(x, t) = P_0 \cos(\omega t - kx) + P_0 \cos(\omega t + kx) = p_+ + p_-$$



$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$c = \lambda f$$

$$\omega = 2\pi f$$

P_0 : ampiezza dell'onda [Pa]
 ω : velocità angolare [rad/s]=[s⁻¹]
 x : posizione nello spazio [m]
 λ : lunghezza d'onda [m]
 k : numero d'onda [rad/m]

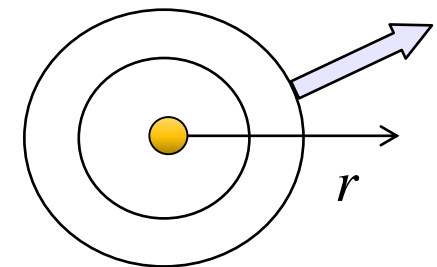
Soluzioni dell'equazione delle onde

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

ONDE SFERICHE

La soluzione dell'equazione diventa:

$$p(x, t) = \frac{1}{r} P'_0 \cos(\omega t - kr) + \frac{1}{r} P'_0 \cos(\omega t + kr) = p_+ + p_-$$

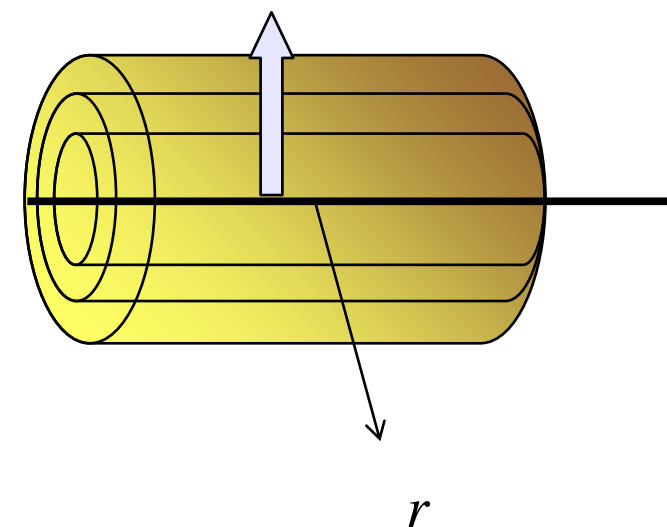
Onde sferiche da $r = 0$ a $r = \infty$ Sorgente sferica
puntiforme

Soluzioni dell'equazione delle onde

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

ONDE CILINDRICHE

Sorgente lineare



La soluzione dell'equazione diventa:

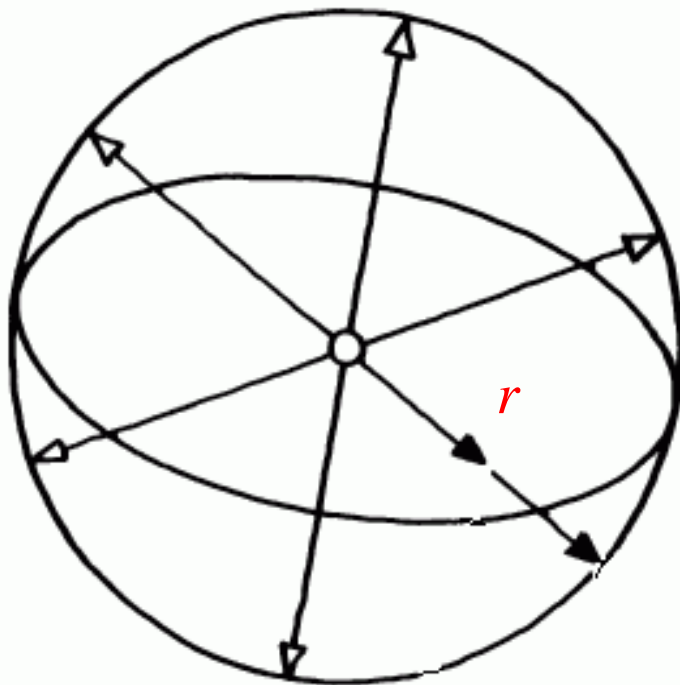
$$p(x, t) = \frac{1}{\sqrt{r}} P'_0 \cos(\omega t - kr) + \frac{1}{\sqrt{r}} P'_0 \cos(\omega t + kr) = p_+ + p_-$$

Onde cilindriche da $r = 0$ a $r = \infty$

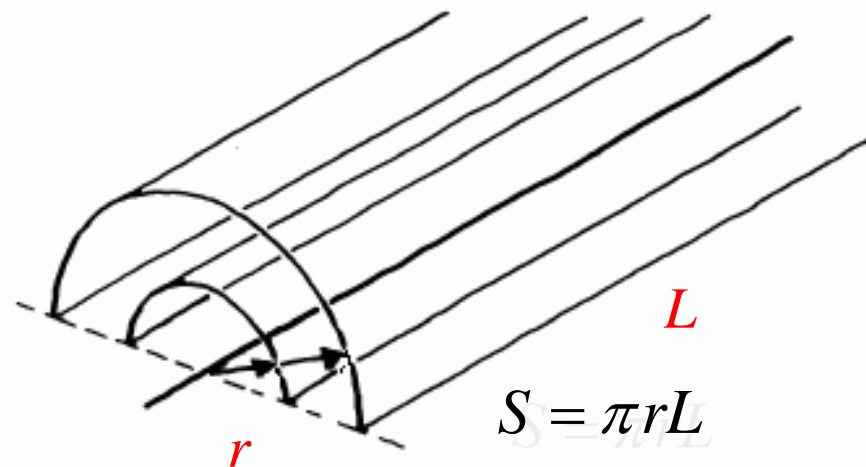
Divergenza geometrica dei differenti tipi di onde acustiche:

Onde cilindriche

Onde sferiche

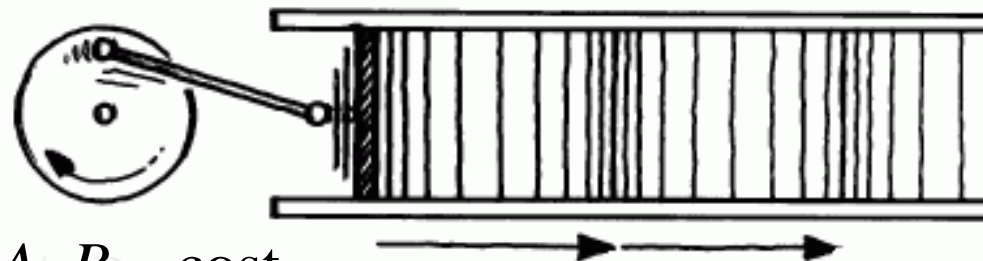


$$S = 4\pi r^2$$

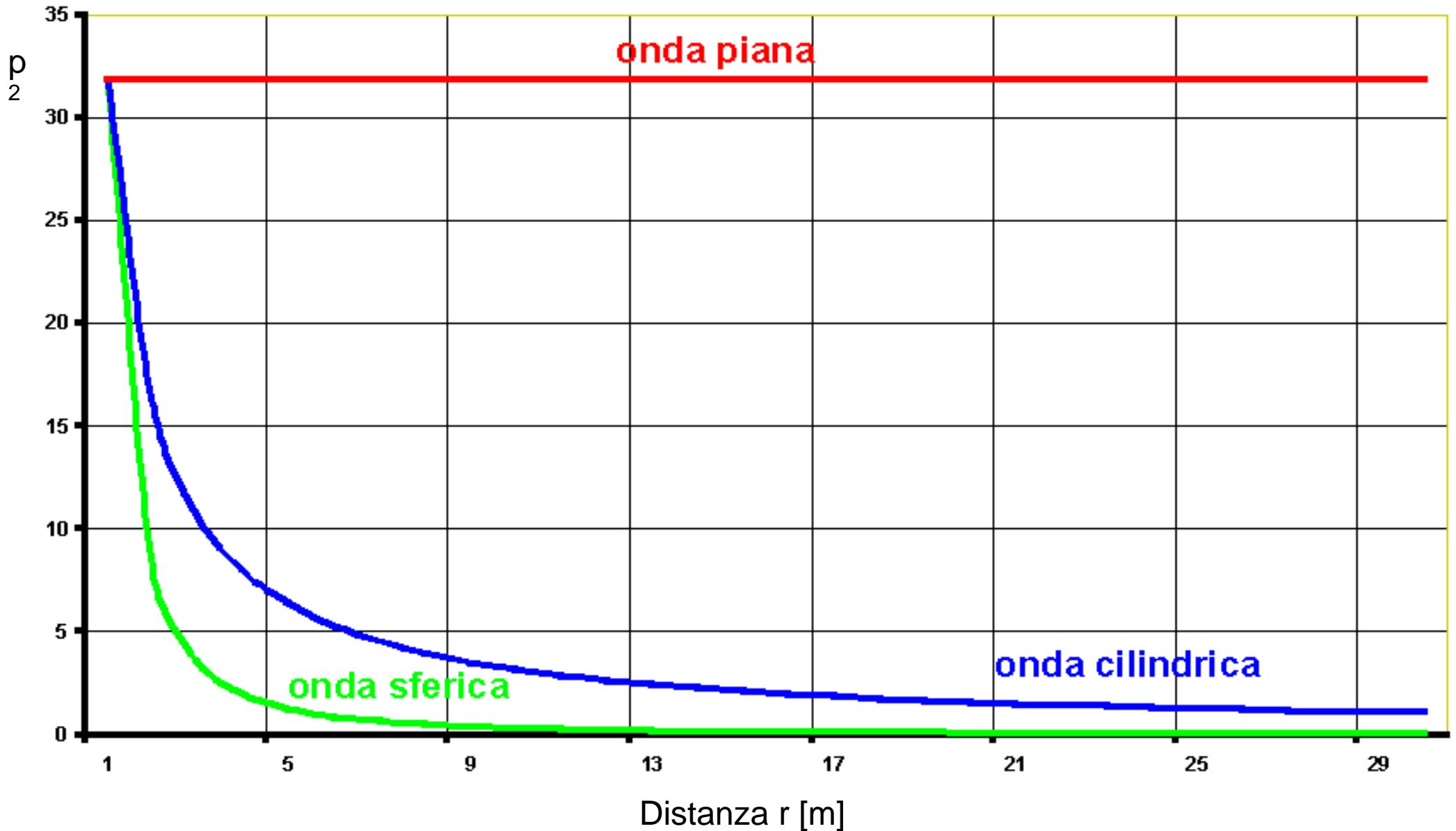


$$S = \pi rL$$

Onde piane



$$S = A \cdot B = \text{cost}$$



Per quantificare i fenomeni acustici si misura la pressione acustica, ovvero la perturbazione generata dall'onda sonora p' , sovrapposta alla pressione statica p_0 . Come già visto, la pressione totale p risulta:

$$p = p_0 + p'; \quad p' \ll p_0$$

D'ora in poi p' si indicherà semplicemente con la lettera p

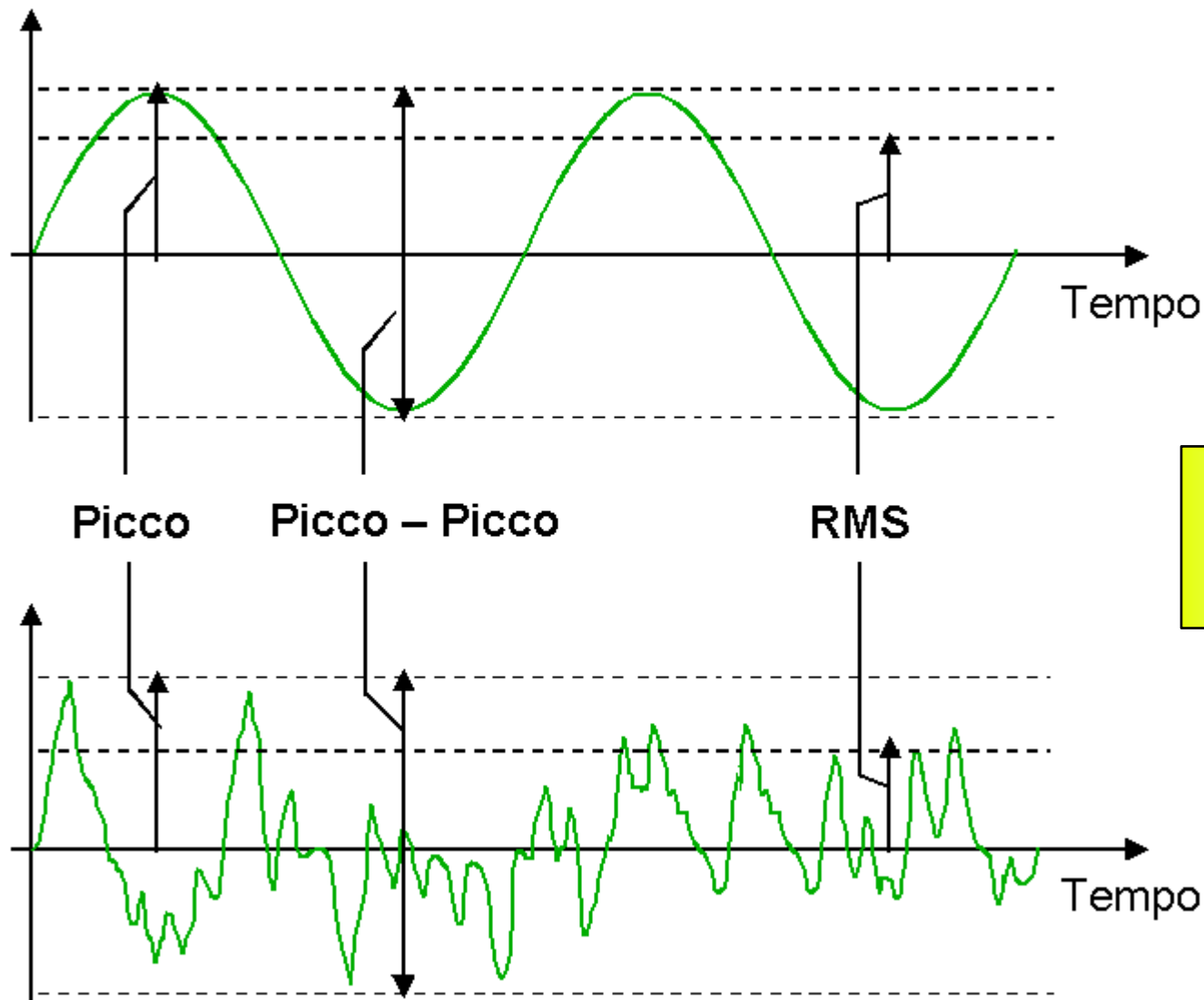
Dalle misure si ottiene direttamente il valore della pressione acustica.

Comunemente i fenomeni sonori presentano un massimo e un minimo simmetrici rispetto allo zero (si pensi ad esempio ad un'onda sinusoidale) e quindi invece del valore di picco si può utilizzare il valore efficace, definito:

$$p_{eff} = p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}$$

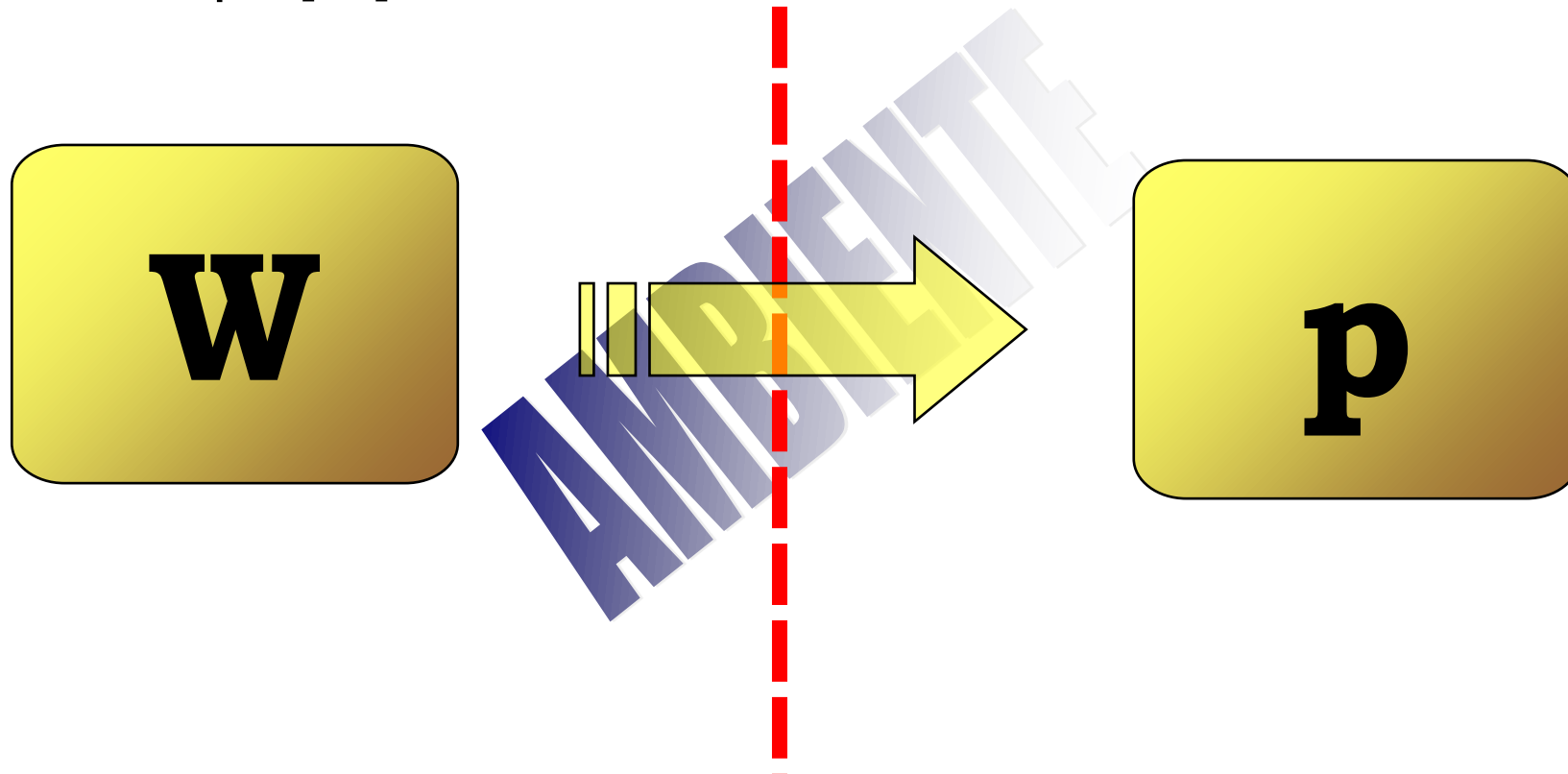
dove T è il tempo di integrazione.

Se la funzione è sinusoidale: $p_{eff} = p_{max} / \sqrt{2}$



$$p_{eff} = p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}$$

La potenza acustica è l'energia emessa dalla sorgente sonora nell'unità di tempo [W]



La potenza acustica è una caratteristica intrinseca alla sorgente
La pressione sonora nell'ambiente dipende dalla posizione in cui la misuro

p: pressione acustica

u: velocità delle particelle nella direzione r

Intensità sonora (vettore):

$$\vec{I} = p\vec{u}$$



La potenza acustica si può calcolare (e misurare)
a partire dall'intensità:

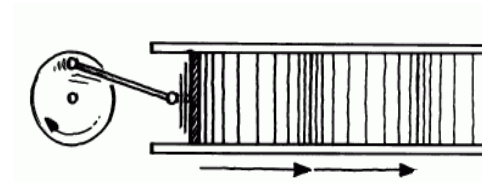
$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{r} dS$$

Legame tra intensità e potenza acustica

$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{r} \, dS = I \cdot S \quad \Longrightarrow \quad I = \frac{W}{S}$$

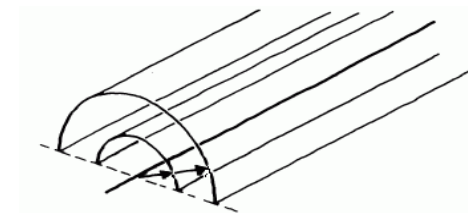
ONDE PIANE

$$S = \text{cost} \quad I = \frac{W}{S} = \text{cost}$$



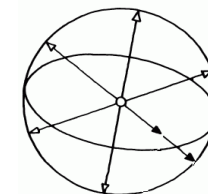
ONDE CILINDRICHE

$$S = \pi r L \quad I = \frac{W}{S} \propto \frac{1}{r}$$



ONDE SFERICHE

$$S = 4\pi r^2 \quad I = \frac{W}{S} \propto \frac{1}{r^2}$$



Impedenza acustica

L'impedenza acustica specifica in un punto dello spazio si definisce:

$$\vec{z} = \frac{\vec{p}}{\vec{u}} \quad \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{s}} \right] = [\text{rayl}]$$

E' una grandezza complessa e quantifica la resistenza che il mezzo oppone al passaggio dell'onda acustica.

Per le onde piane (e si noti che anche le onde sferiche e cilindriche a grande distanza dalla sorgente possono essere approssimate come onde piane) vale:

$$\vec{z} = \rho_0 c$$

detta impedenza acustica caratteristica. ρ_0 è la densità dell'aria.

In condizioni normali di temperatura e pressione $(\rho_0 c)_{20^\circ} = 415 \text{ rayl}$

Esempi di impedenza acustica in vari mezzi

Metalli			
Materiale	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	z (rayl) $\times 10^{-5}$
Acciaio	5000	7800	390
Argento	5100	2700	138
Nickel	4970	8700	430
Oro	2000	19300	386
Ottone	3500	8400	295
Piombo	1220	11400	138
Platino	2650	21400	572
Rame	3560	8900	317
Stagno	2500	7300	182
Zinco	3700	7000	259

Non metalli			
Materiale	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	z (rayl) $\times 10^{-5}$
Ardesia	4500	3000	135
Avorio	3010	1800	54
Gomma	54	1000	0,04
Granito	3950	2700	107
Marmo	3810	2700	103
Mattone	3650	1800	66
Vetro	5500	2600	142
Sughero	500	240	0,04

Liquidi			
Materiale	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	z (rayl) $\times 10^{-5}$
Acqua 13°C	1441	1000	14,4
Alcool	1240	800	9,9
Benzina	1166	900	10,5

Gas			
Materiale	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	z (rayl) $\times 10^{-5}$
Aria 0°C	331	1,29	4,28 $\times 10^{-3}$
Aria 20°C	343	1,20	4,15 $\times 10^{-3}$
Aria 39°C	354	1,12	4,00 $\times 10^{-3}$
Azoto	336	1,25	4,2 $\times 10^{-3}$
Ossigeno	317	1,43	4,5 $\times 10^{-3}$
Idrogeno	1269	0,09	1,1 $\times 10^{-3}$



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

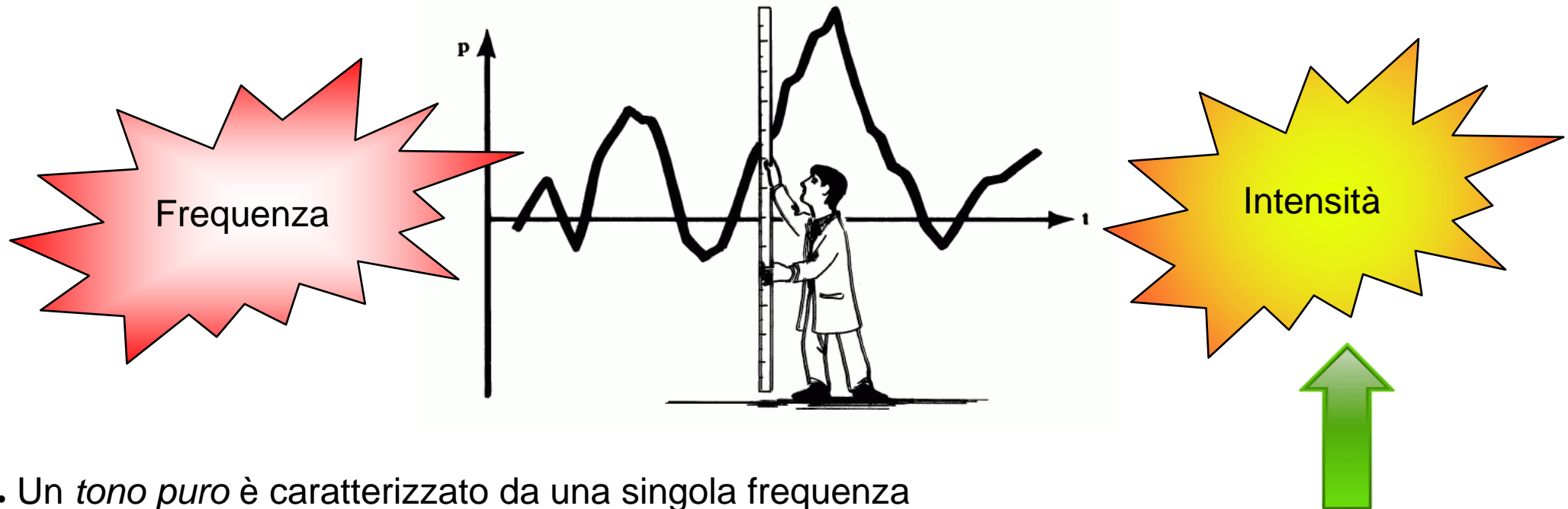
***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

Dispensa n. 2

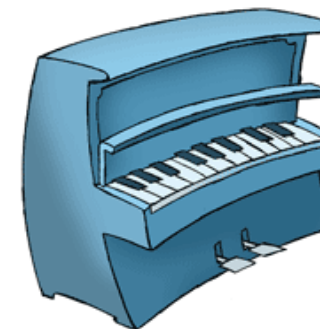
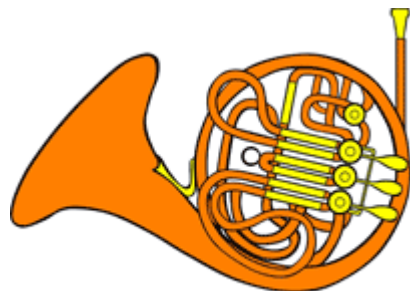
LIVELLI SONORI E DEFINIZIONE DI DECIBEL

Docente: Paolo Guidorzi

I suoni sono caratterizzati da due componenti fondamentali:

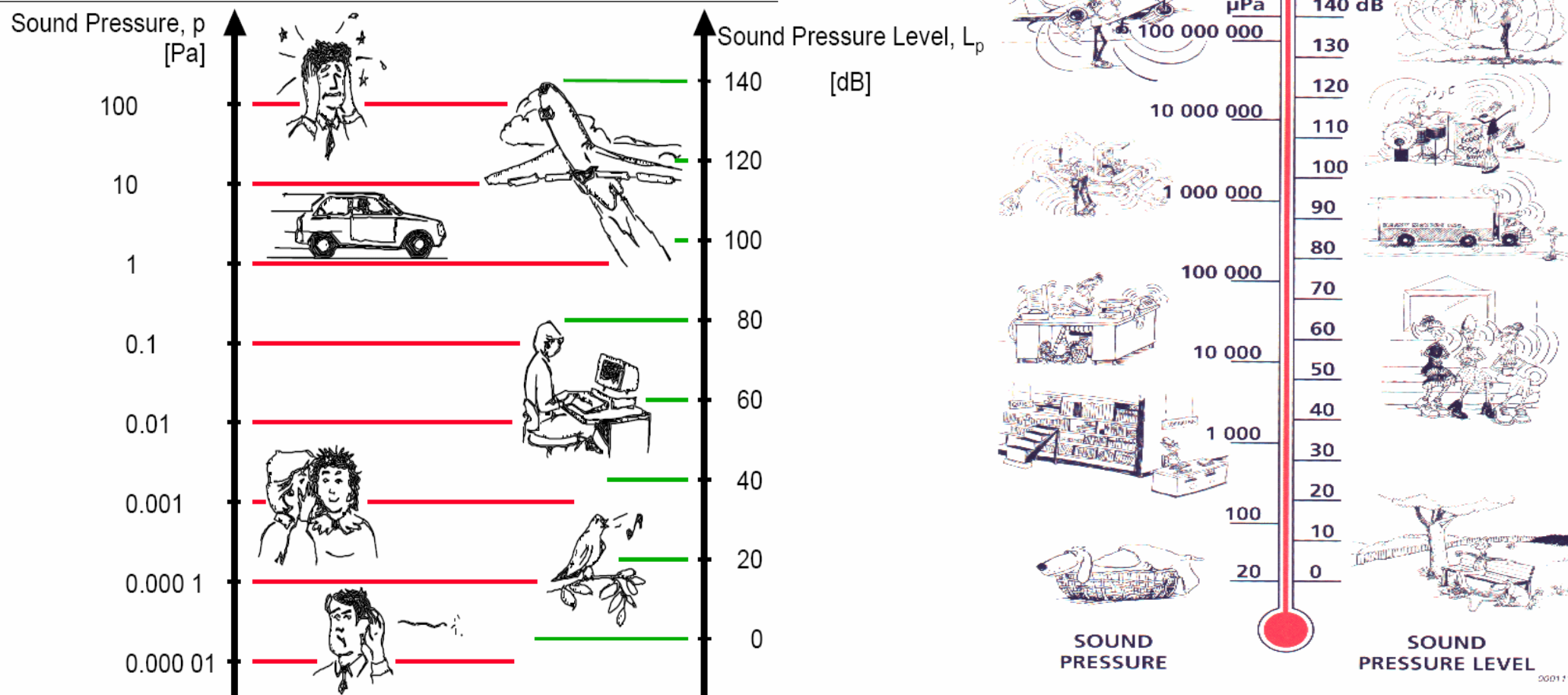


- Un *tono puro* è caratterizzato da una singola frequenza
- I suoni reali sono composti da più frequenze, che ne determinano il *timbro*
- L'intensità di un suono è determinata dall'ampiezza della perturbazione della pressione sonora

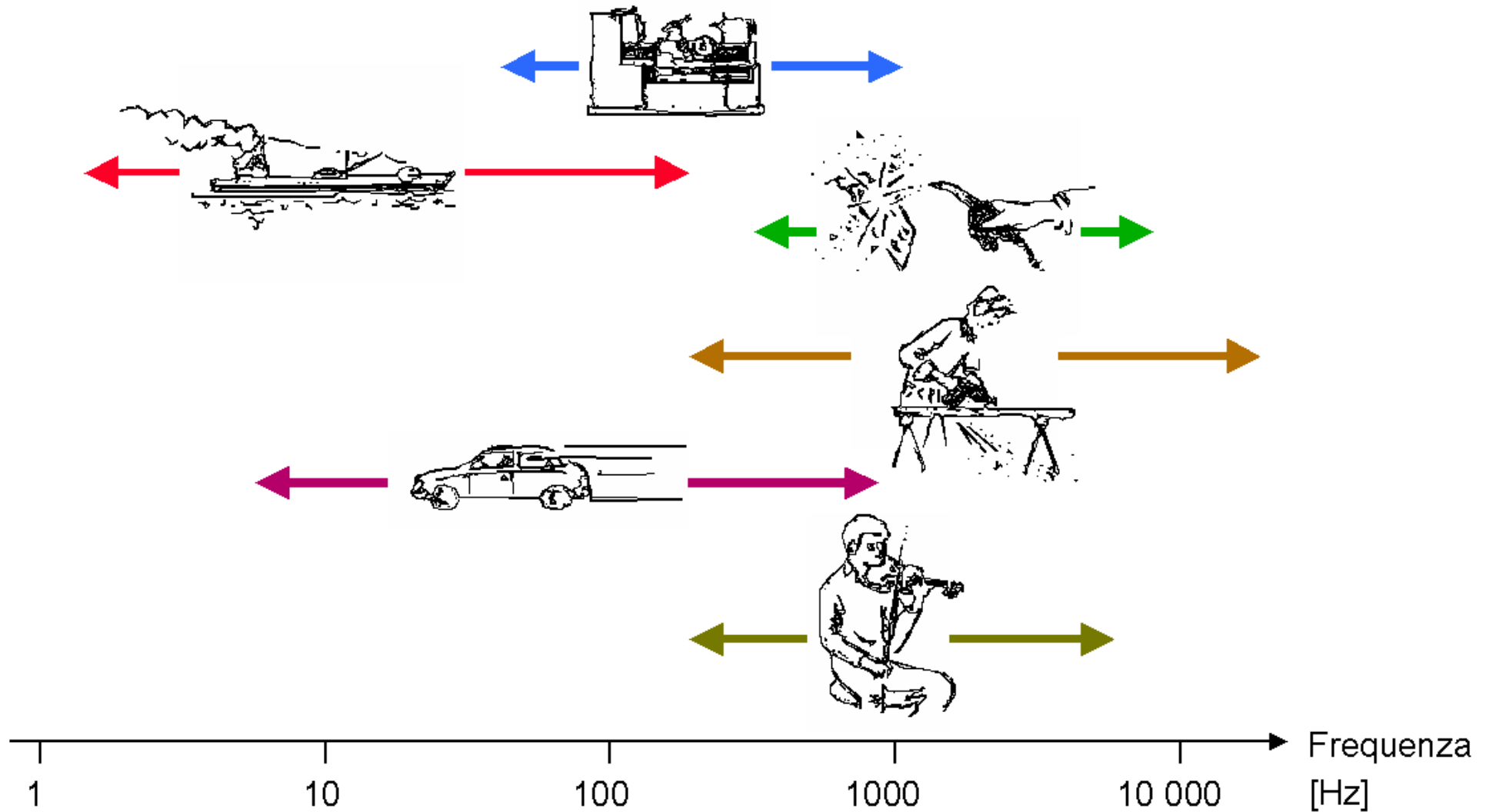


Il sistema uditivo umano medio può udire suoni con ampiezze che variano da 20 milionesimi di Pa (soglia di udibilità) a 100 - 200 Pa (soglia del dolore)

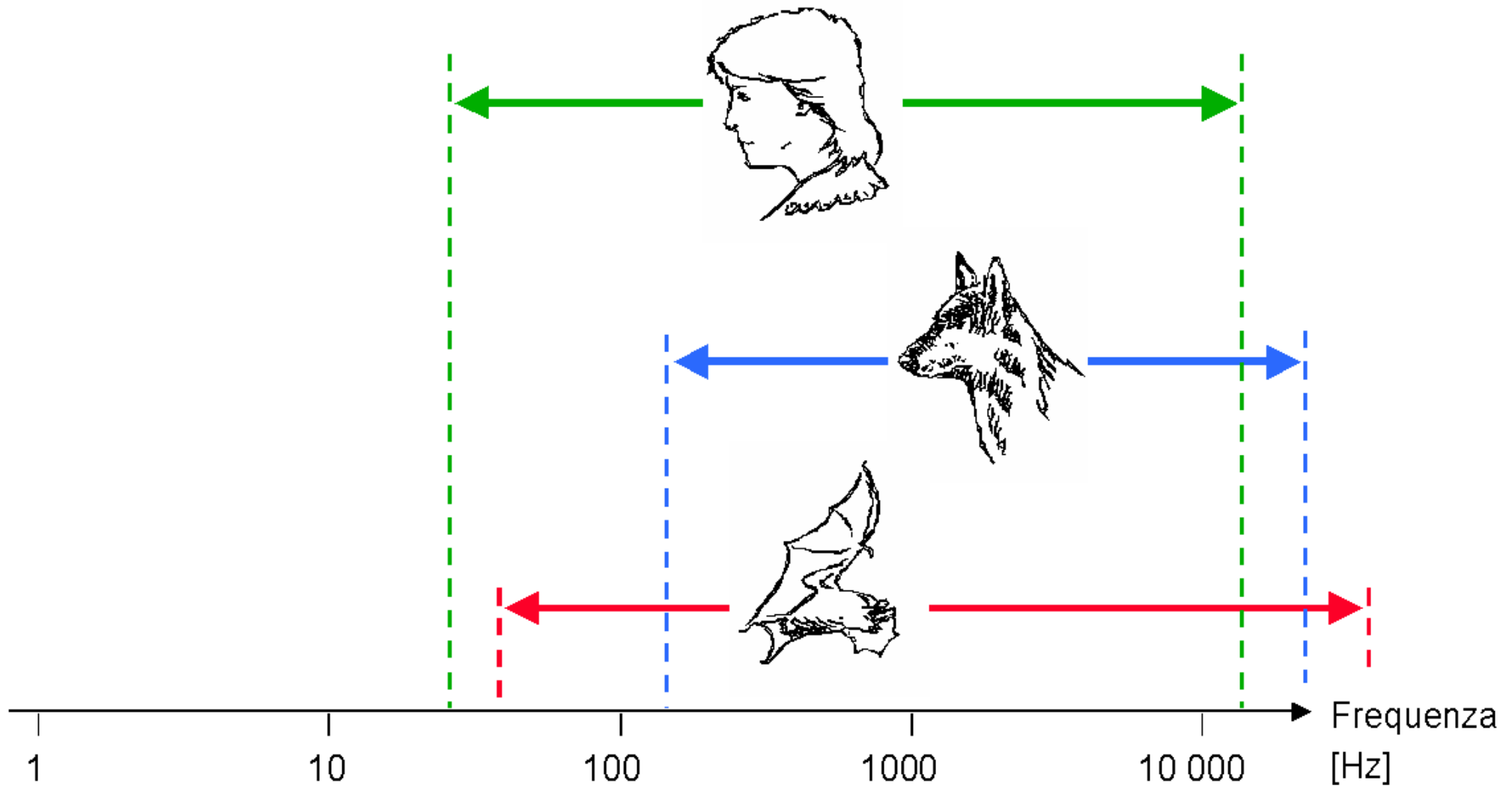
Range of Sound Pressure Levels



Le sorgenti sonore generano suoni in un certo campo di frequenze



Il sistema uditivo umano medio percepisce suoni compresi tra 20 e 20000 Hz.



- I “numeri” in gioco per caratterizzare i suoni coprono un range molto ampio:

$$20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \div 200 \text{ Pa}$$

$$\text{Dinamica: } \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{200}{20 \cdot 10^{-6}} = 10^7 = 10.000.000$$

- La risposta alle intensità dello stimolo uditivo dell'orecchio umano non e' lineare



Scala dei decibel

- La potenza di una sorgente sonora è proporzionale al quadrato della pressione acustica.

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 c} \quad \longrightarrow \quad W = I \cdot S \propto p_{eff}^2$$

- Si misura p (efficace) ma per caratterizzare l'energia associata al fenomeno sonoro si utilizza p^2

$$p(t) \Rightarrow p^2(t)$$

- Si normalizza per il quadrato del valore di riferimento p_0 corrispondente alla soglia di udibilità

$$\Rightarrow \frac{p^2(t)}{p_0^2} \quad p_0 = 20 \mu Pa$$

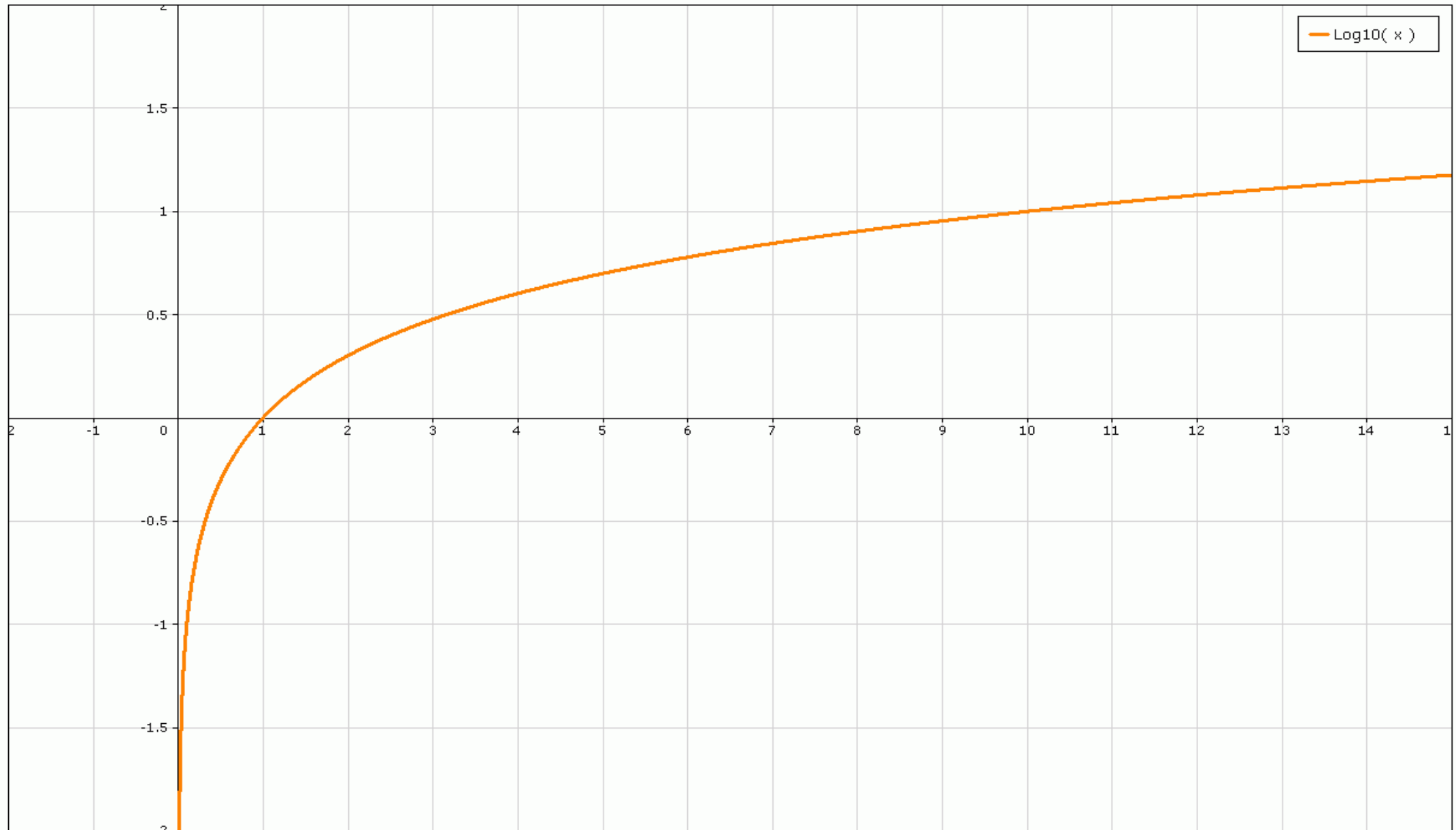
- Si comprime la dinamica con la funzione logaritmo

$$\Rightarrow \log_{10} \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2 \quad \text{bel [B]}$$

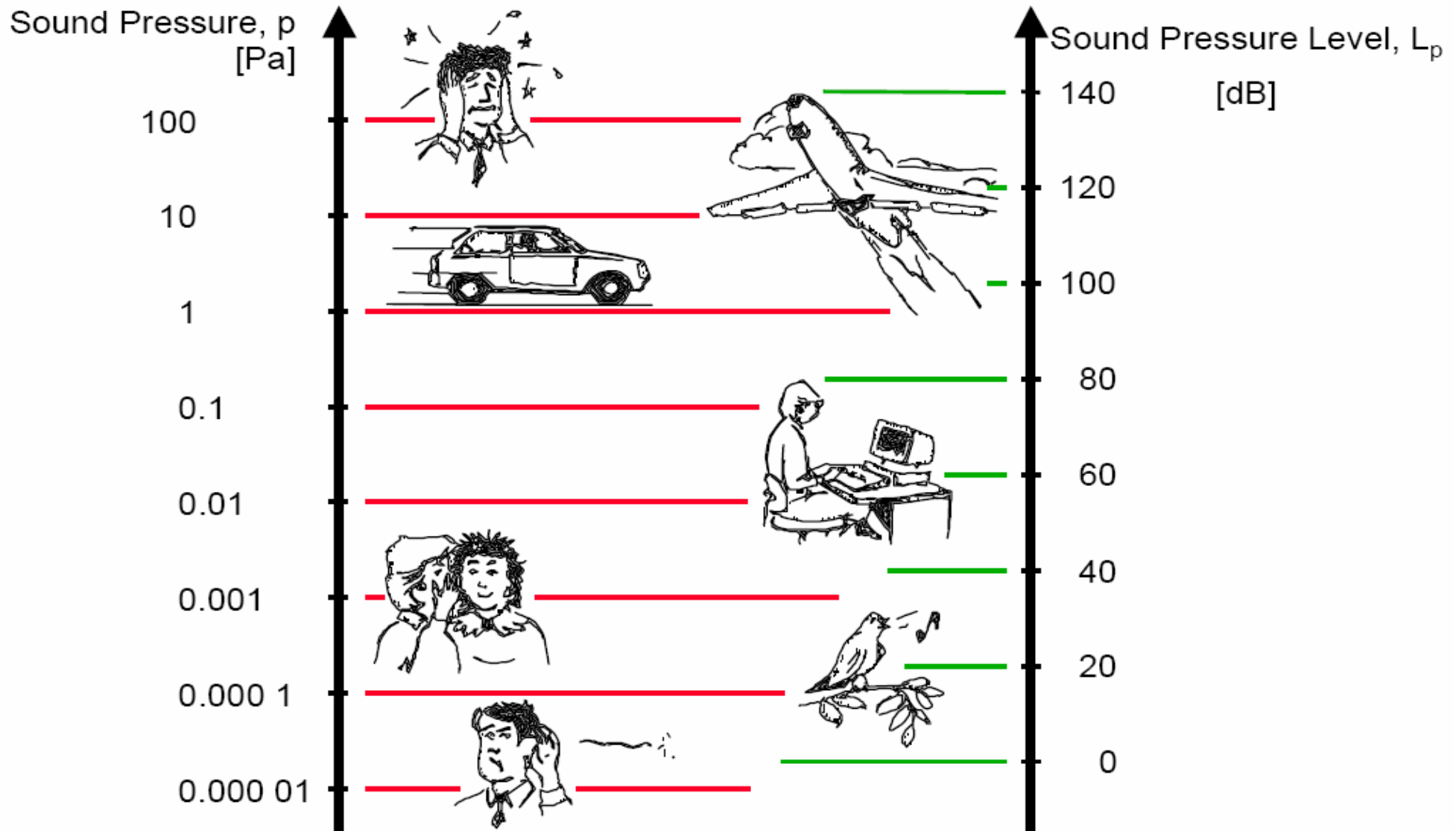
- Si espande di nuovo la dinamica di un fattore 10

$$\Rightarrow L_p = 10 \log_{10} \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2 = 20 \log_{10} \left[\frac{p(t)}{p_0} \right] \quad \text{decibel [dB]}$$





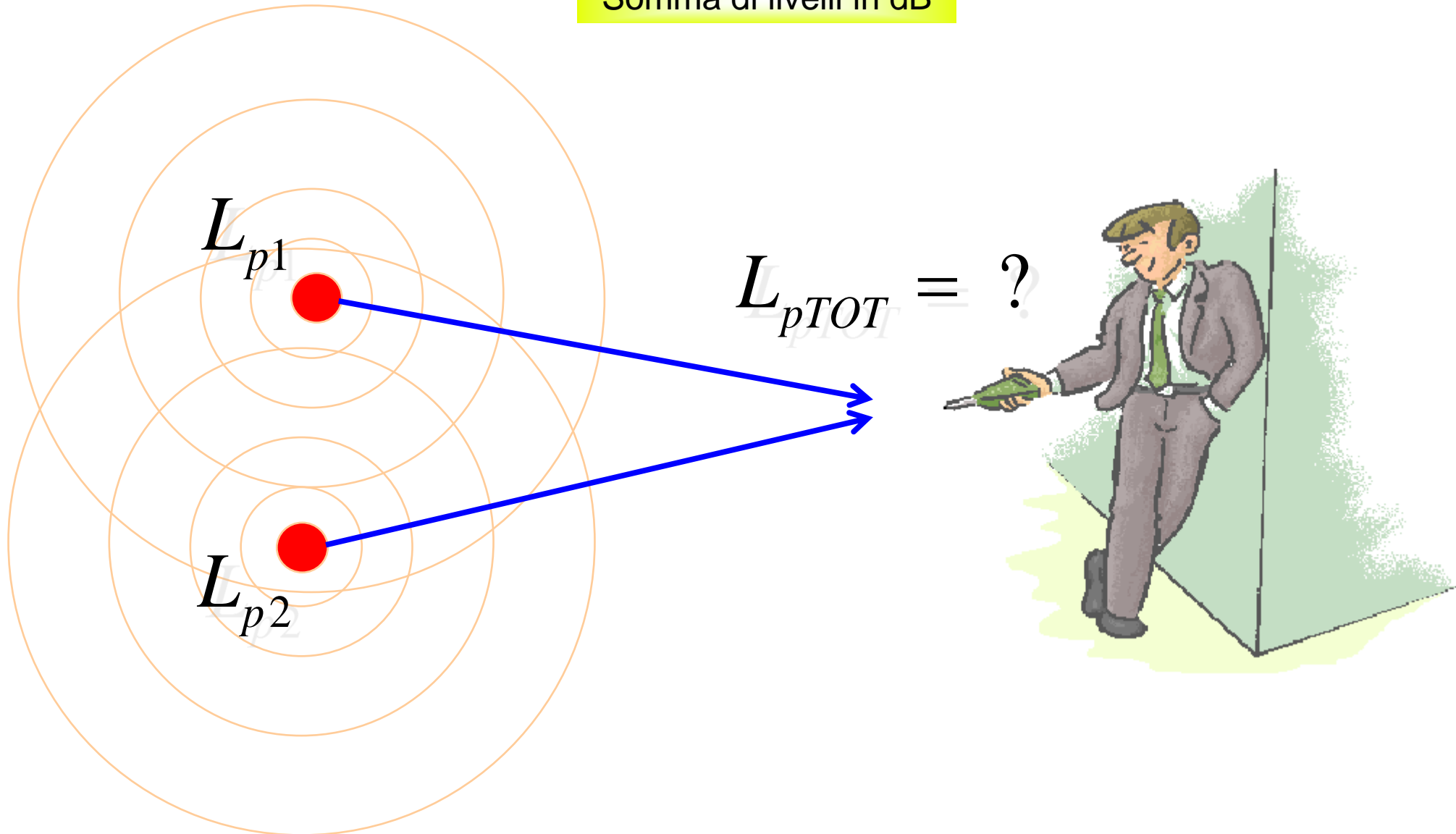
Range of Sound Pressure Levels

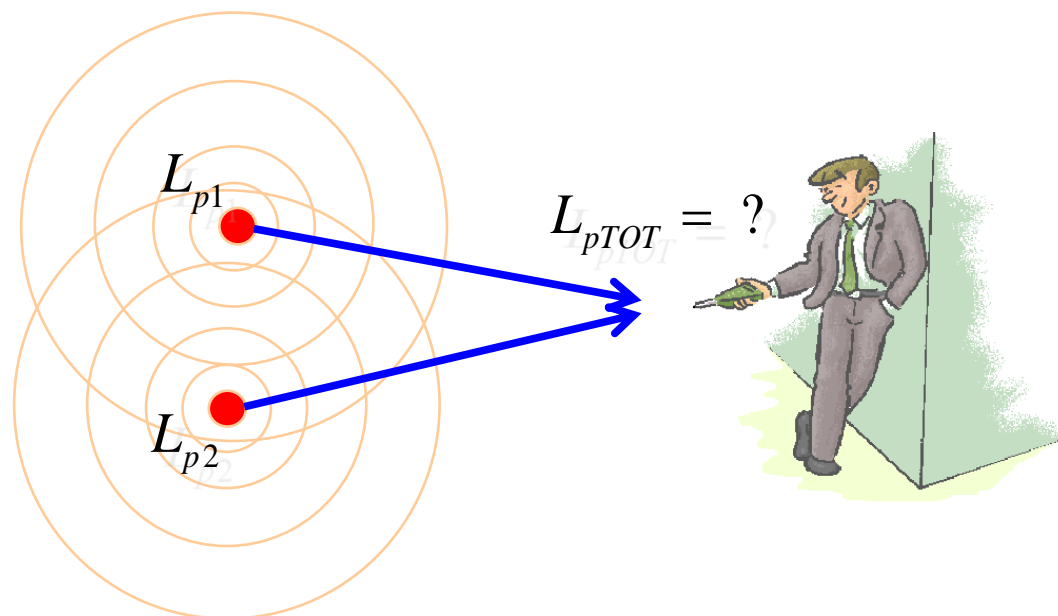




Variazione del Livello Sonoro (dB)	Variazione della Sensazione percepita
3	Appena percepibile
5	Differenza percettibile
10	Forte il doppio (o 1/2)
15	Grandi variazioni
20	Forte 4 volte (o 1/4)

Somma di livelli in dB





$$L_{p1} = 80 \text{ dB}$$

$$L_{p2} = 80 \text{ dB}$$

$$L_{pTOT} = 160 \text{ dB} ?$$

NO!



I livelli in dB non si sommano direttamente ma occorre fare la somma dei contenuti energetici

Proprietà dei logaritmi

$$\log_{10}(x \cdot y) = \log_{10}(x) + \log_{10}(y)$$



$$\log_{10}\left(\frac{x}{y}\right) = \log_{10}(x) - \log_{10}(y)$$

OK

$$\log_{10}(x)^y = y \cdot \log_{10}(x)$$



$$\log_{10}(x \pm y) = \log_{10}(x) \pm \log_{10}(y)$$

$$\log_{10}(x \cdot y) = \log_{10}(x) \cdot \log_{10}(y)$$

NO!

$$L_p = 10 \log_{10} \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2 \quad \longrightarrow \quad \frac{L_p}{10} = \log_{10} \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2 \quad \longrightarrow \quad 10^{\frac{L_p}{10}} = \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2$$

$$\longrightarrow \quad p^2(t) = p_0^2 \cdot 10^{\frac{L_p}{10}} \quad \text{Contenuto energetico}$$



$$p_{TOT}^2(t) = p_1^2(t) + p_2^2(t) = p_0^2 \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right)$$

$$L_{pTOT} = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{TOT}^2(t)}{p_0^2} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{p_1^2(t) + p_2^2(t)}{p_0^2} \right) = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right)$$

$$L_{pTOT} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right)$$

$$L_{p1} = 80 \text{ dB}$$

$$L_{p2} = 80 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} L_{pTOT} &= 10 \log_{10} \left(10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{80}{10}} \right) = 10 \log_{10} (10^8 + 10^8) = 10 \log_{10} (2 \cdot 10^8) = \\ &= 10 \log_{10} (2) + 10 \log_{10} (10^8) = 10 \cdot 0,3 + 8 \cdot 10 \log_{10} (10) = 3 + 80 \cdot 1 = 83 \end{aligned}$$



$$80 \text{ dB} + 80 \text{ dB} = 83 \text{ dB}$$

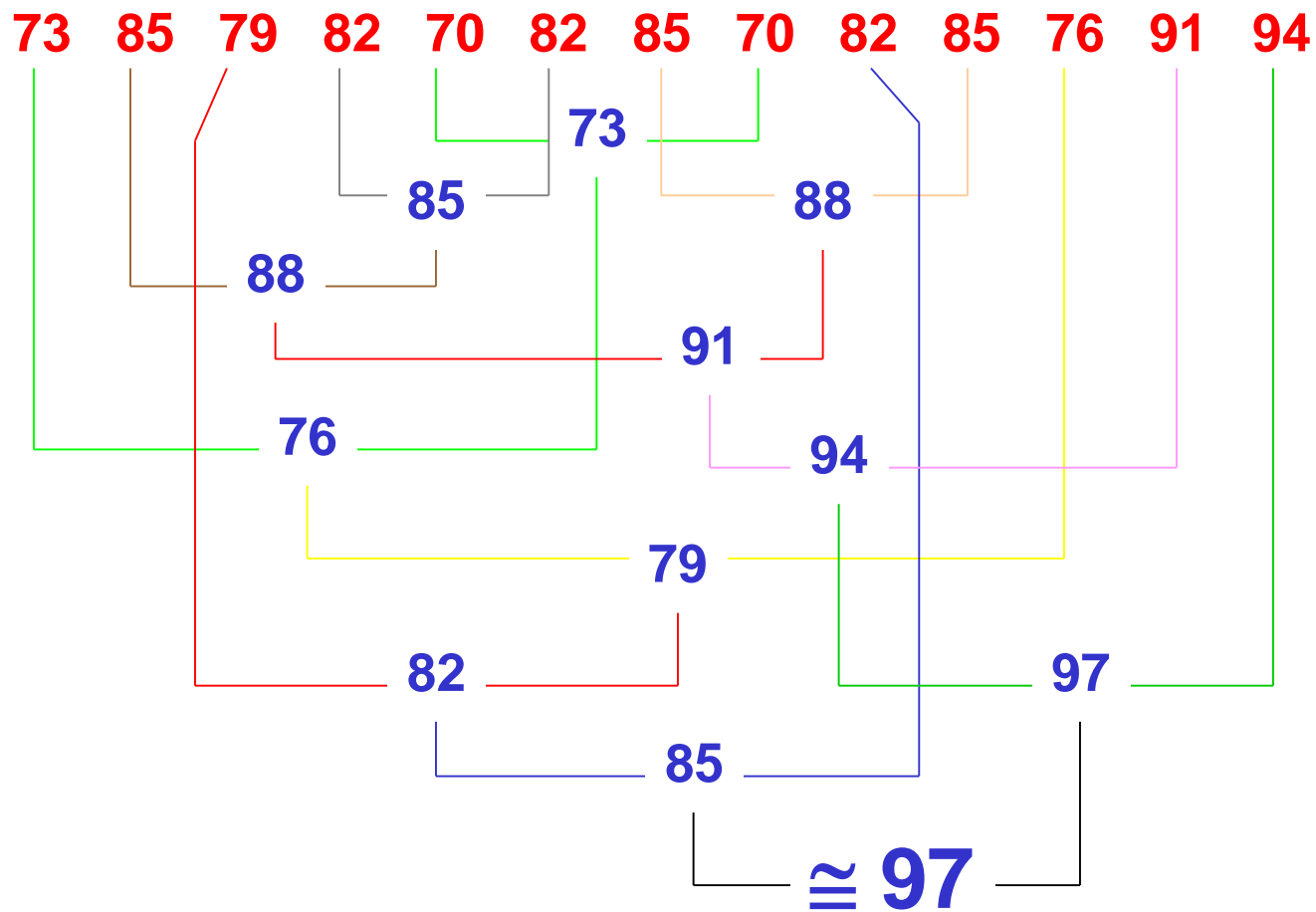


Data la sottostante serie di L_p in dB, calcolare la somma risultante:

73 85 79 82 70 82 85 70 82 85 76 91 94

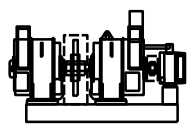
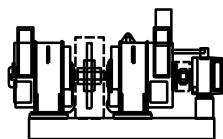
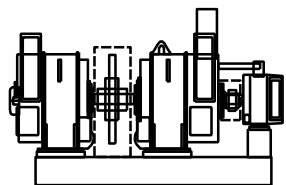
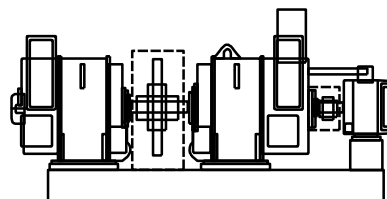
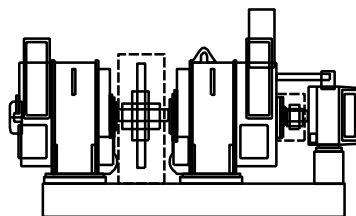


Data la sottostante serie di L_p in dB, calcolare la somma risultante:



Se si devono sommare più sorgenti, si effettua la somma energetica:

$$L_{pTOT} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pN}}{10}} \right) = 10 \log_{10} \sum_{k=1}^N 10^{\frac{L_{pk}}{10}}$$

**S₁****S₂****S₃****S₆****S₅****S₄**

Dati:

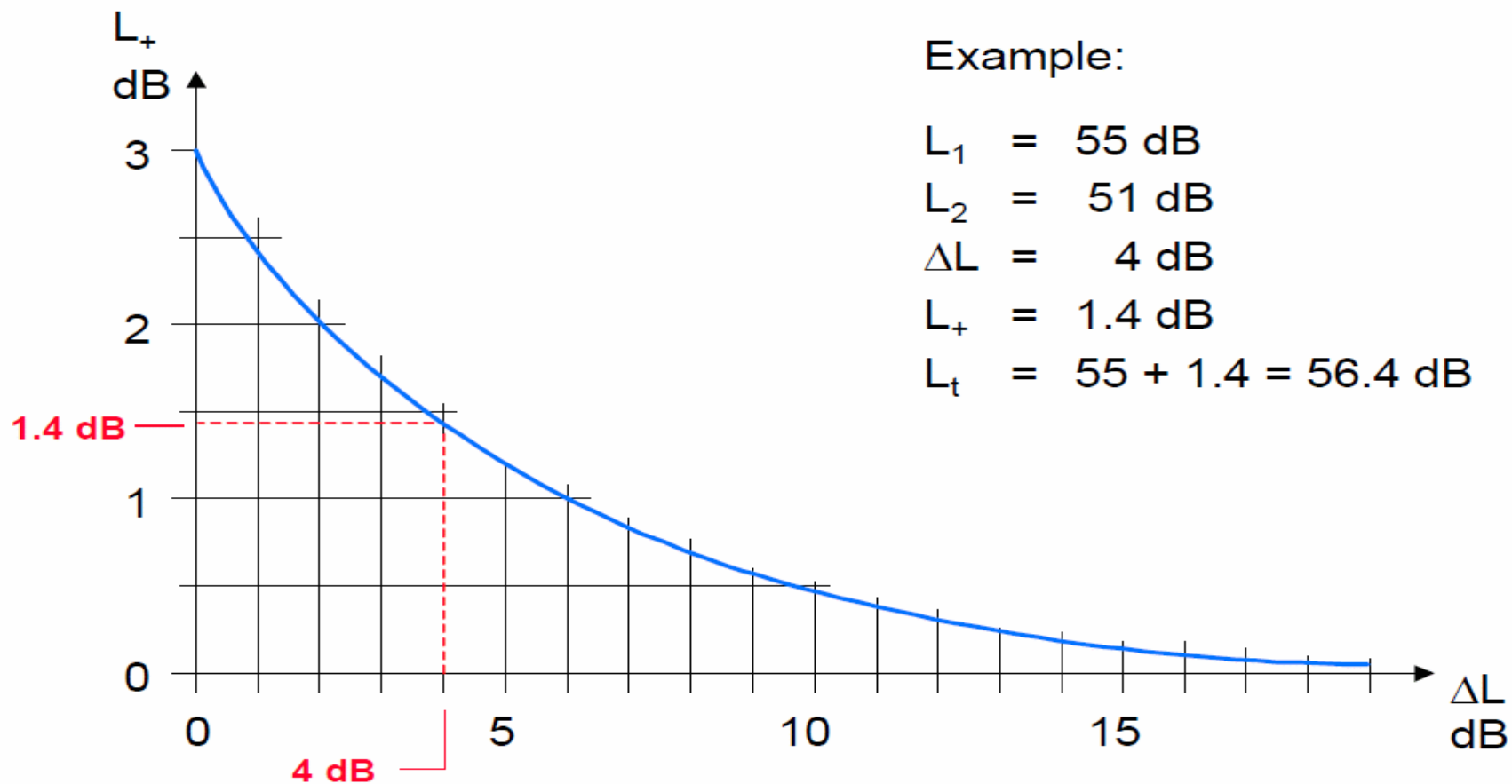
$$L_{p1} = 80 \text{ dB} \quad L_{p4} = 85 \text{ dB}$$

$$L_{p2} = 83 \text{ dB} \quad L_{p5} = 90 \text{ dB}$$

$$L_{p3} = 87 \text{ dB} \quad L_{p6} = 77 \text{ dB}$$

$$L_{p \text{ tot}} = 93.4 \text{ dB}$$

Addition of dB Levels



Example:

$$L_1 = 55 \text{ dB}$$

$$L_2 = 51 \text{ dB}$$

$$\Delta L = 4 \text{ dB}$$

$$L_+ = 1.4 \text{ dB}$$

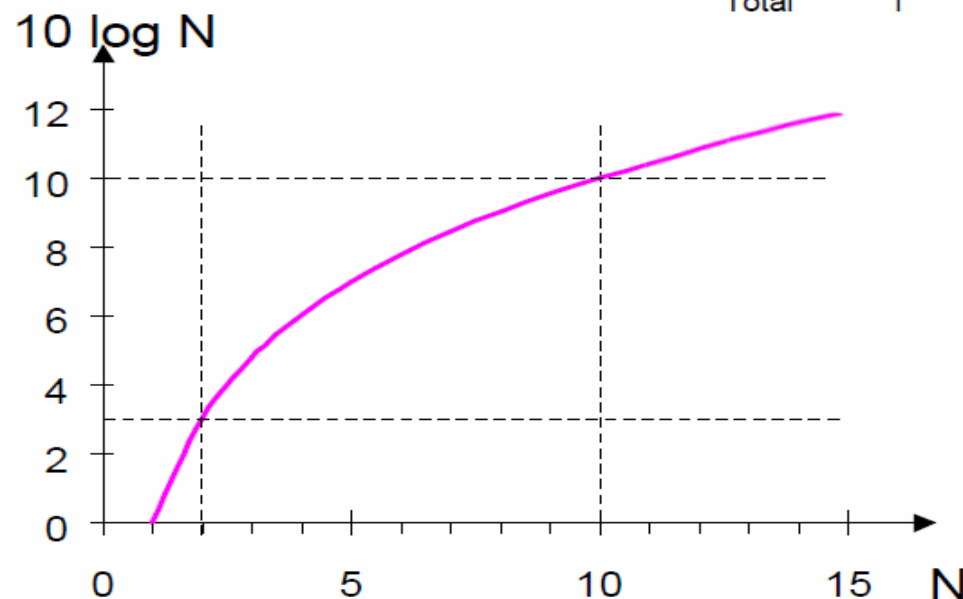
$$L_t = 55 + 1.4 = 56.4 \text{ dB}$$

Addition of many dB values

Addition of sound levels : $L_1 + L_2 \dots + L_N = ?$

For $L_1 = L_2 = L_3 \dots = L_N$

$$L_{\text{Total}} = L_1 + 10 \log N$$



Examples:

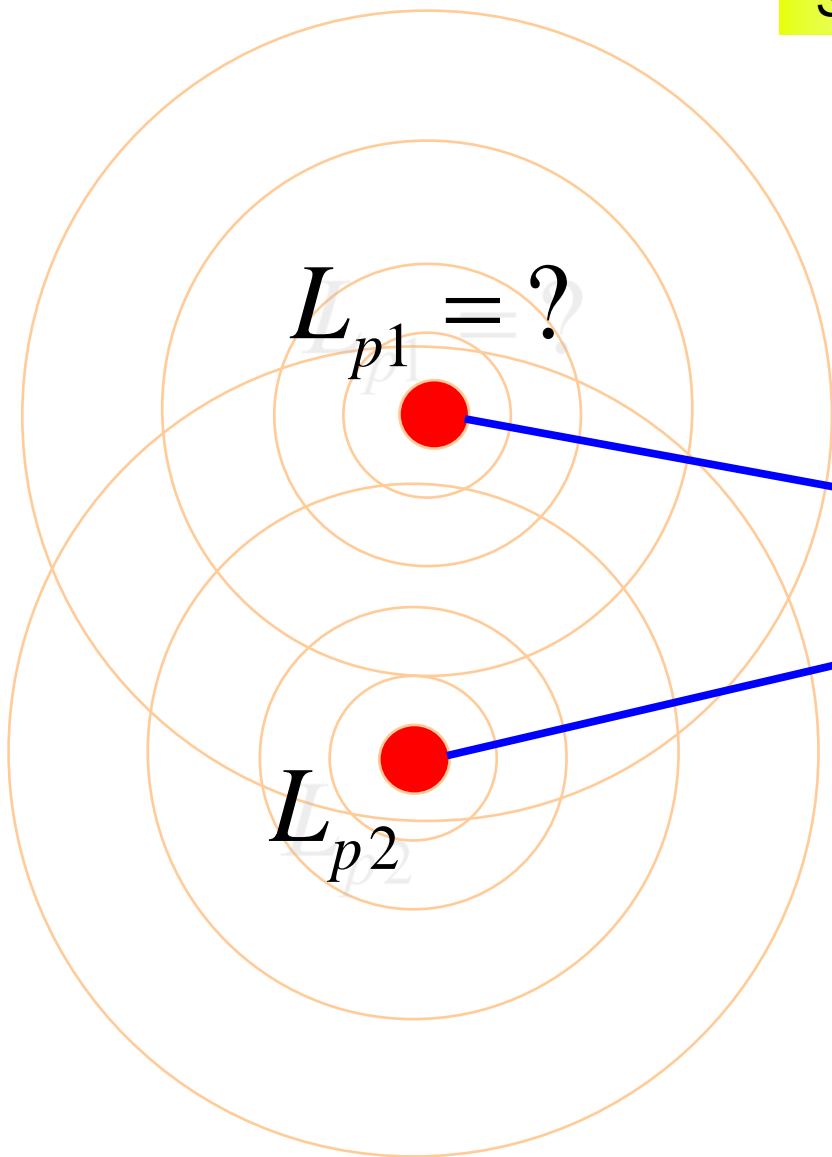
$$N = 2: L_{\text{Total}} = L_1 + 3 \text{ dB}$$

$$N = 10: L_{\text{Total}} = L_1 + 10 \text{ dB}$$

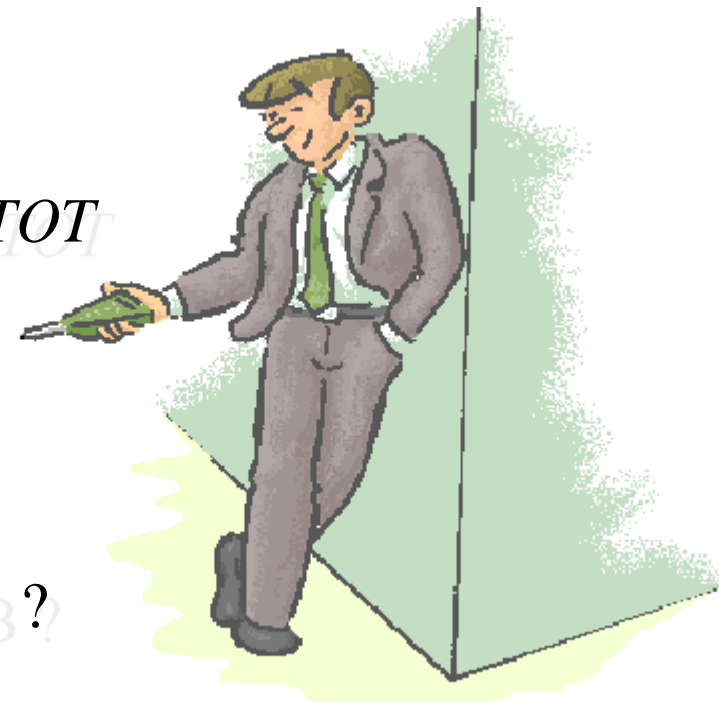
Cose da ricordare a proposito della somma di livelli in dB

- Sommando due livelli uguali (raddoppio di potenza sonora) il livello in dB aumenta di 3 dB
- Un incremento di 3 dB può derivare da un raddoppio di potenza di una sorgente o dal raddoppio del numero di sorgenti
- Un decremento di 3 dB può derivare dal dimezzamento della potenza di una sorgente o dal dimezzamento del numero di sorgenti
- Se la differenza in dB tra due livelli è maggiore di 10 dB allora la loro somma sarà circa uguale al livello più alto (provare a fare il calcolo usando la formula)
- La somma delle energie va effettuata quando le sorgenti non sono coerenti (nessuna relazione di fase tra loro). Se due sorgenti sono di uguale potenza, coerenti e in fase, la loro somma porta a un incremento di livello in dB di 6 dB.
- 0 dB non significa silenzio! Corrisponde alla soglia di udibilità umana media.

Sottrazione di livelli in dB



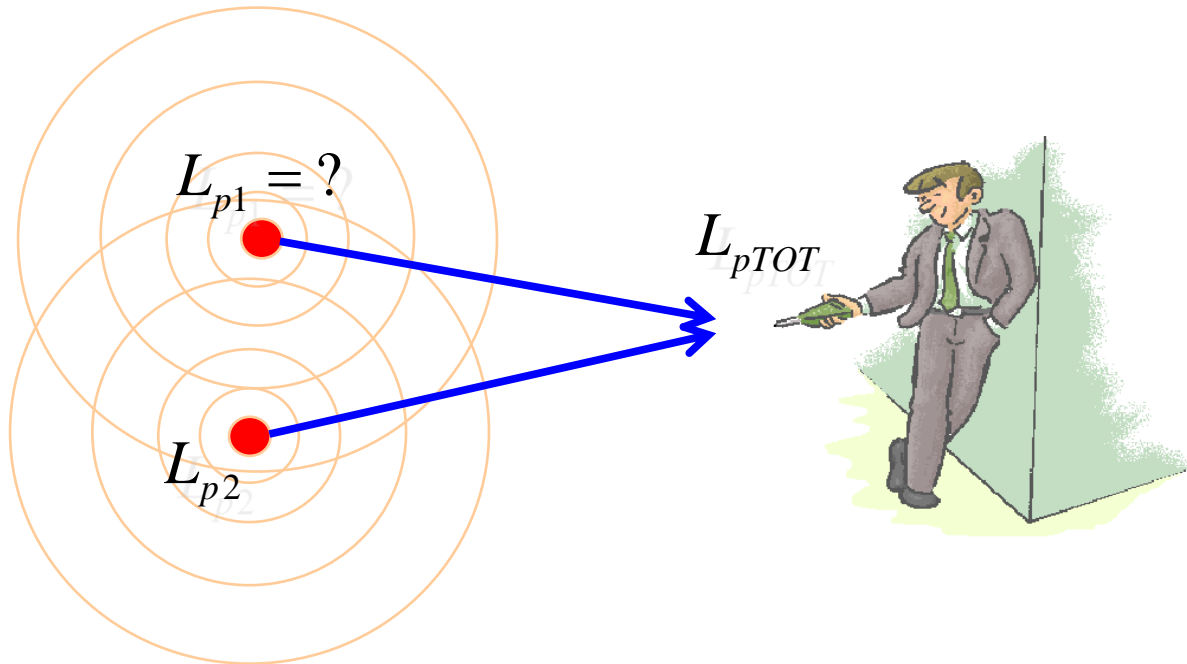
L_{pTOT}



$L_{pTOT} = 80 \text{ dB} ?$

$L_{p2} = 77 \text{ dB}$

$L_{p1} = ?$



$$L_{pTOT} = 80 \text{ dB} ?$$

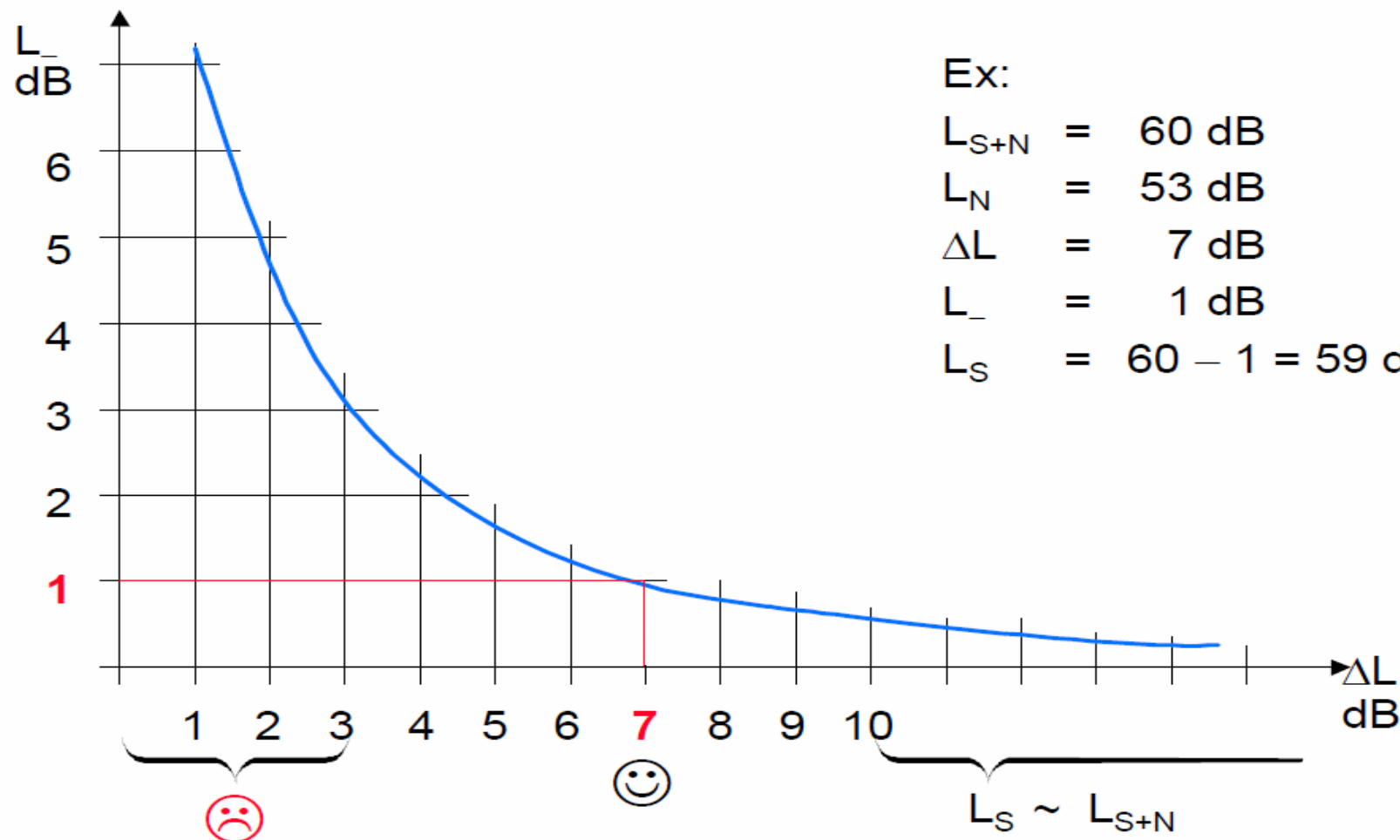
$$L_{p2} = 77 \text{ dB}$$

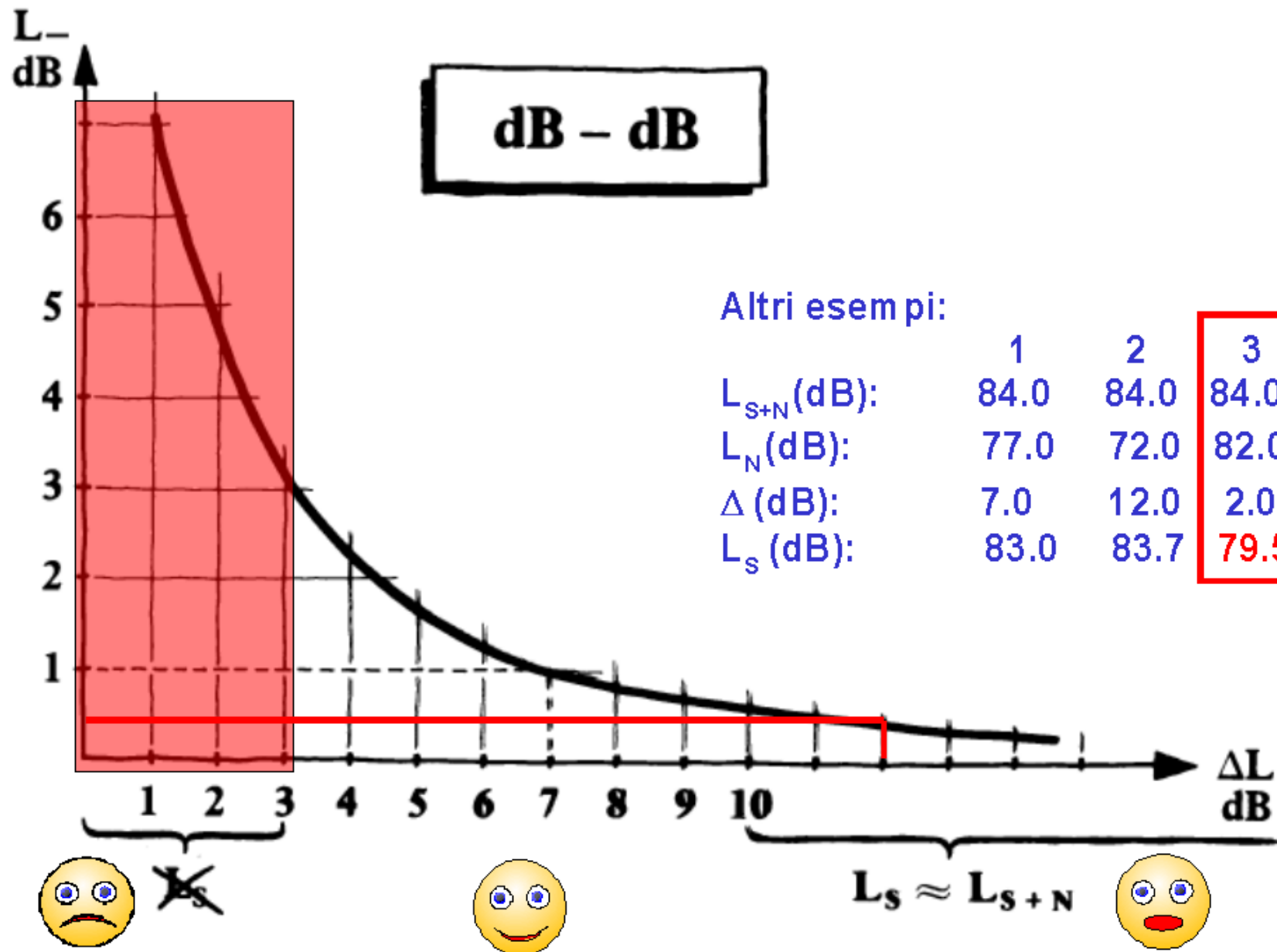
$$L_{p1} = ?$$

$$L_{p1} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{pTOT}}{10}} - 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right) = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{80}{10}} - 10^{\frac{77}{10}} \right) = 10 \log_{10} (10^8 - 10^{7,7}) =$$
$$10 \log_{10} (10^{7,7}) = 77 \text{ dB}$$

Si poteva anche calcolare a mente pensando che $77 \text{ dB} + 77 \text{ dB} = 80 \text{ dB}$

Subtraction of dB Levels





Esempi di somme e sottrazioni di livelli in dB

$$80 \text{ dB} + 90 \text{ dB} = ?$$

$$L_{pTOT} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{90}{10}} \right) = 10 \log_{10} (10^8 + 10^9) =$$

$$= 10 \log_{10} (100.000.000 + 1.000.000.000) = 10 \log_{10} (1.100.000.000) =$$

$$= 10 \cdot 9,04 \cong 90$$

$$80 \text{ dB} + (-80) \text{ dB} = ?$$

$$L_{pTOT} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{80}{10}} + 10^{-\frac{80}{10}} \right) = 10 \log_{10} (10^8 + 10^{-8}) =$$

$$= 10 \log_{10} (100.000.000 + 0,00000001) = 10 \log_{10} (100.000.000,00000001) \cong 80$$

Esempi di somme e sottrazioni di livelli in dB

$$80 \text{ dB} - (-80) \text{ dB} = ?$$

$$\begin{aligned} L_{pTOT} &= 10 \log_{10} \left(10^{\frac{80}{10}} - 10^{-\frac{80}{10}} \right) = 10 \log_{10} (10^8 - 10^{-8}) = \\ &= 10 \log_{10} (100.000.000 - 0,00000001) = 10 \log_{10} (99999999,99999999) \cong 80 \end{aligned}$$

Verifica del risultato precedente (facendo il calcolo esatto all'ultimo decimale):

$$10 \log_{10} (99999999,99999999) = 79,99999999999999565705518096748$$

$$80 \text{ dB} - 79,99999999999999565705518096748 \text{ dB} = ?$$

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} (10^8 - 10^{7,999999999999999565705518096748}) &= 10 \log_{10} (100.000.000 - 99999999,99999999) \\ &= 10 \log_{10} (0,00000001) = 10 \log_{10} (10^{-8}) = \end{aligned}$$

- 80 dB



Esempi da ricordare a memoria

$$80 \text{ dB} + 80 \text{ dB} = 83 \text{ dB}$$


$$77 \text{ dB} + 77 \text{ dB} = 80 \text{ dB}$$

$$80 \text{ dB} - 77 \text{ dB} = 77 \text{ dB}$$

$$80 \text{ dB} + 90 \text{ dB} \cong 90 \text{ dB}$$

$$80 \text{ dB} + (-80) \text{ dB} \cong 80 \text{ dB}$$

$$80 \text{ dB} - (-80) \text{ dB} \cong 80 \text{ dB}$$

$$80 \text{ dB} - 80 \text{ dB} =$$


$$10\log(2) \cong 3,01 \cong 3$$

$$10\log(3) \cong 4,77 \cong 4,8$$

$$10\log(5) \cong 6,99 \cong 7$$

$$10\log(10) = 10$$

$$p = 1 \mu\text{Pa} = 10^{-6} \text{ Pa} \Rightarrow L_p = 20\log_{10}\left(\frac{10^{-6}}{2 \cdot 10^{-5}}\right) = 20\log_{10}(0,05) \cong -26 \text{ dB}$$

$$p = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \Rightarrow L_p = 20\log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right) = 20\log_{10}(1) = 0 \text{ dB}$$

$$p = 1 \text{ Pa} \Rightarrow L_p = 20\log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{1}{2 \cdot 10^{-5}}\right) \cong 94 \text{ dB} \quad (\leftarrow 93,97 \text{ dB})$$

$$p = 100 \text{ kPa} \Rightarrow L_p = 20\log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{10^5}{2 \cdot 10^{-5}}\right) \cong 194 \text{ dB} \quad (\leftarrow 193,97 \text{ dB})$$

Esercizi da fare senza il calcolatore

- $\log_{10}(10^{-3}) = ?$
- $\log_{10}(10^{12}) = ?$
- $\log_{10}(2 \cdot 10^{12}) = ?$
- $\log_{10}(200) = ?$
- $\log_{10}(200) - \log_{10}(10) = ?$
- $\log_{10}(2^{10}) = ?$

$$\log(2) \cong 0,3$$

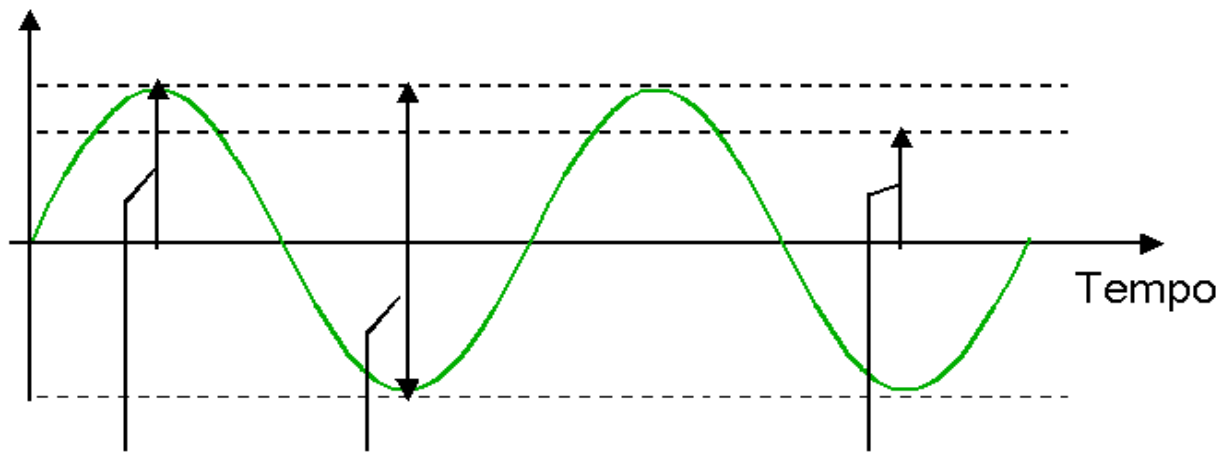


Caso generale di somma o sottrazione di N sorgenti:

$$L_{pTOT} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} \pm 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \pm \dots \pm 10^{\frac{L_{pN}}{10}} \right) = 10 \log_{10} \sum_{k=1}^N \pm 10^{\frac{L_{pk}}{10}}$$



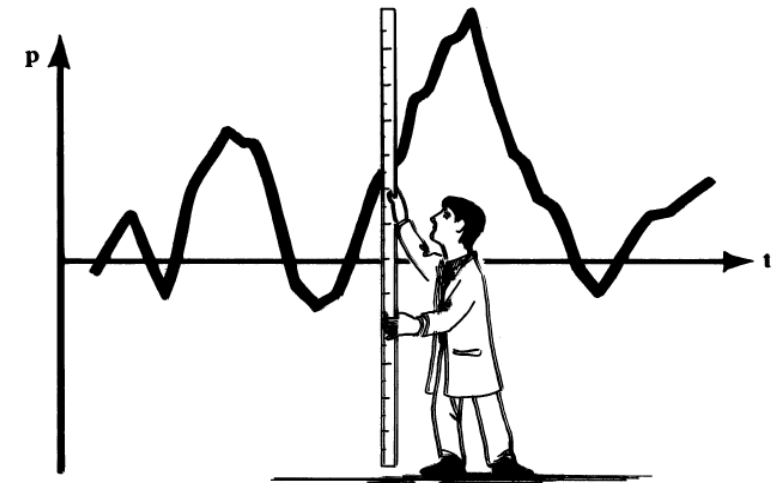
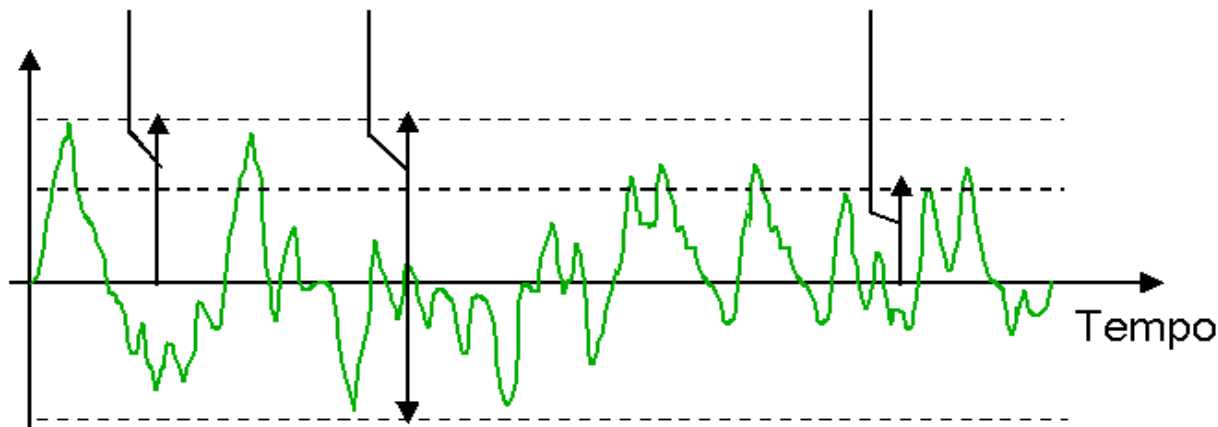
Descrizione del fenomeno sonoro



Picco

Picco - Picco

RMS



$$p_{eff} = p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}$$

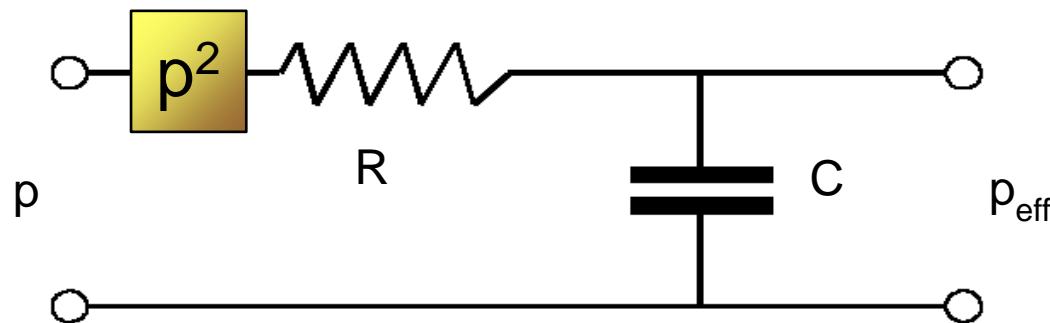
Gli strumenti di misura implementano due diverse soluzioni di integrazione dei valori istantanei di pressione acustica:

- INTEGRAZIONE ESPONENZIALE
- INTEGRAZIONE LINEARE

$$P_{eff} = P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}$$

INTEGRAZIONE ESPONENZIALE

Il termine integrazione esponenziale deriva dagli *antichi* strumenti analogici, nei quali l'integrazione avveniva mediante un circuito RC



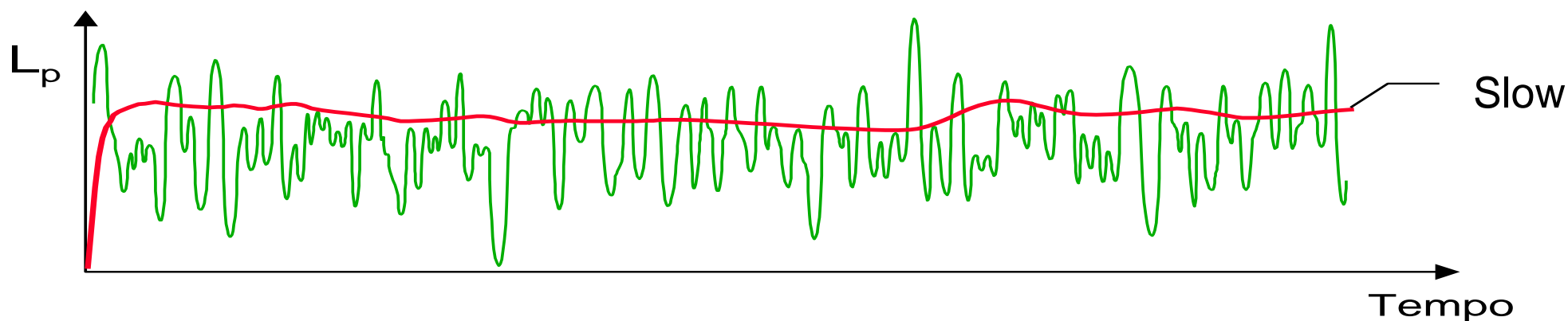
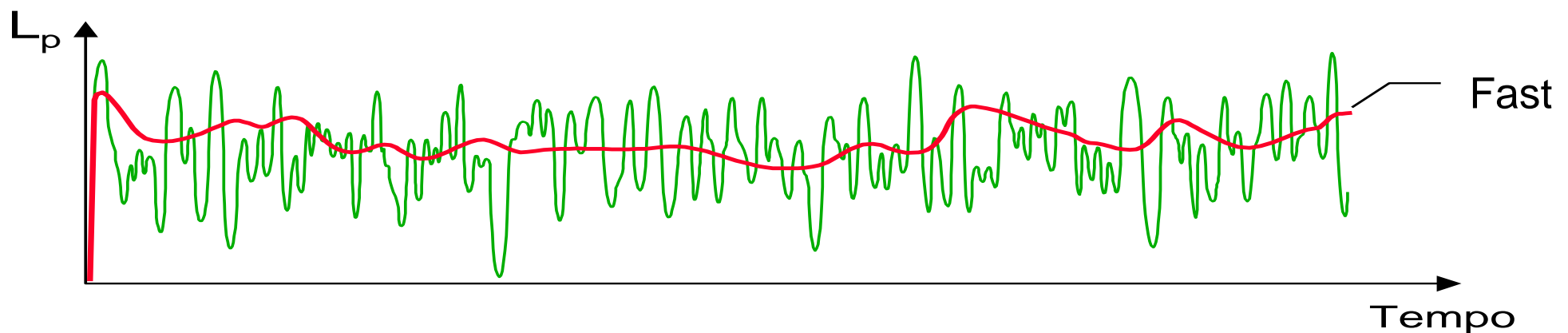
La risposta di tale circuito ha andamento temporale esponenziale e dipende dal prodotto RC.

Caratteristiche dell'integrazione esponenziale:

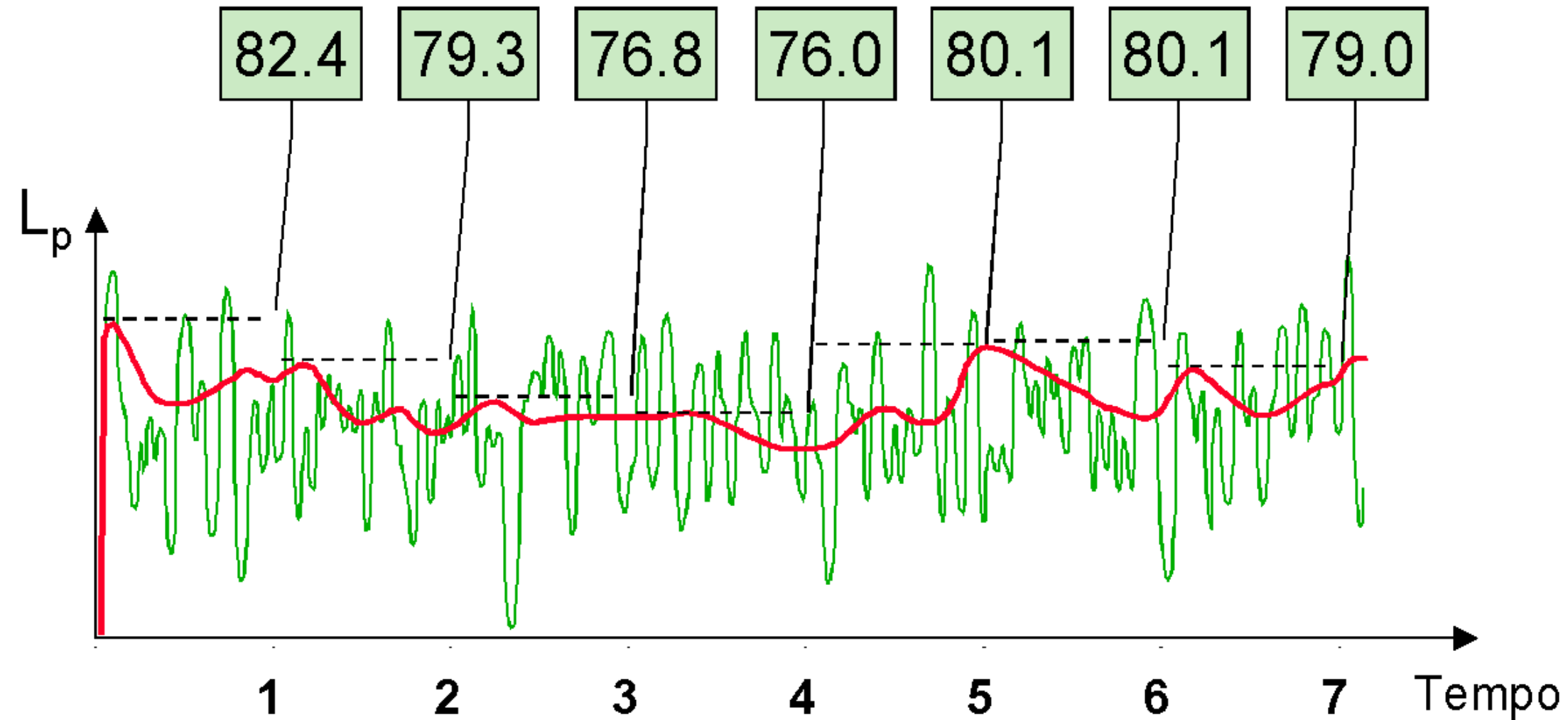
- riduce l'ampiezza delle oscillazioni di un fenomeno non stazionario
- segue l'evoluzione del fenomeno nel tempo
- fenomeni con durata inferiore alla costante di tempo producono un errore di ampiezza inversamente proporzionale alla durata del fenomeno stesso

Costanti di tempo secondo IEC 1672 (ha sostituito IEC 651):

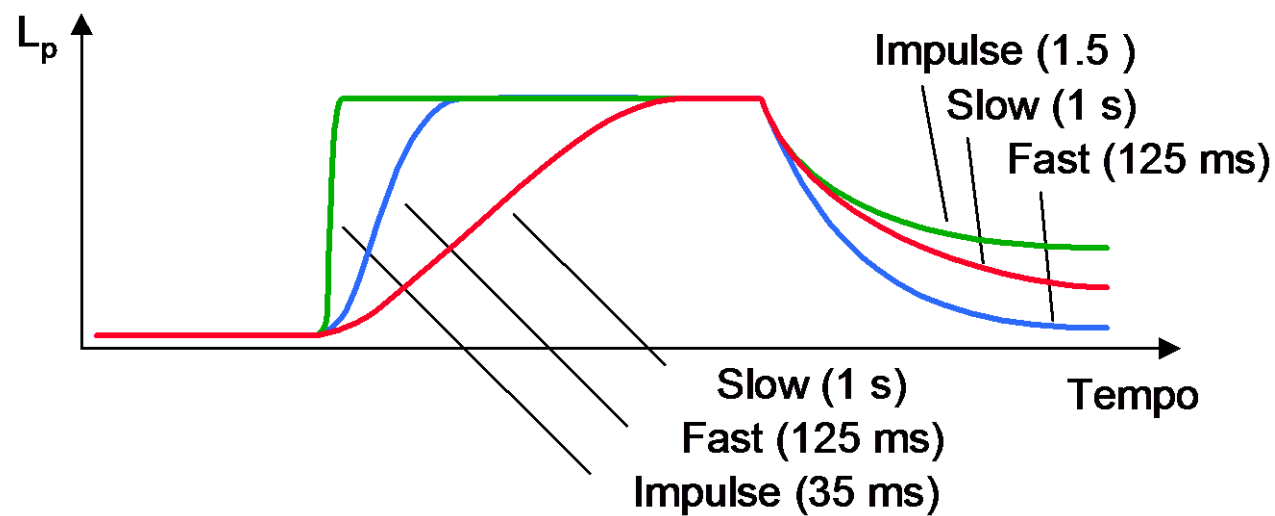
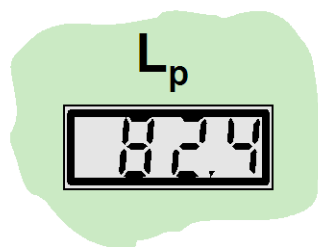
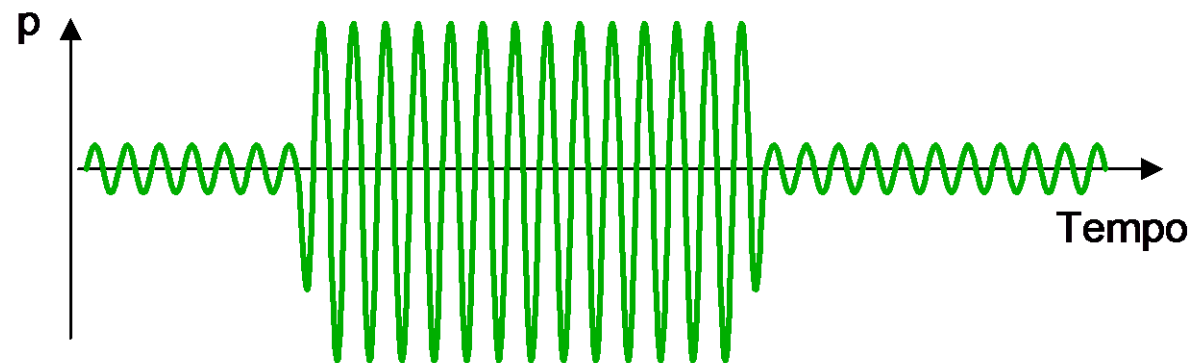
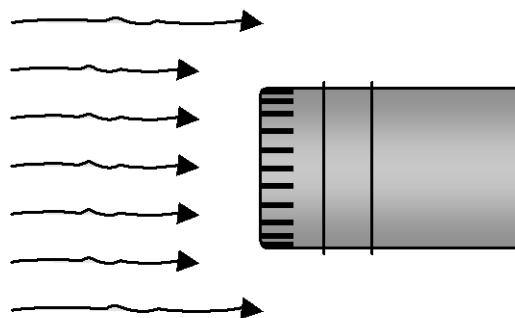
Slow = 1000 ms
Fast = 125 ms
Impulse = 35 ms
Peak (non energetica) < 50 μ s



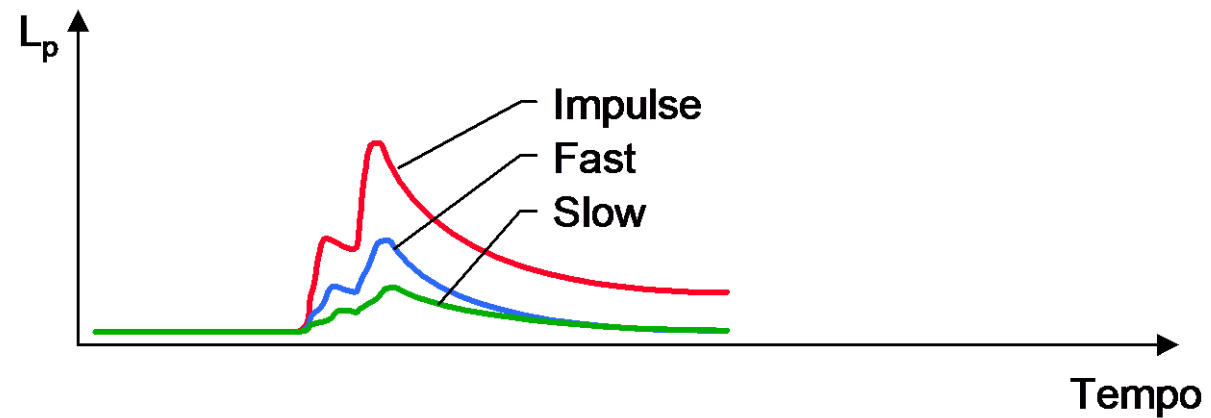
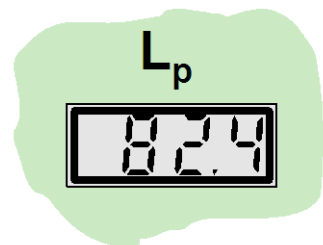
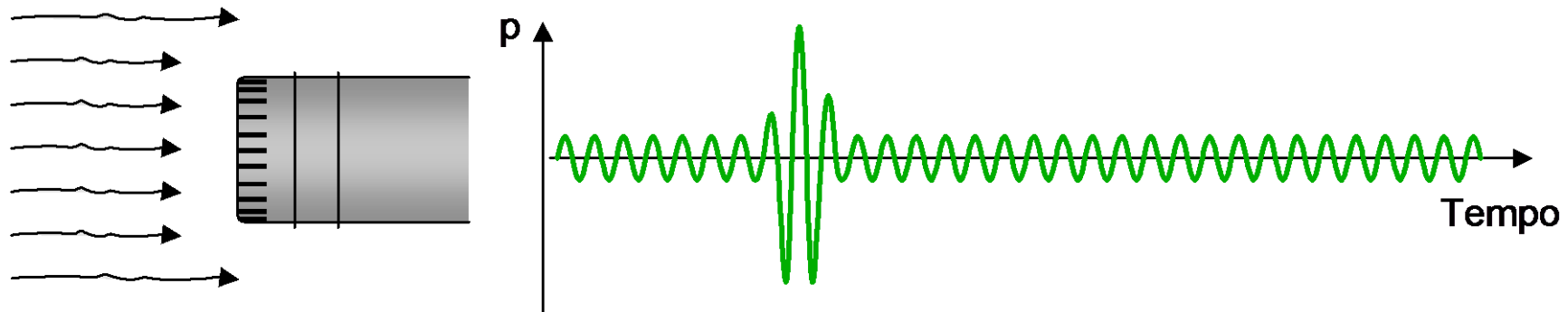
Letture sul display digitale dello strumento di misura



Risposta dello strumento

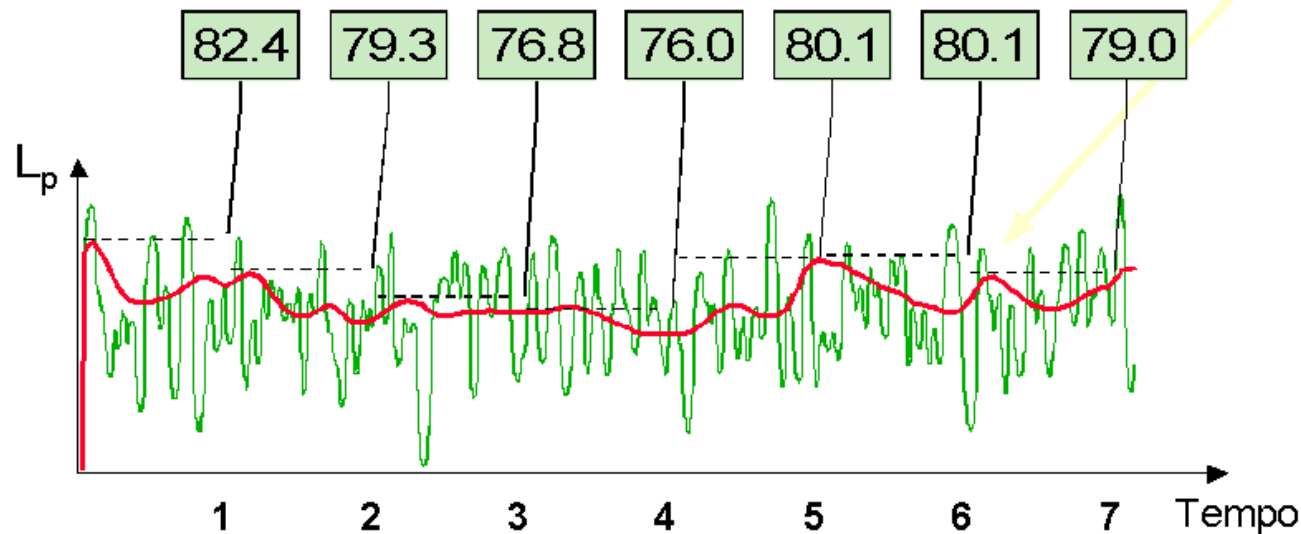


Risposta dello strumento



INTEGRAZIONE LINEARE

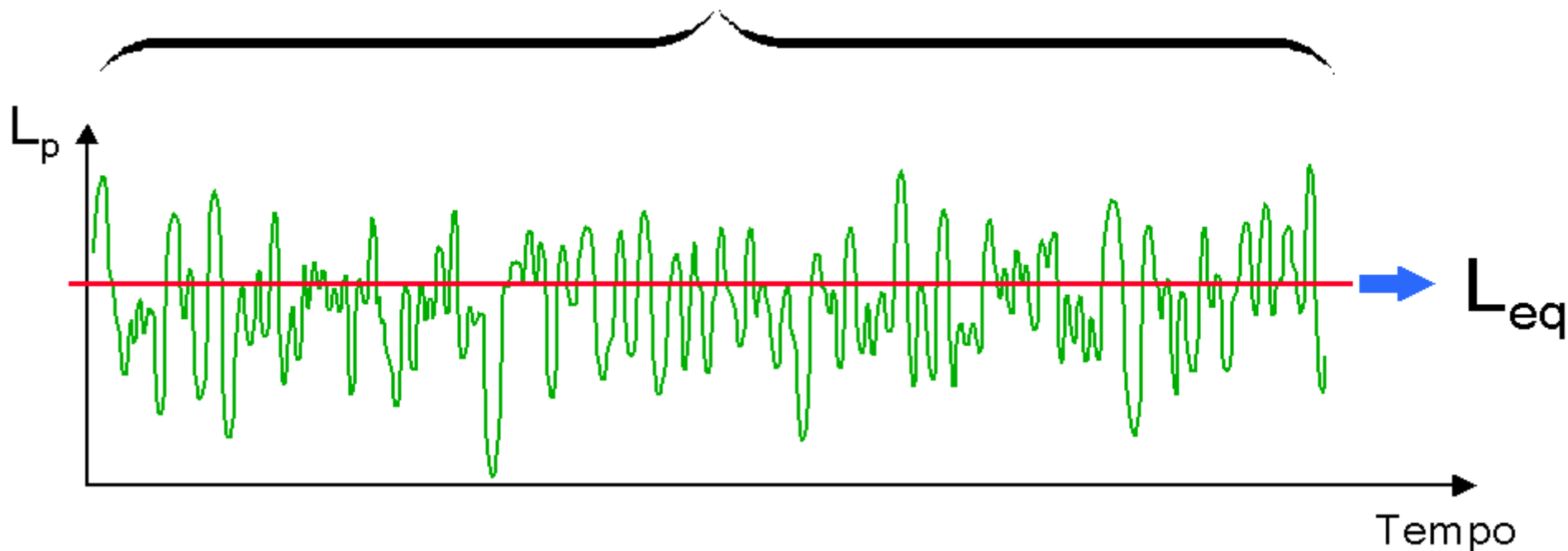
Il livello di pressione visualizzato dallo strumento di misura, filtrato dall'integratore esponenziale utilizzando la costante di tempo (Slow, Fast, ..) più adatta all'evento sonoro da misurare, è continuamente variabile nel tempo.



Per caratterizzare un fenomeno sonoro variabile nel tempo T mediante un unico valore si introduce il **Livello sonoro continuo equivalente** $L_{eq,T}$ che rappresenta il contenuto energetico, nel tempo di misura T , del fenomeno variabile nel tempo. Il livello equivalente si calcola mediante l'integrazione lineare.

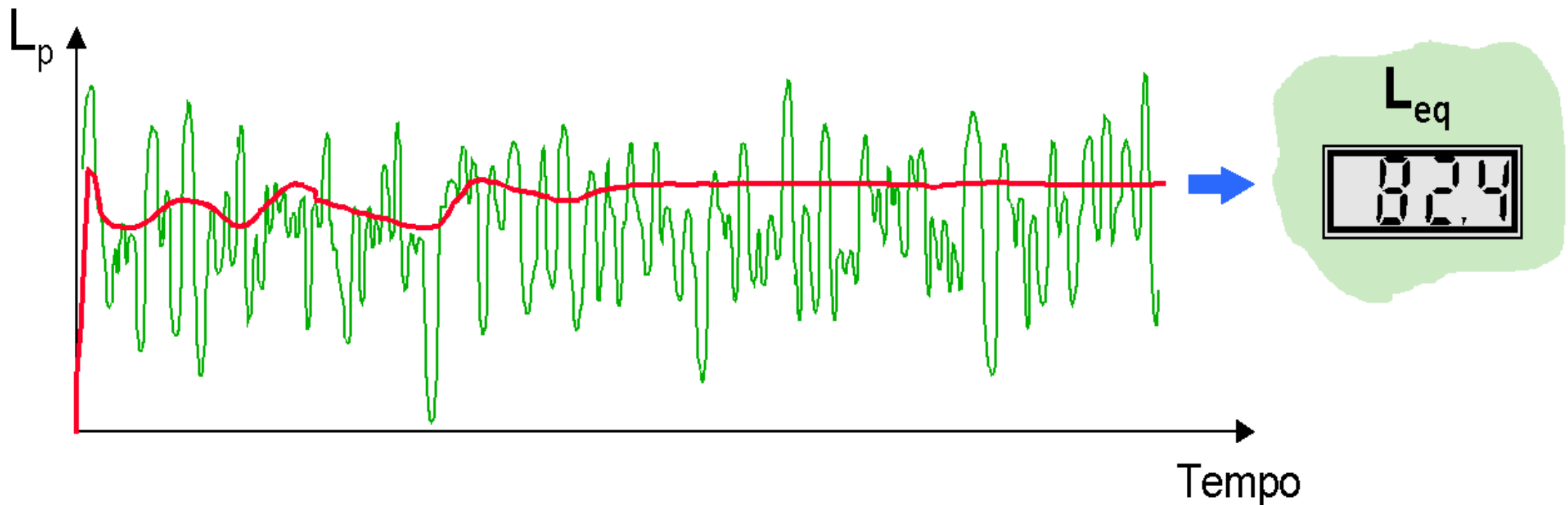
INTEGRAZIONE LINEARE

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right\} \quad [\text{dB}]$$



INTEGRAZIONE LINEARE

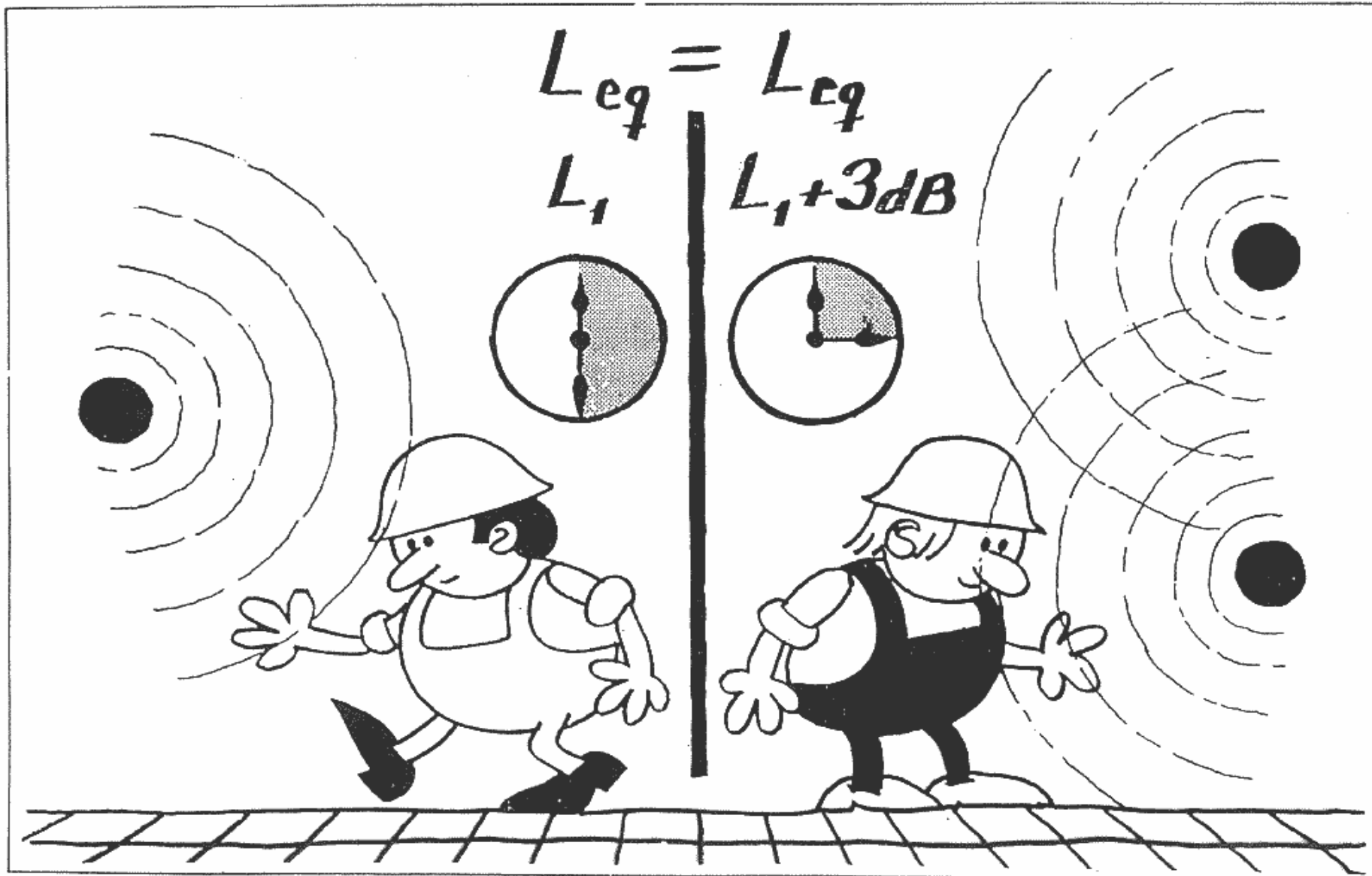
“Il $L_{eq,T}$ rappresenta il contenuto energetico, nel tempo di misura T , del fenomeno variabile nel tempo”



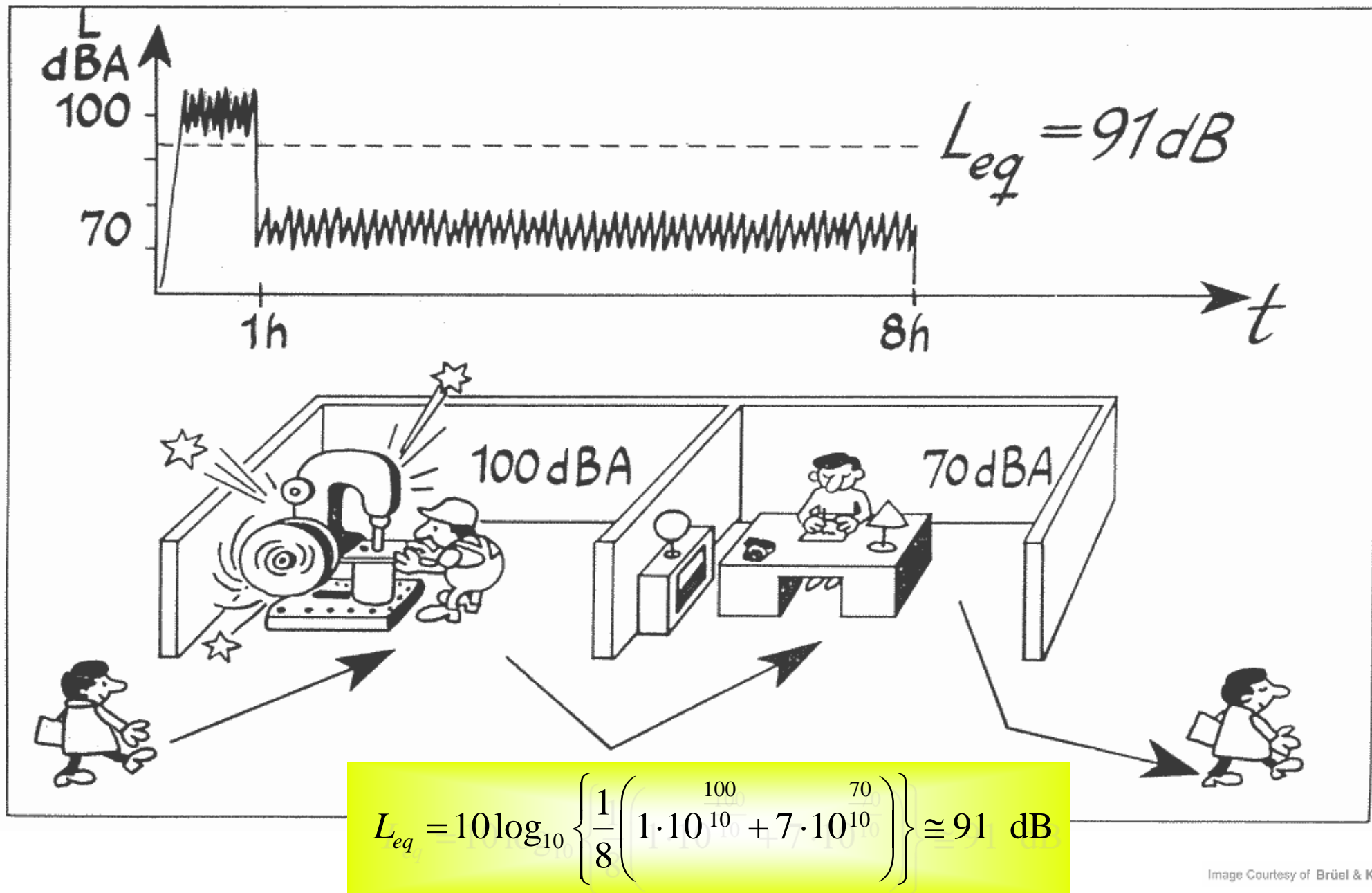
Il $L_{eq,T}$ va sempre associato al tempo di misura T .

LIVELLI SONORI E DEFINIZIONE DI DECIBEL

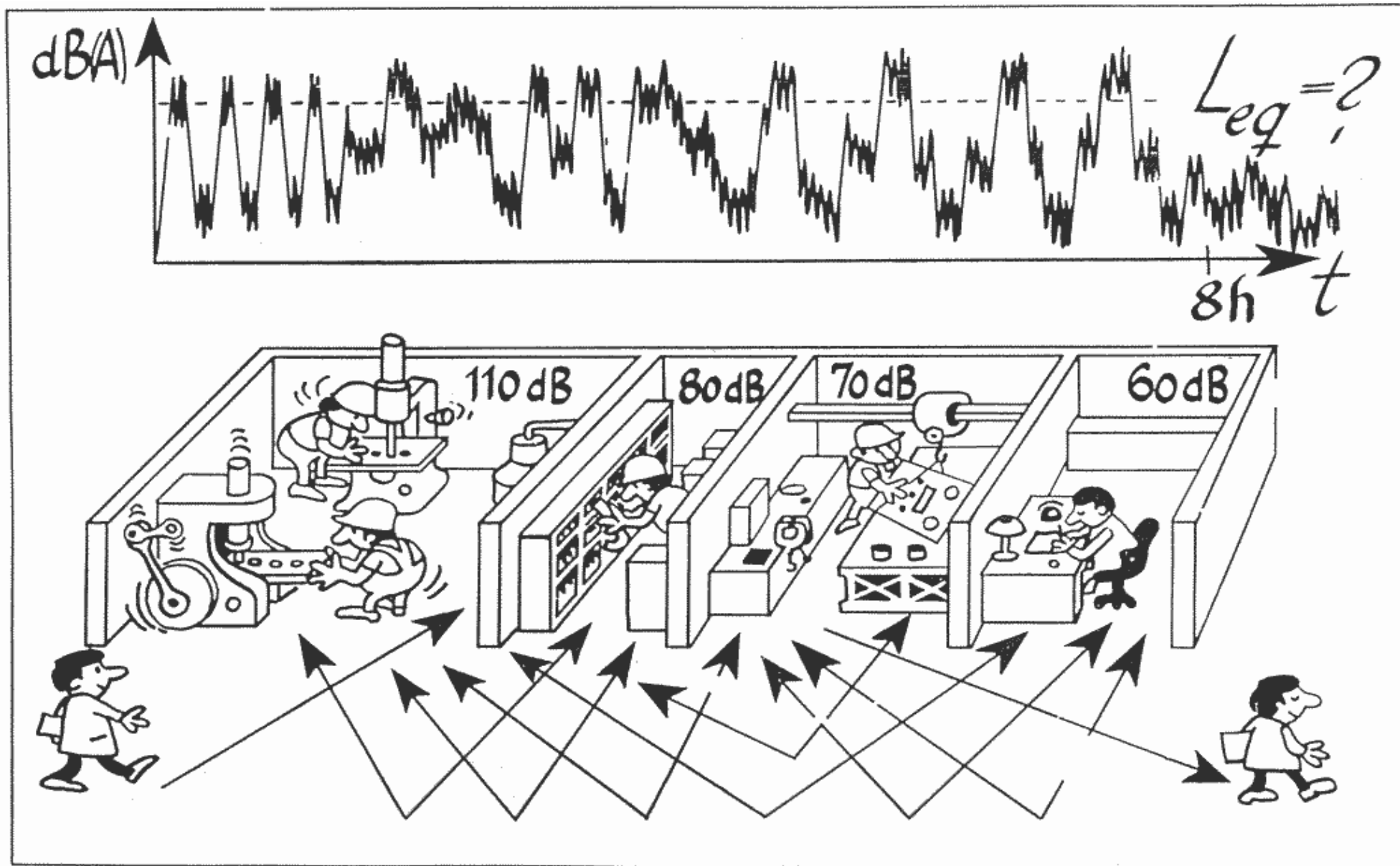
8 - Integrazione esponenziale e lineare: L_{eq}
Pag. 97



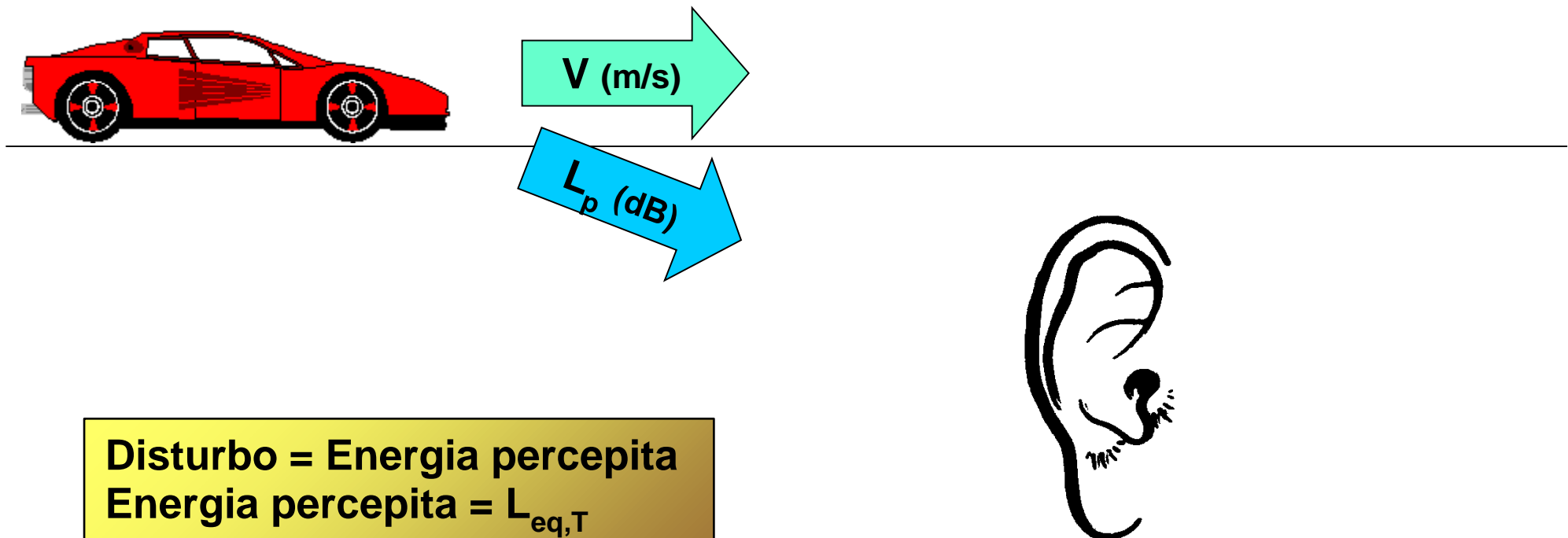
LIVELLI SONORI E DEFINIZIONE DI DECIBEL
8 - Integrazione esponenziale e lineare: L_{eq}
Pag. 98



LIVELLI SONORI E DEFINIZIONE DI DECIBEL
8 - Integrazione esponenziale e lineare: L_{eq}
Pag. 99



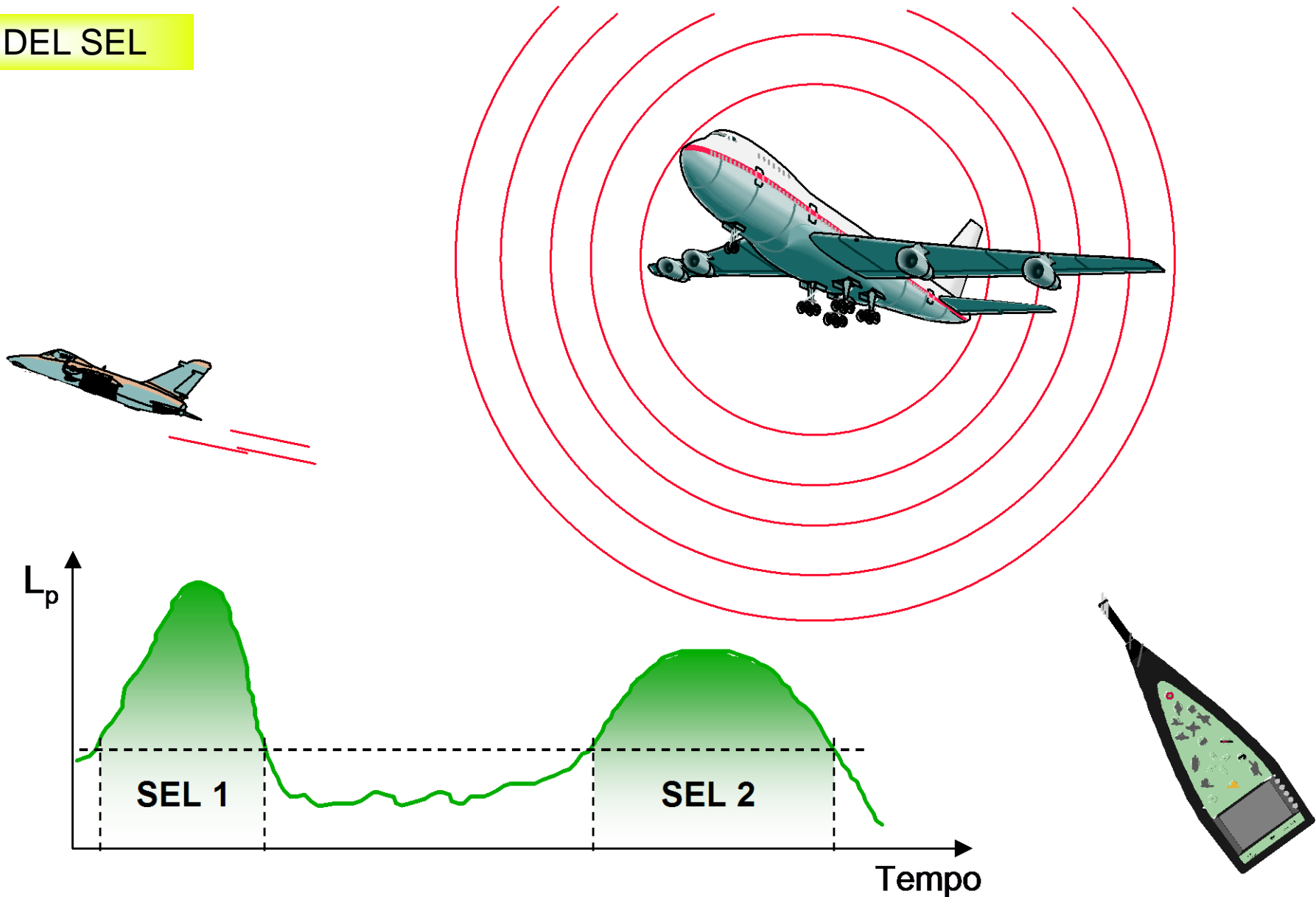
SEL



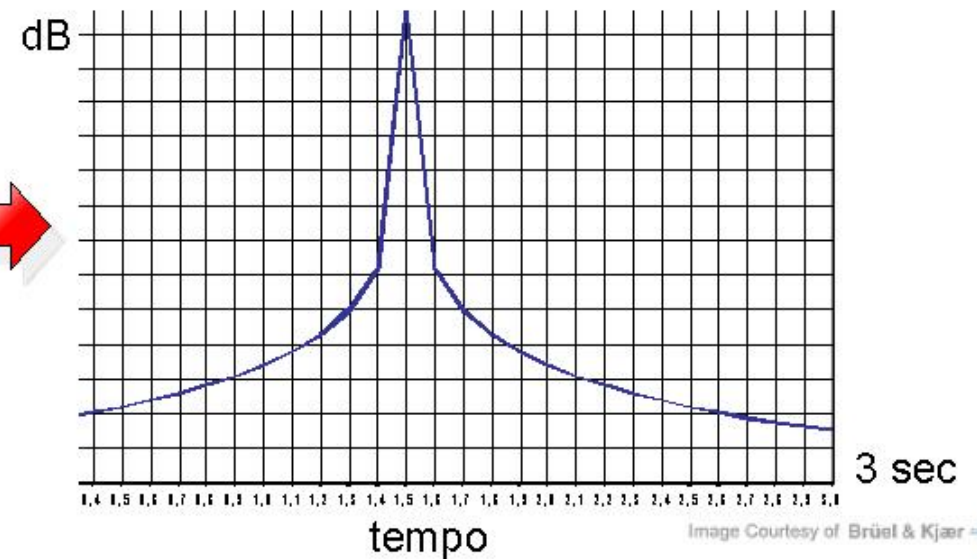
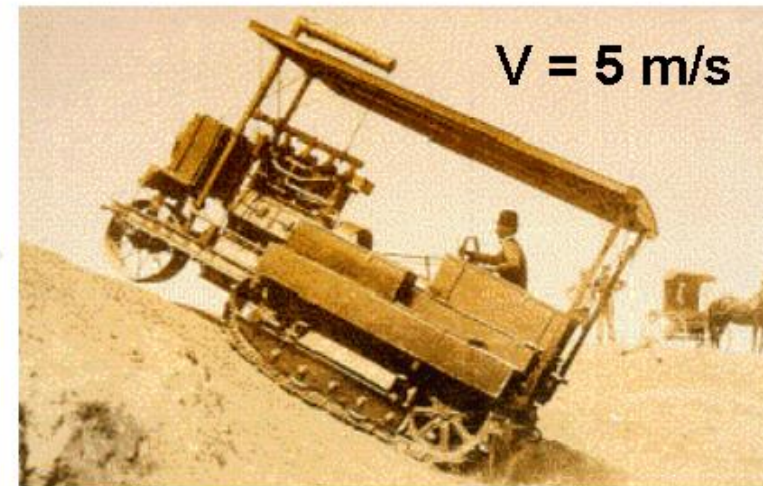
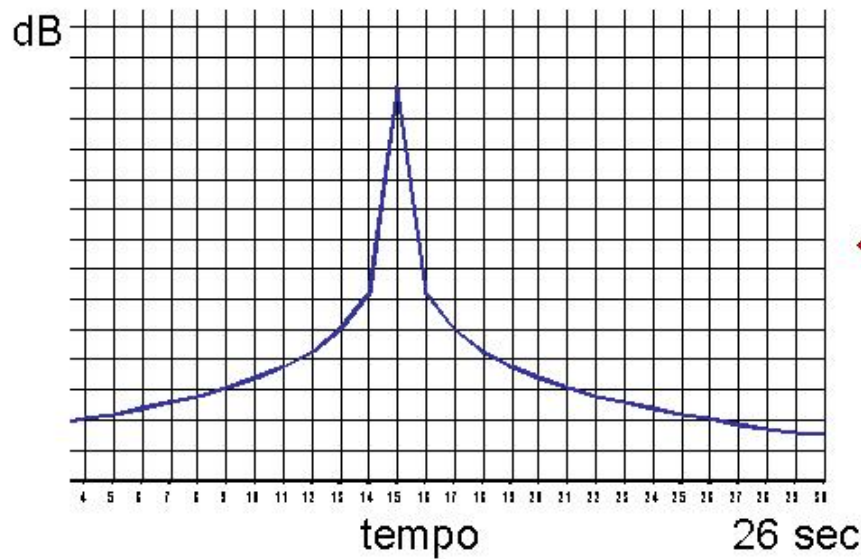
Disturbo = Energia percepita
Energia percepita = $L_{eq,T}$

se $T_1 \neq T_2$ disturbo ?

ORIGINE DEL SEL

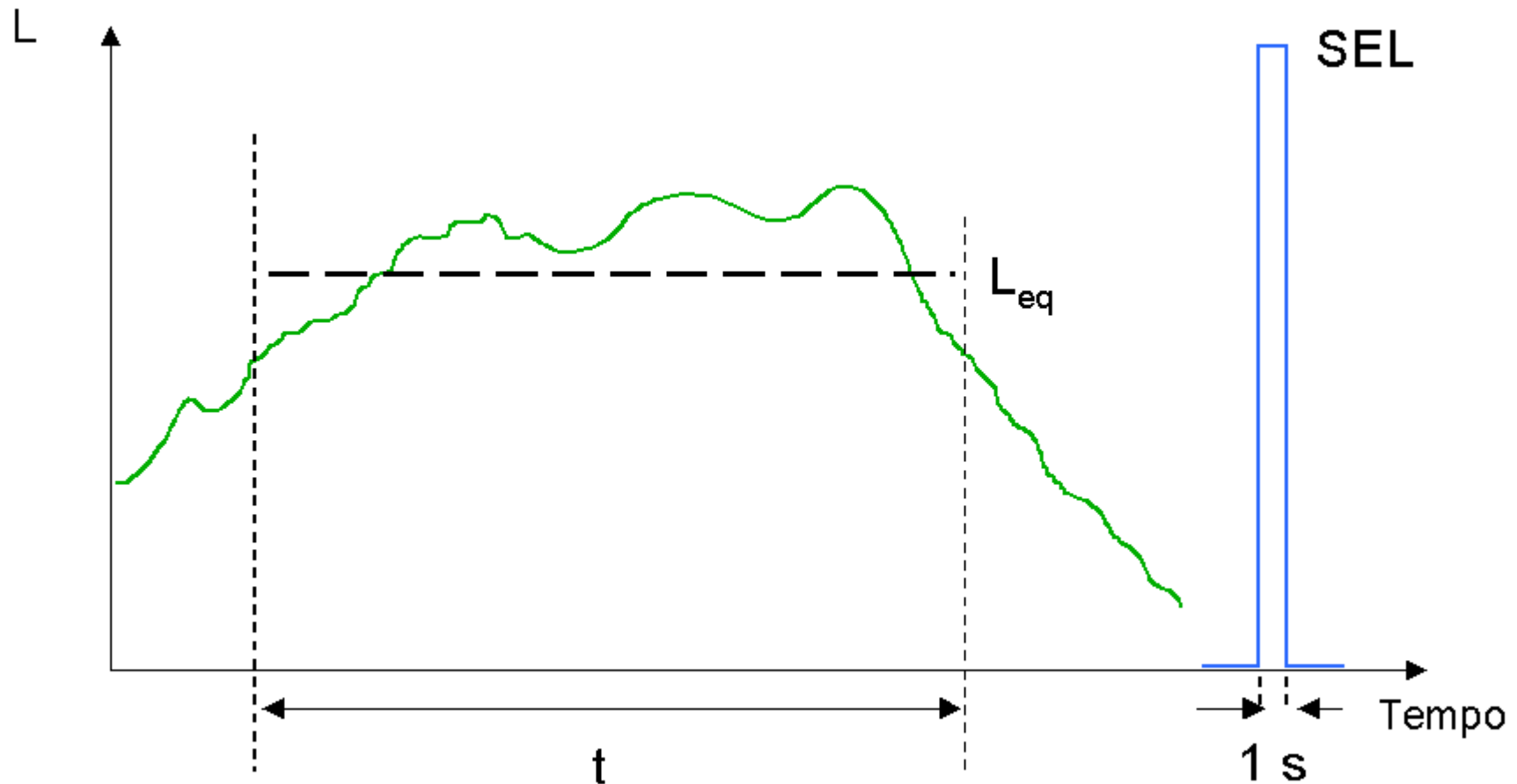


SEL: DESCRITTORE DI UN FENOMENO DI DURATA VARIABILE



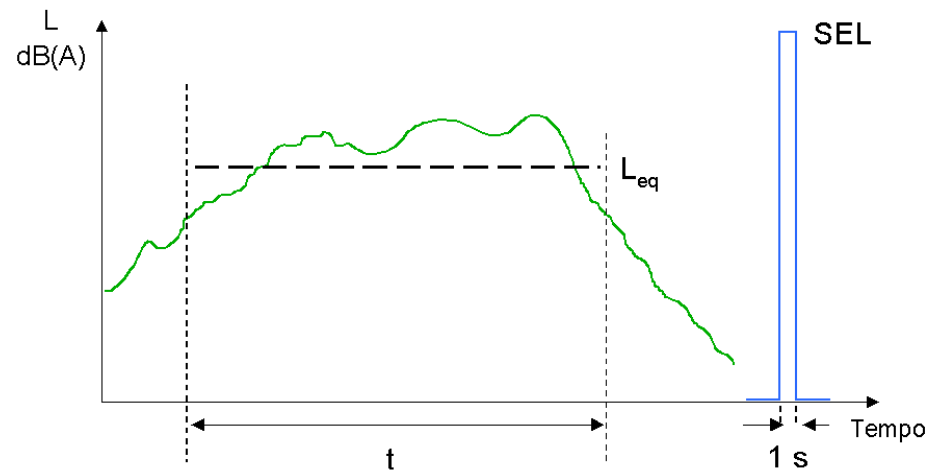
SEL

$$SEL = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right\} \text{ [dB]} \quad T_0 = 1 \text{ s}$$



SEL

$$SEL = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right\} \quad [\text{dB}] \quad T_0 = 1 \text{ s}$$

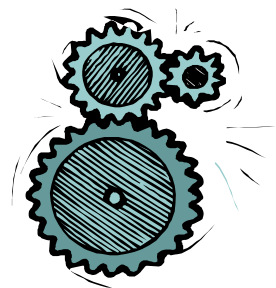


Il SEL (Sound Exposure Level o **Single Event Level**) comprime la quantità di energia dell'evento sonoro nel tempo di 1 secondo. E' usato per confrontare i contenuti energetici di eventi sonori di durate differenti.

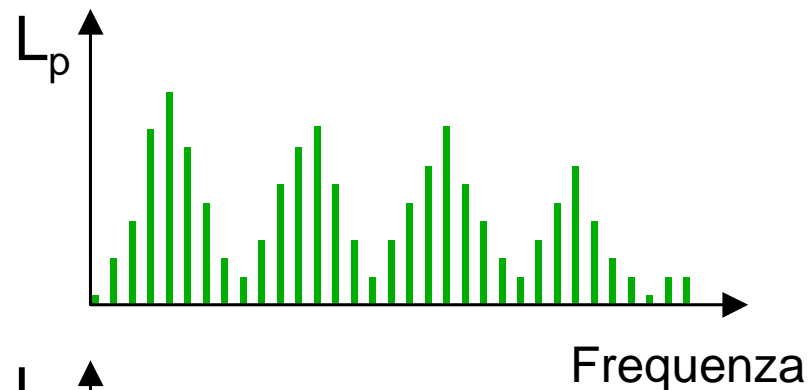
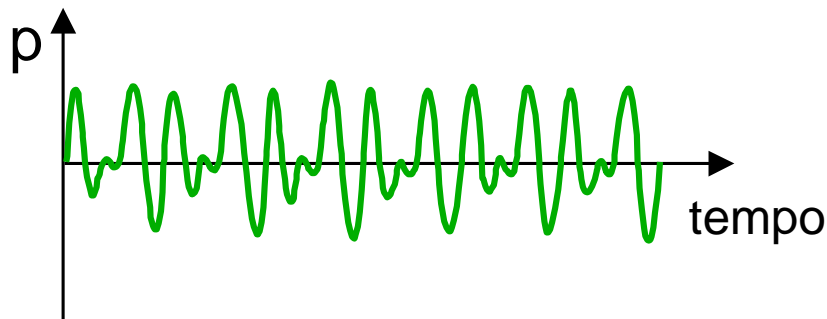
Si può calcolare a partire dal livello equivalente:

$$SEL = L_{eq,T} + 10 \log_{10} \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}] \quad T_0 = 1 \text{ s}$$

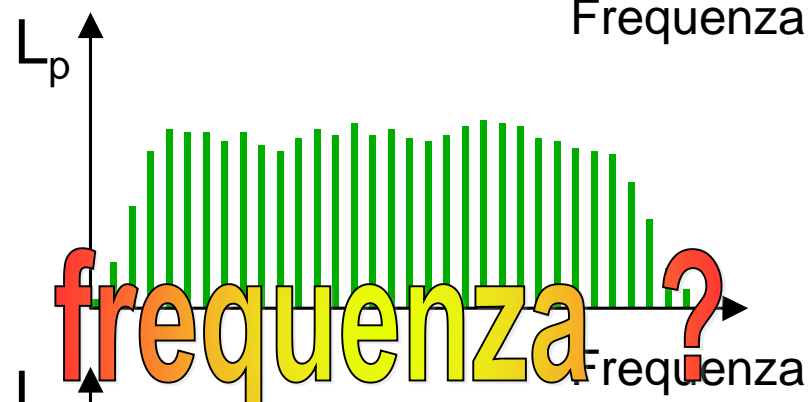
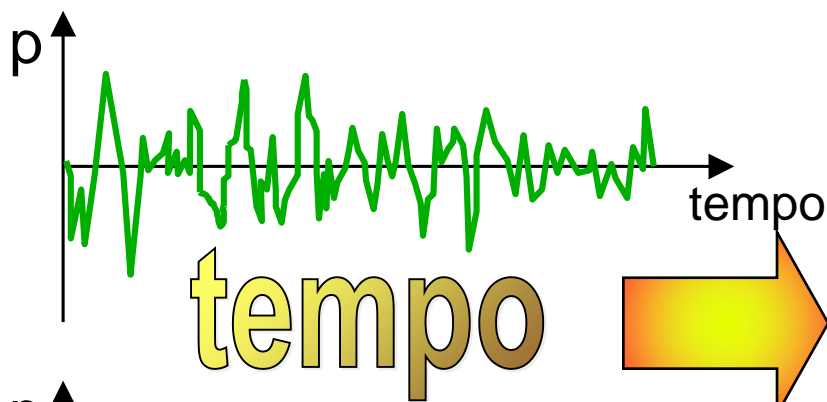
Cosa c'è dentro ai suoni?
Per scoprirlo occorre fare l'ANALISI IN FREQUENZA..



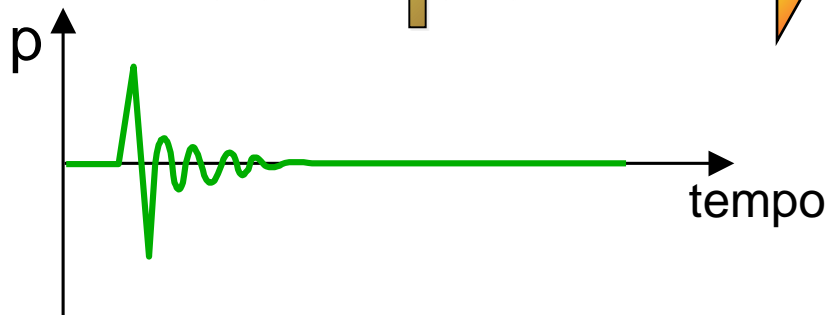
periodico



casuale



impulsivo





Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

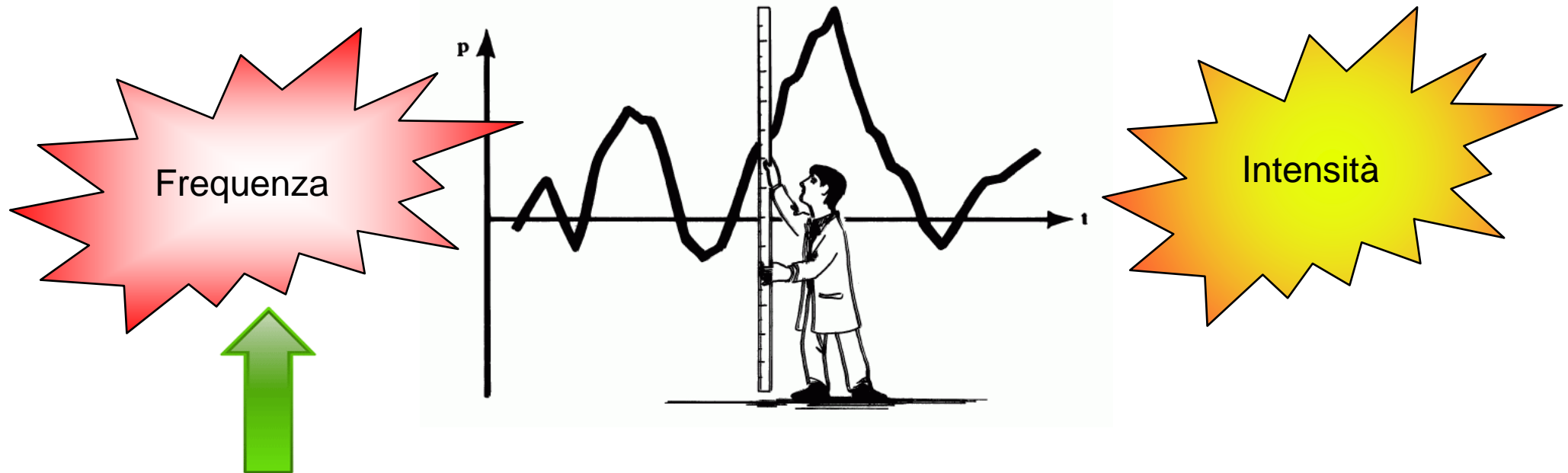
***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

Dispensa n. 3

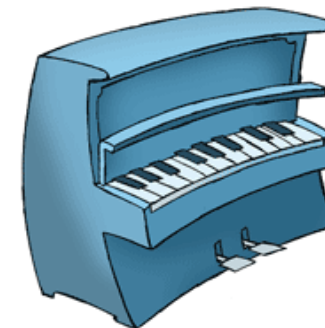
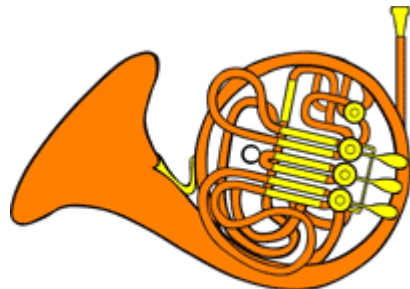
**ANALISI IN FREQUENZA
IL SISTEMA Uditivo Umano**

Docente: Paolo Guidorzi

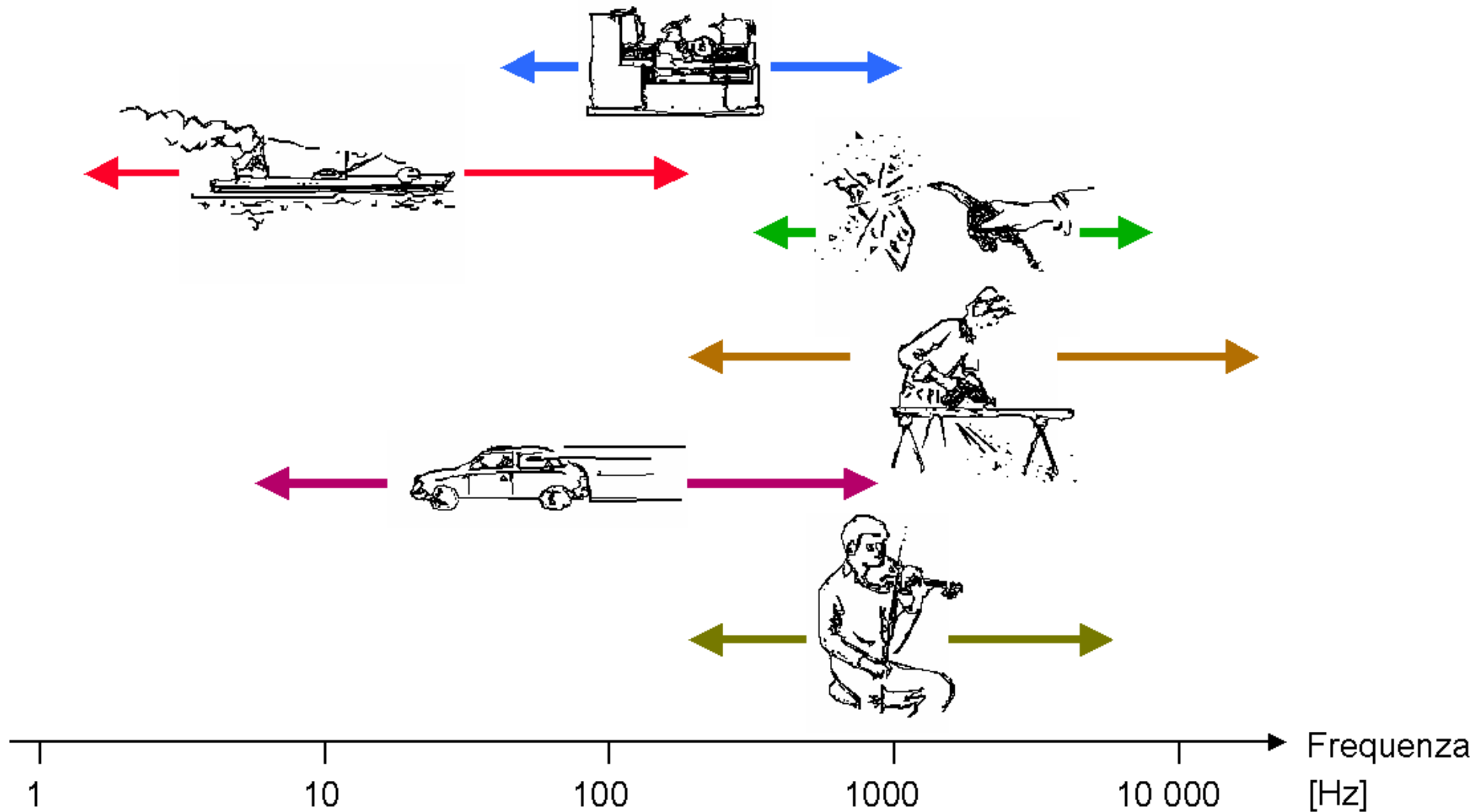
I suoni sono caratterizzati da due componenti fondamentali:



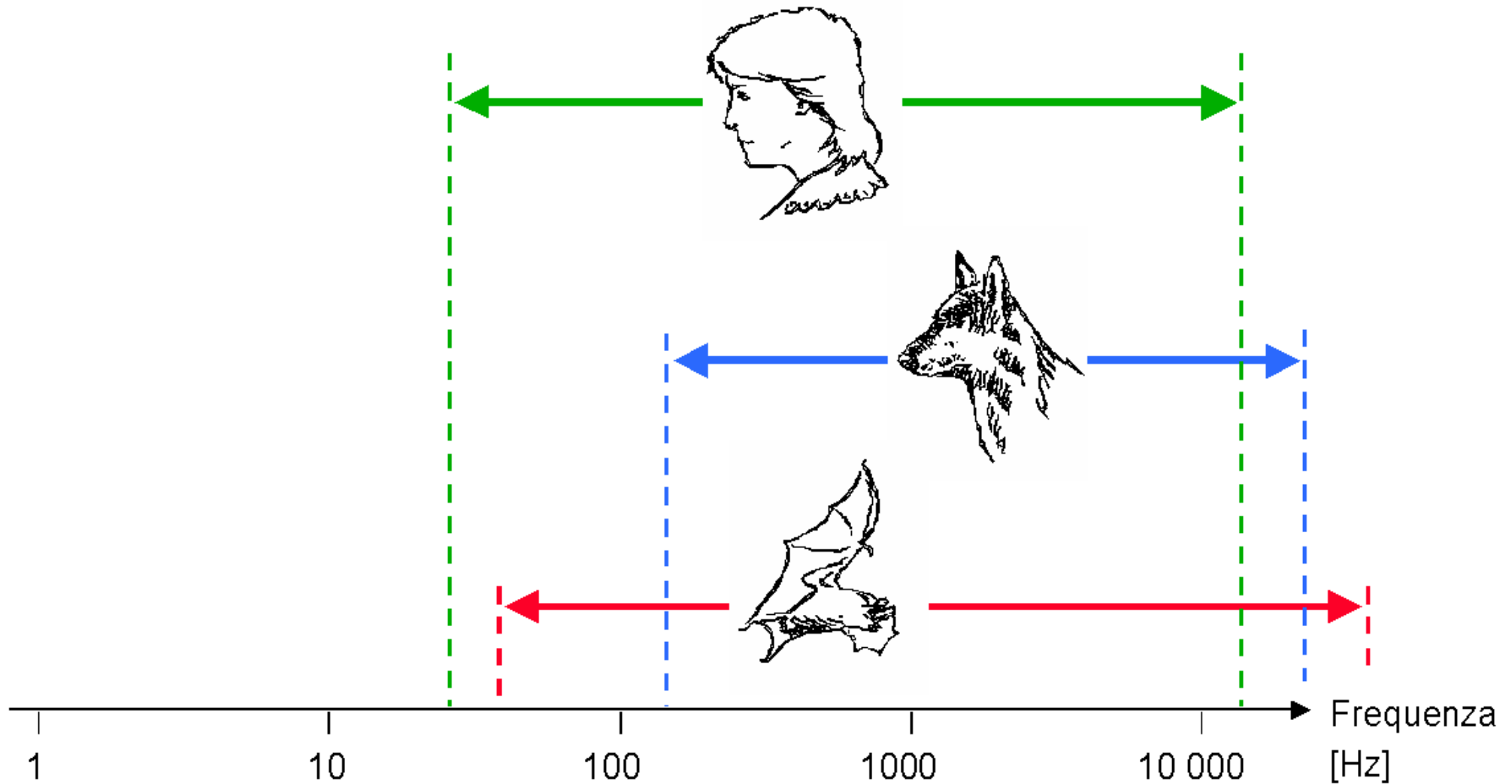
- Un *tono puro* è caratterizzato da una singola frequenza
- I suoni reali sono composti da più frequenze, che ne determinano il *timbro*
- L'intensità di un suono è determinata dall'ampiezza della perturbazione della pressione sonora



Le sorgenti sonore generano suoni in un certo campo di frequenze



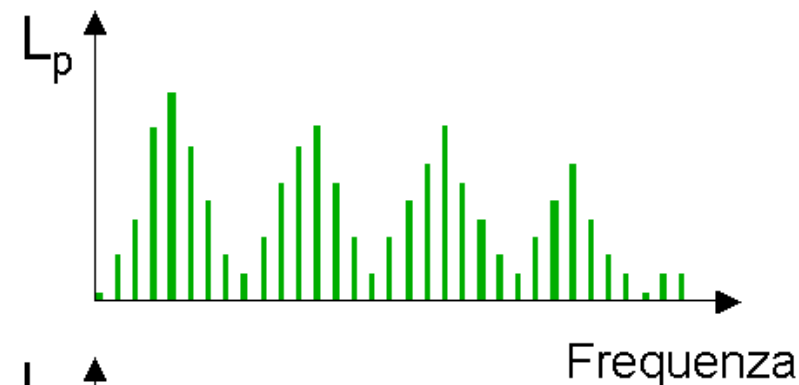
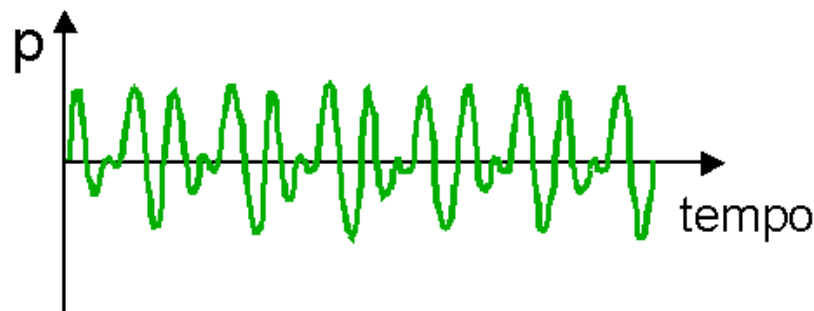
Il sistema uditivo umano medio percepisce suoni compresi tra 20 e 20000 Hz.



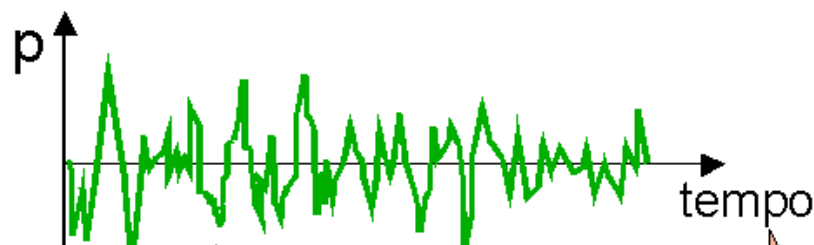
ANALISI IN FREQUENZA



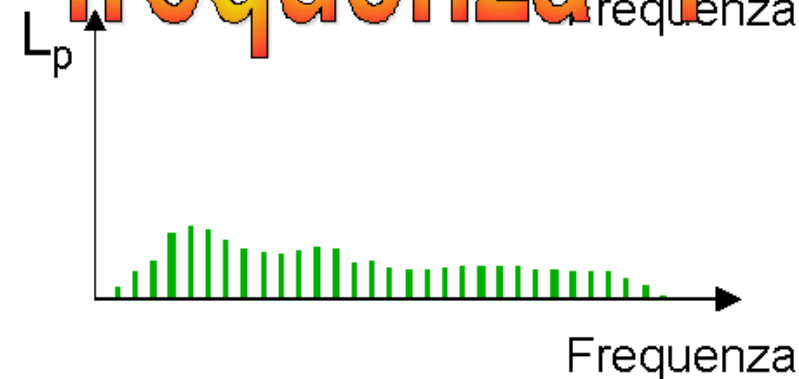
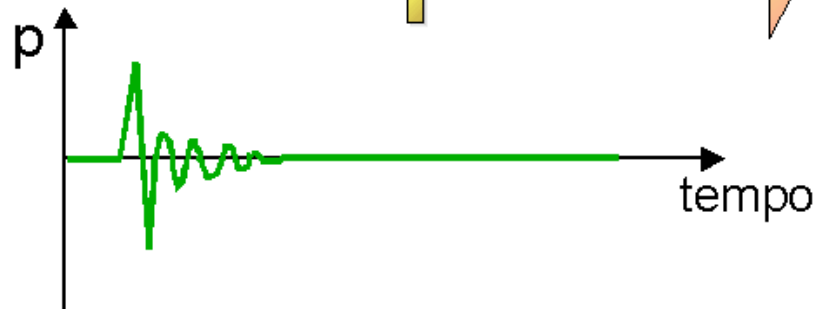
periodico



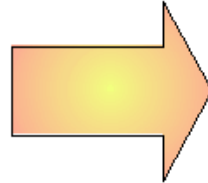
casuale



impulsivo



tempo



frequenza?

ANALISI IN FREQUENZA

Mediante un'operazione matematica, la Trasformata di Fourier, è possibile analizzare un segnale, in particolare le onde sonore, e passare dal dominio del tempo al dominio delle frequenze (trasformata diretta) e dal dominio delle frequenze al dominio del tempo (trasformata inversa).

La teoria di Fourier ci dice che ogni suono è formato dalla somma di infinite sinusoidi, per ogni frequenza, da zero a infinito, ognuna con una determinata ampiezza e fase. Le ampiezze e fasi di queste sinusoidi determinano il timbro di un suono.

Si possono quindi calcolare le componenti spettrali di un dato suono, ognuna associata a una particolare frequenza. Si ottengono numeri complessi (modulo e fase o parte reale e immaginaria).

Nella pratica, non potendo analizzare tutte le frequenze da zero a infinito si restringe l'analisi a una porzione ristretta di frequenze. L'analisi su tutto lo spettro sarebbe comunque inutile visto che le frequenze di interesse per l'orecchio umano sono limitate (circa 20-20000 Hz) e le sorgenti sonore normalmente ricoprono solo parti limitate dello spettro acustico.



Baron Fourier.

Dominio del
tempoDominio della
frequenza

$$X(f) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\text{sen}(\omega t)$$

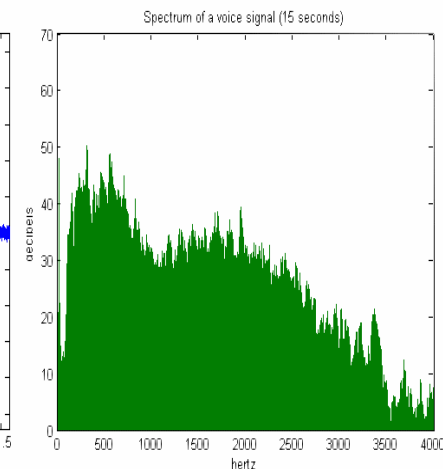
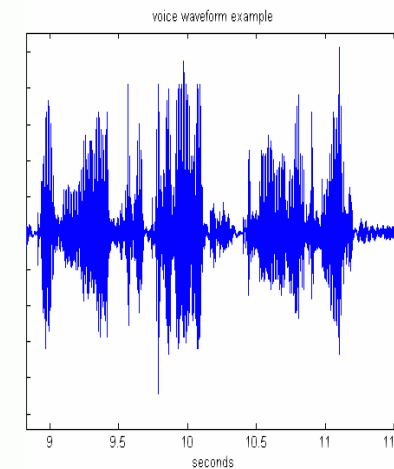
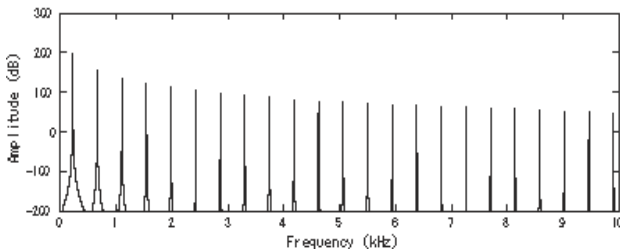
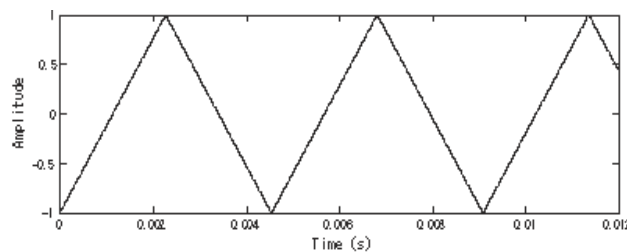
$$x(t) = F^{-1}[X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{+j2\pi ft} df$$

Trasformata diretta
Tempo \rightarrow FrequenzaTrasformata inversa
Frequenza \rightarrow Tempo

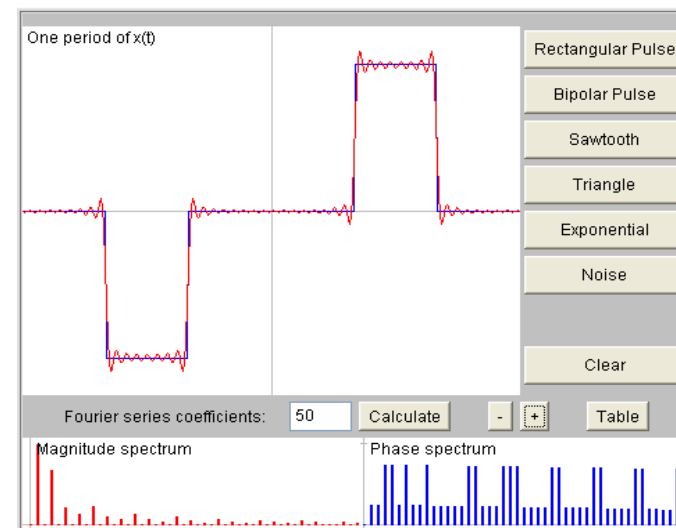
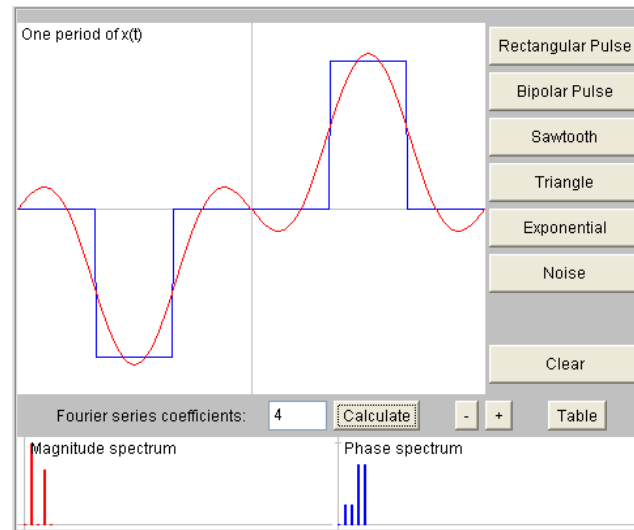
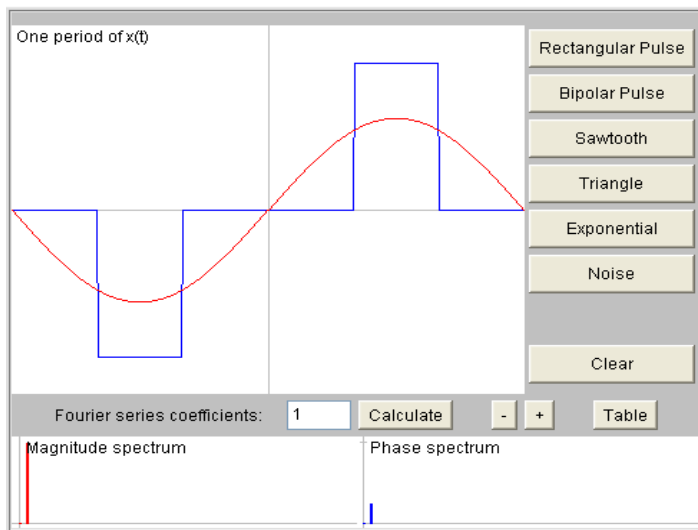
ANALISI IN FREQUENZA

L'analisi di Fourier si può applicare al caso di funzioni *discrete* nel dominio del tempo e della frequenza (DFT, Discrete Fourier Transform). Ciò significa che con apparecchi digitali si può campionare un suono (registrarlo senza perdere informazioni) ed effettuare l'analisi nel dominio delle frequenze (analisi spettrale). In particolare ogni suono può essere scomposto in una somma di sinusoidi (dette armoniche) ognuna con frequenza multipla di una frequenza detta fondamentale. Ogni armonica avrà una determinata caratteristica di ampiezza e fase.

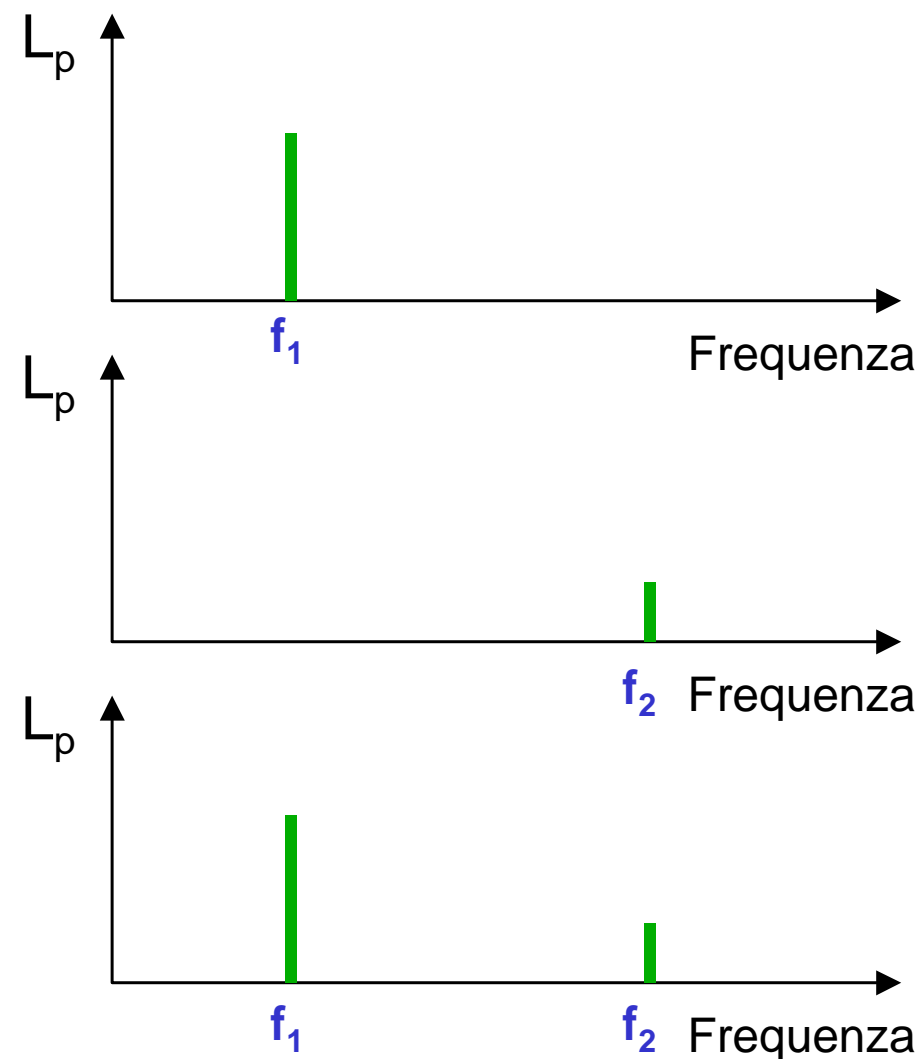
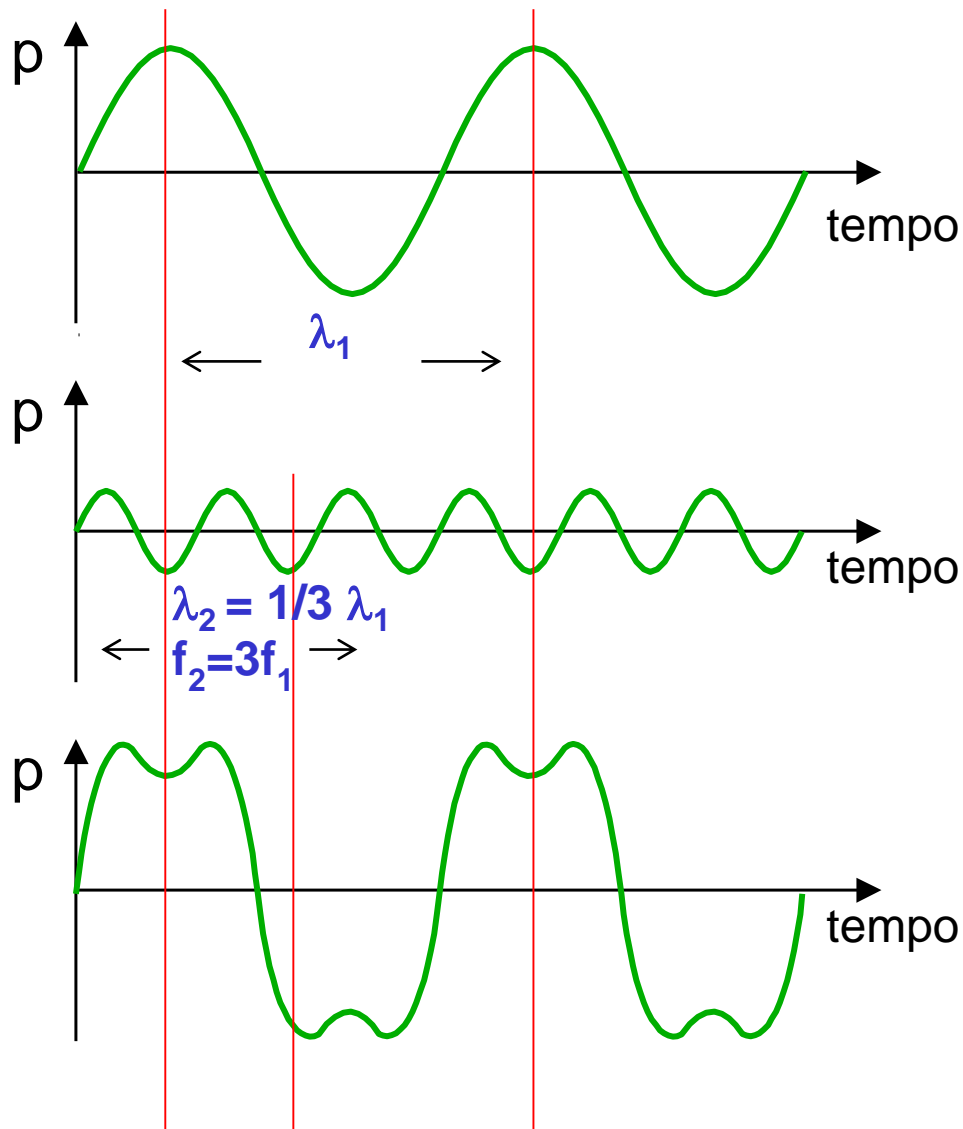
Tutti i calcoli per passare dal dominio del tempo (suono) al dominio della frequenza (spettro) sono oggi eseguiti dal calcolatore, grazie ad un algoritmo veloce detto FFT (Fast Fourier Transform)



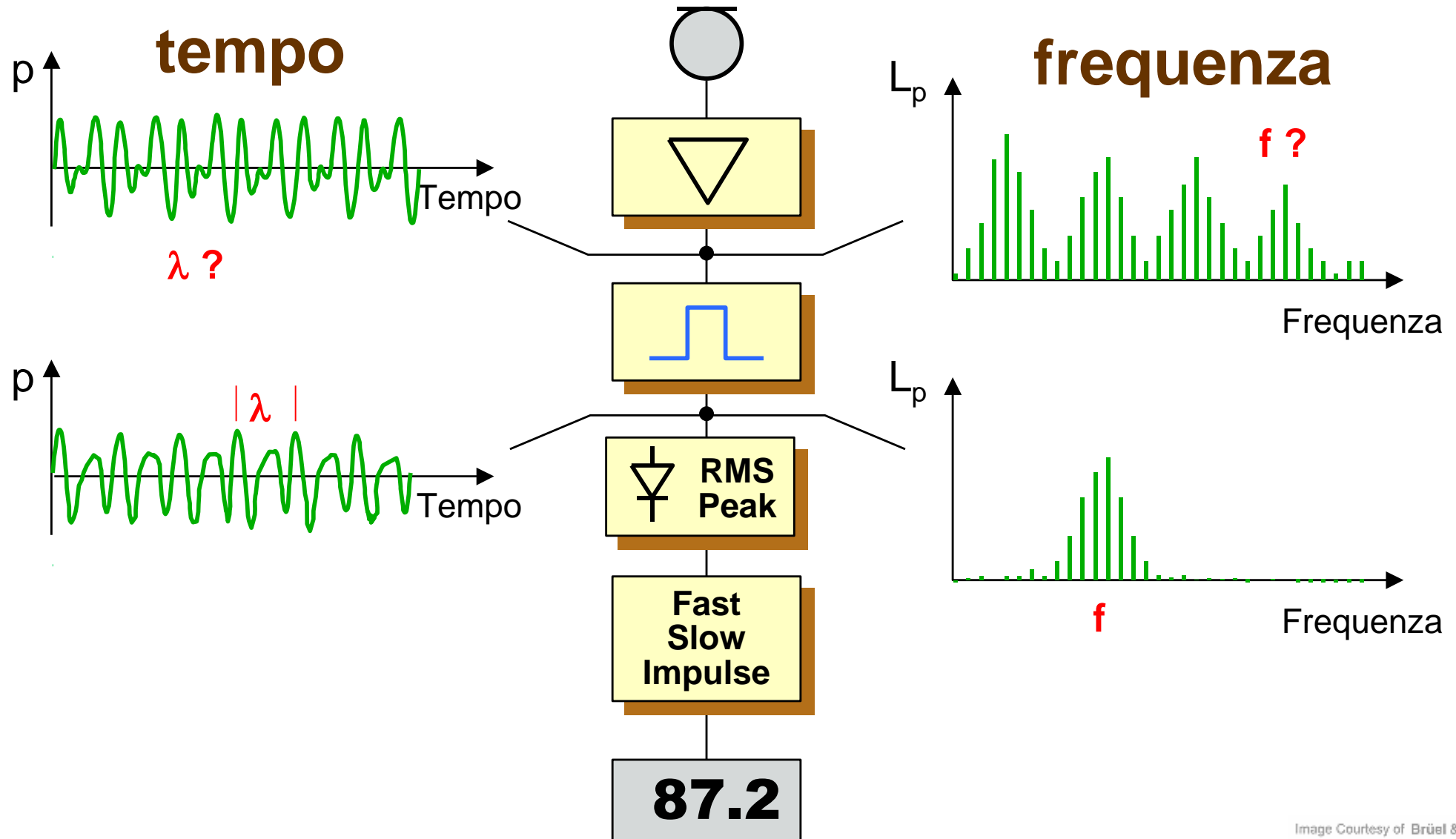
APPROSSIMAZIONE DI UN SEGNALE MEDIANTE SERIE DI FOURIER



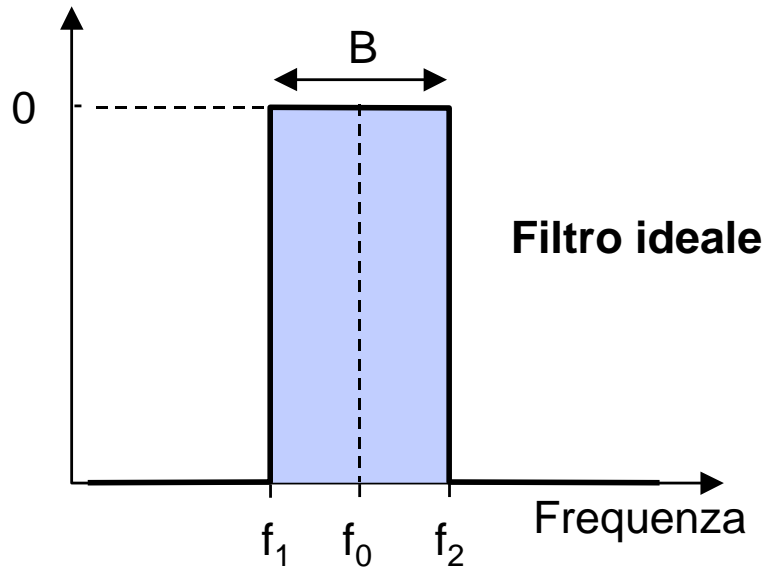
SPETTRO DI TONI PURI E LORO COMPOSIZIONE



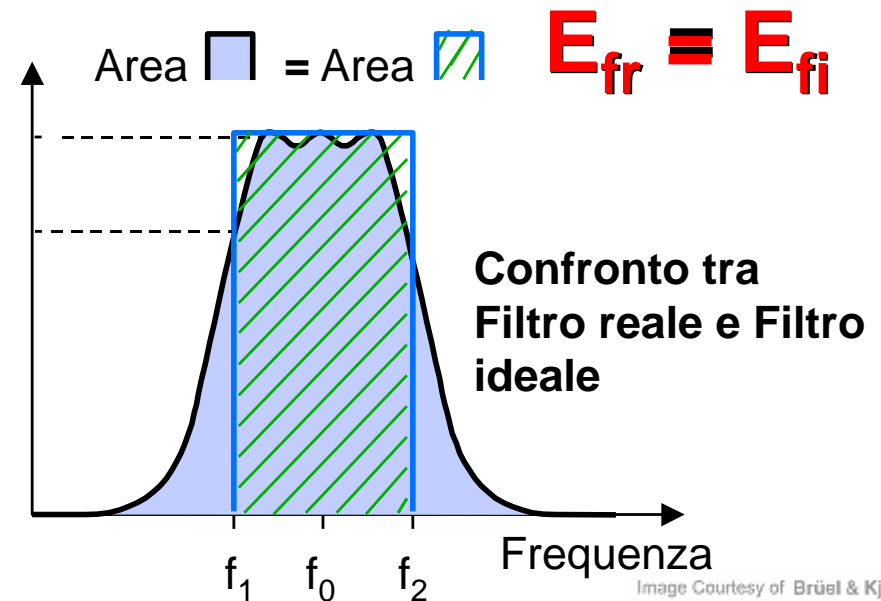
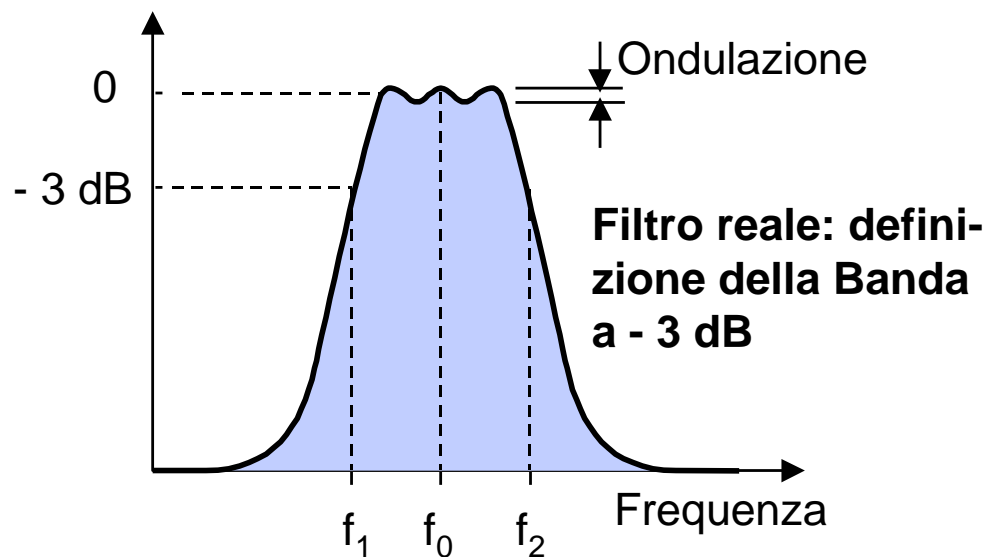
CONCETTO DI FILTRO



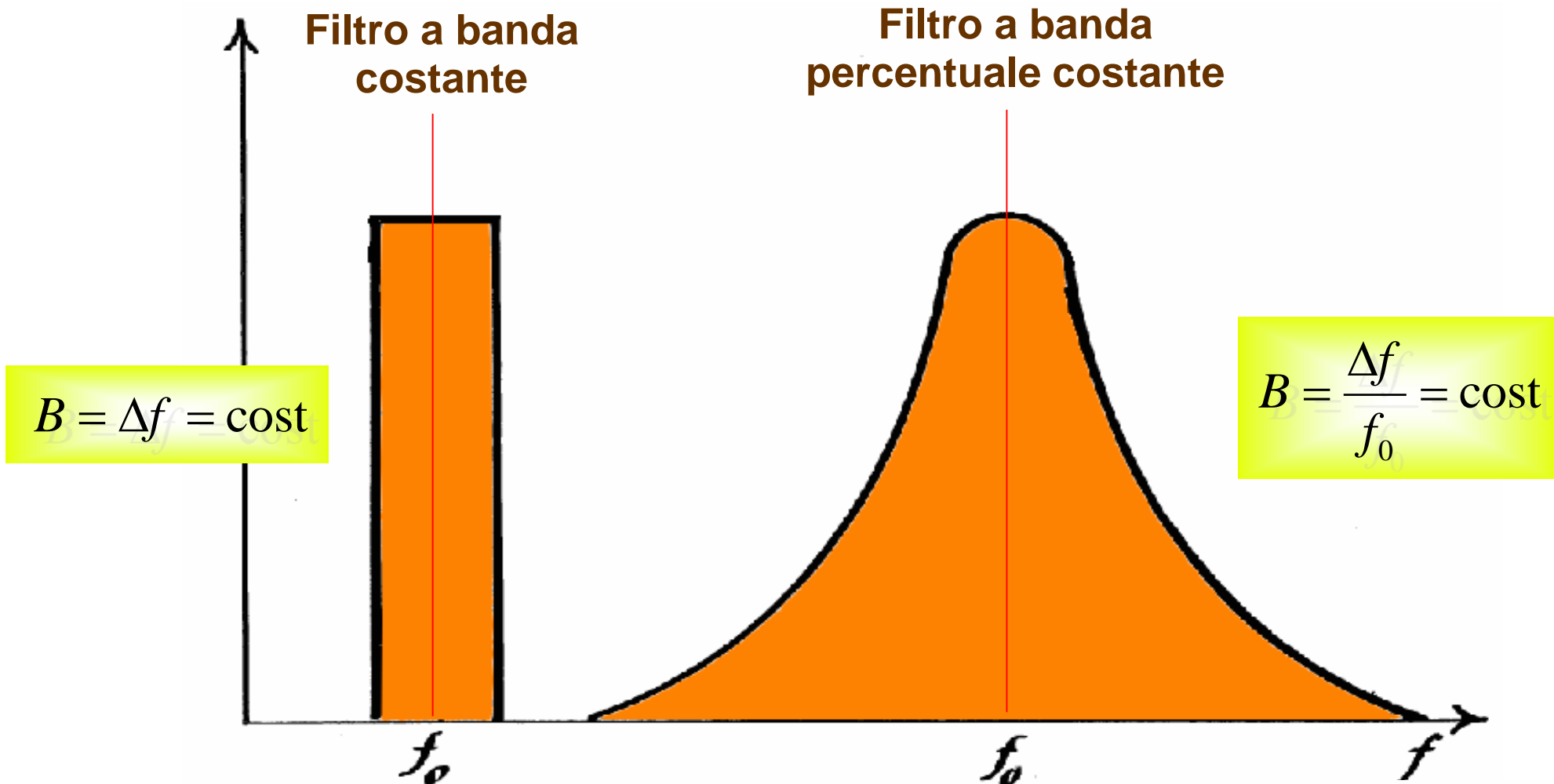
IL FILTRO IDEALE



Banda = $f_2 - f_1$
Centro Frequenza = f_0

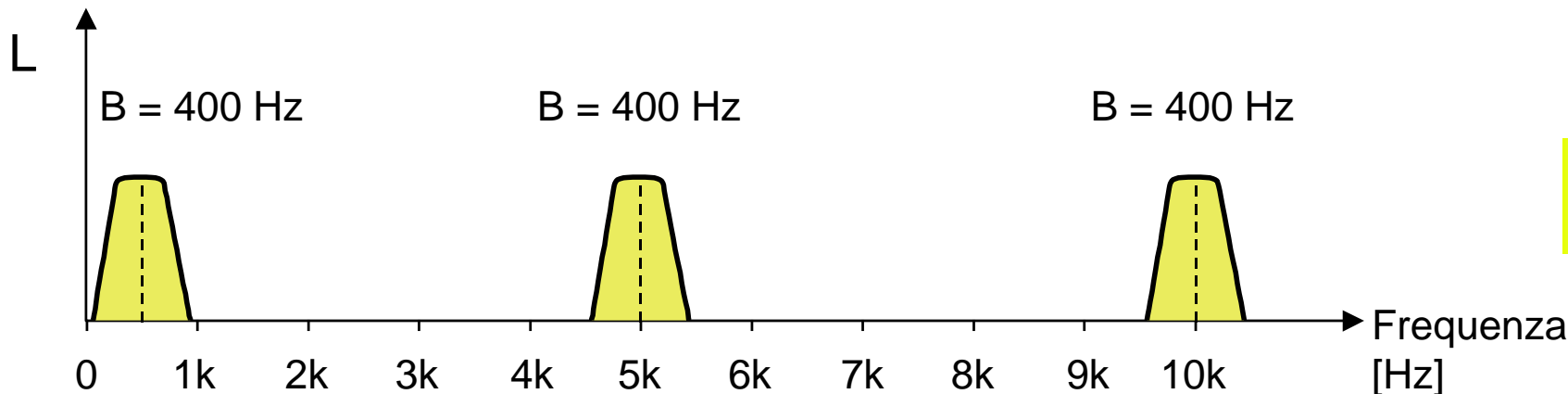


FILTRI A BANDA COSTANTE E PERCENTUALE COSTANTE



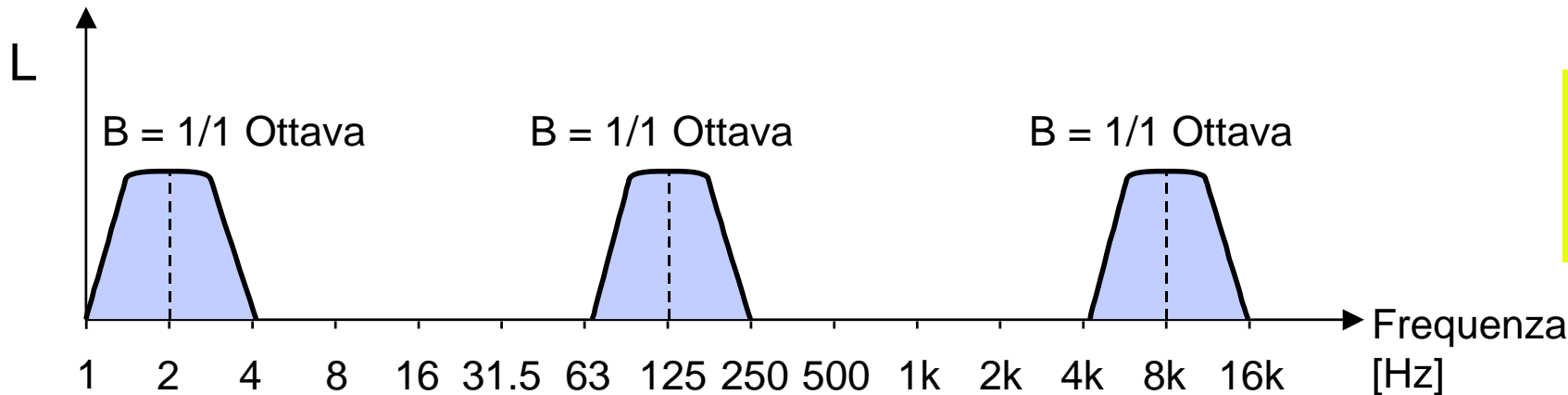


FILTRI A BANDA COSTANTE E PERCENTUALE COSTANTE



Asse della frequenza LINEARE
(generalmente usato nell'analisi delle vibrazioni)

$$B = \Delta f = \text{cost}$$

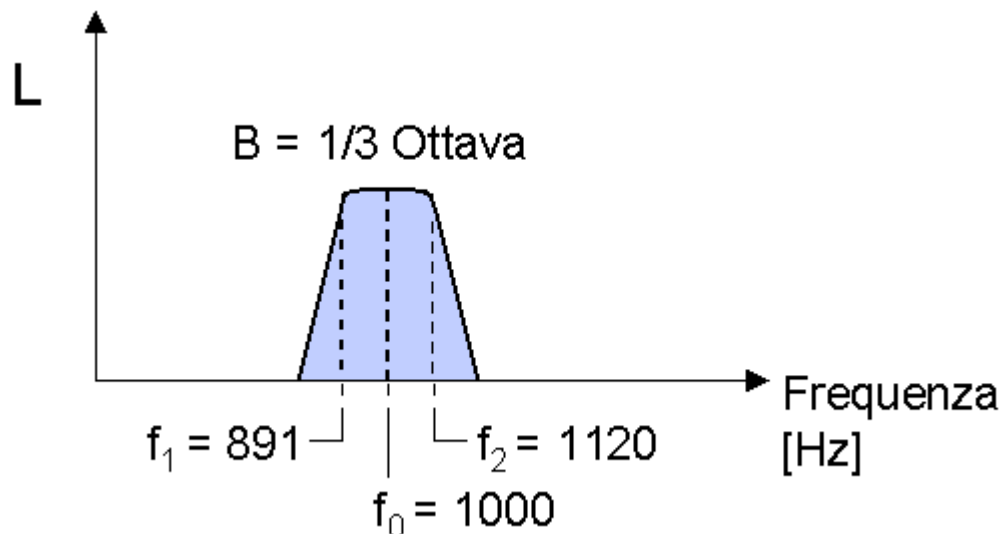
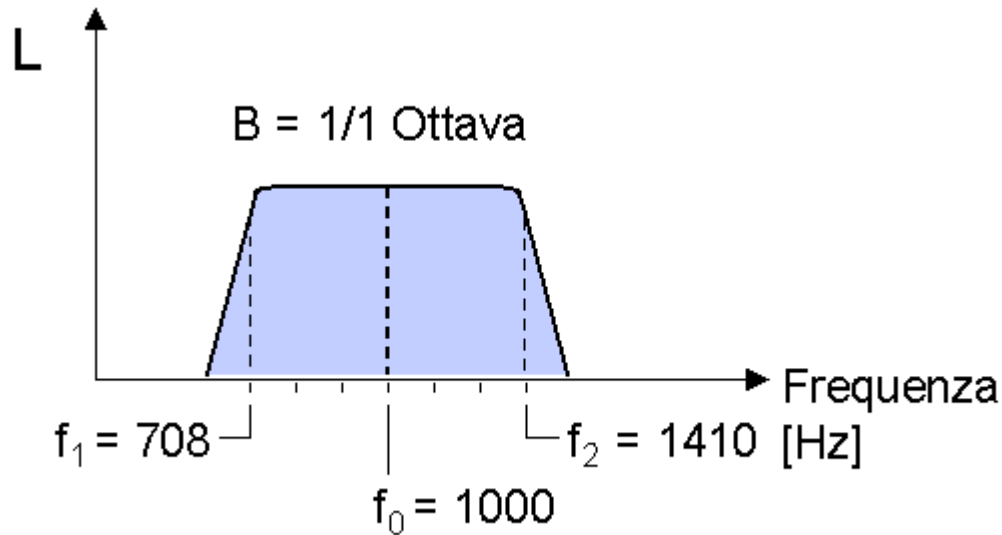


Asse della frequenza LOGARITMICO
(generalmente usato nell'analisi acustica)

$$B = \frac{\Delta f}{f_0} = \text{cost}$$

BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA

$$B = \frac{\Delta f}{f_0}$$



$$f_{\text{sup}} = 2 f_{\text{inf}}$$

$$\Delta f = f_{\text{sup}} - f_{\text{inf}} = f_{\text{inf}}$$

$$f_0 = \sqrt{f_{\text{sup}} \cdot f_{\text{inf}}} = \sqrt{2} \cdot f_{\text{inf}}$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cong 0,7 = 70 \%$$

Sono bande ad ampiezza percentuale costante

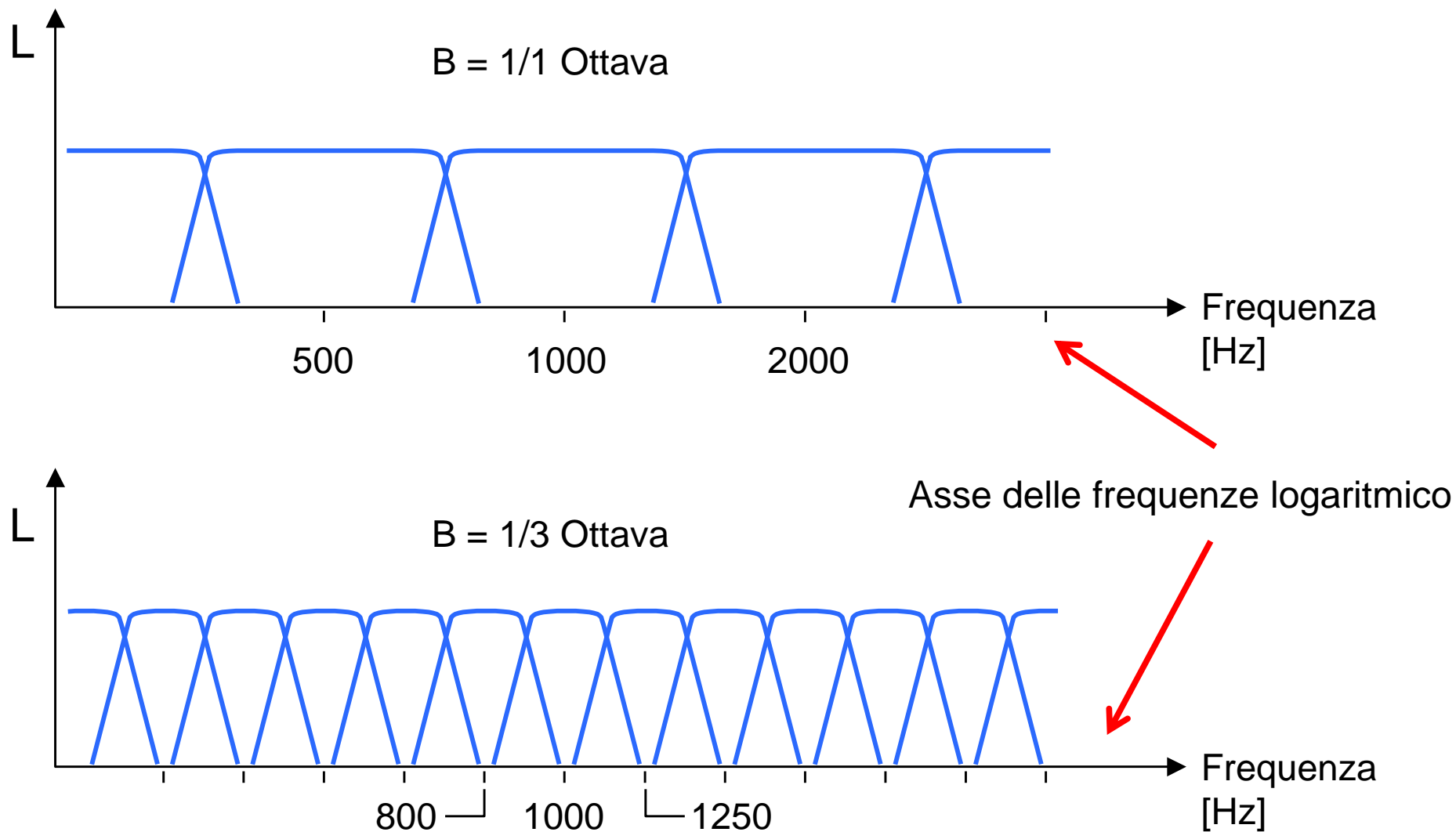
$$f_{\text{sup}} = 2^{1/3} f_{\text{inf}}$$

$$\Delta f = f_{\text{sup}} - f_{\text{inf}} = (2^{1/3} - 1) f_{\text{inf}}$$

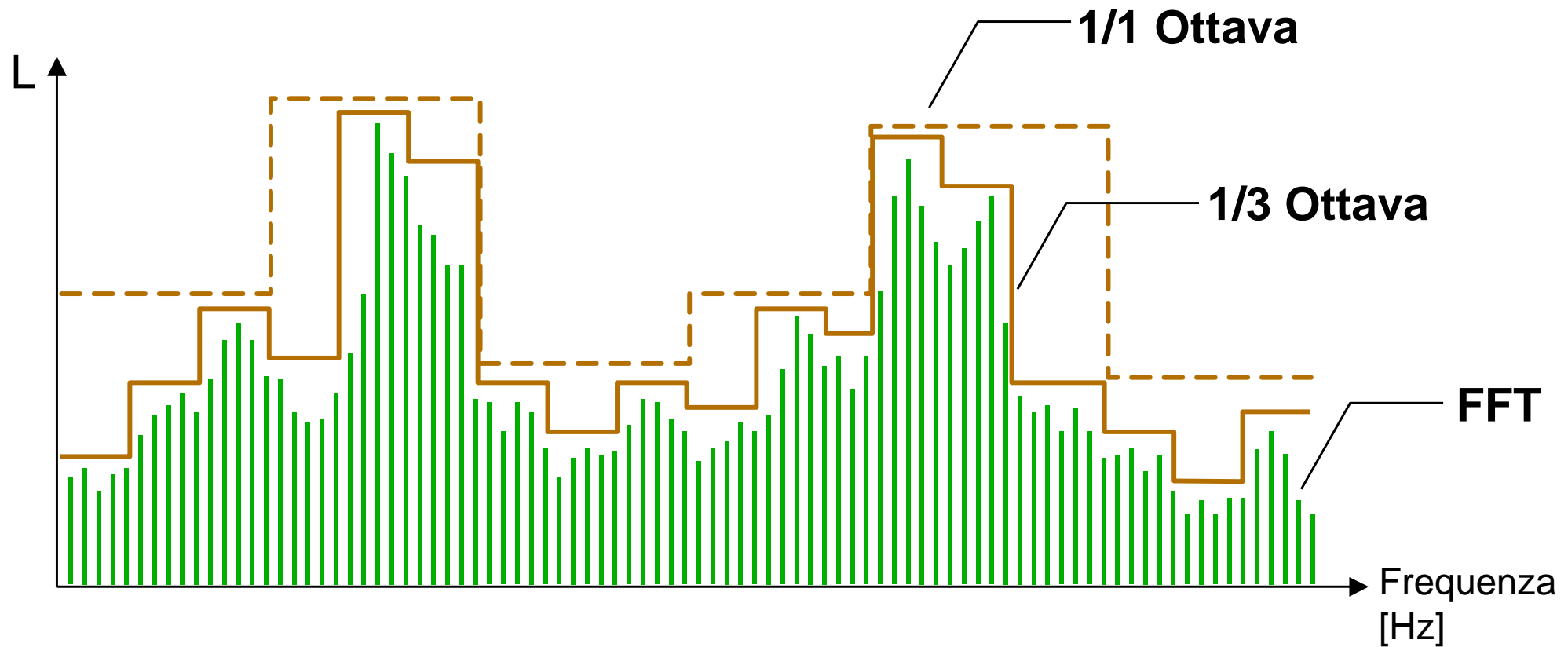
$$f_0 = \sqrt{f_{\text{sup}} \cdot f_{\text{inf}}} = 2^{1/6} \cdot f_{\text{inf}}$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{(2^{1/3} - 1)}{2^{1/6}} \cong 0,23 = 23 \%$$

BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA



BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA



BANDE NORMALIZZATE (IEC1260)

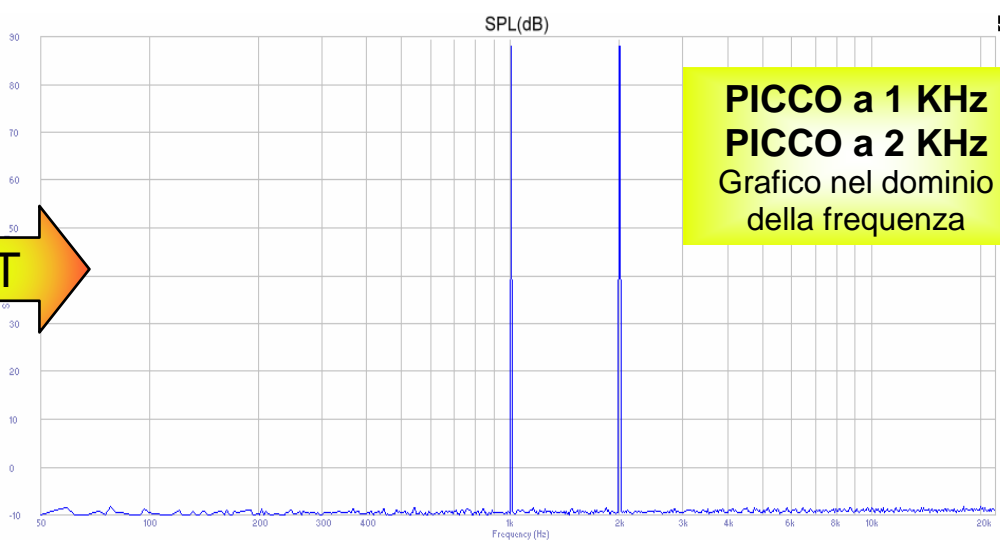
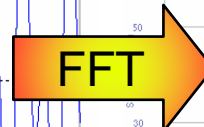
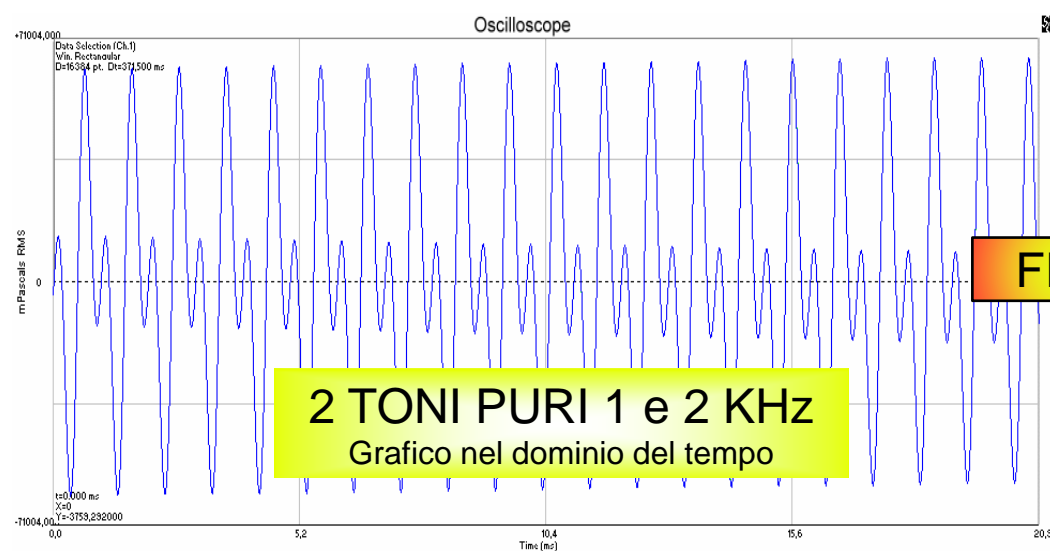
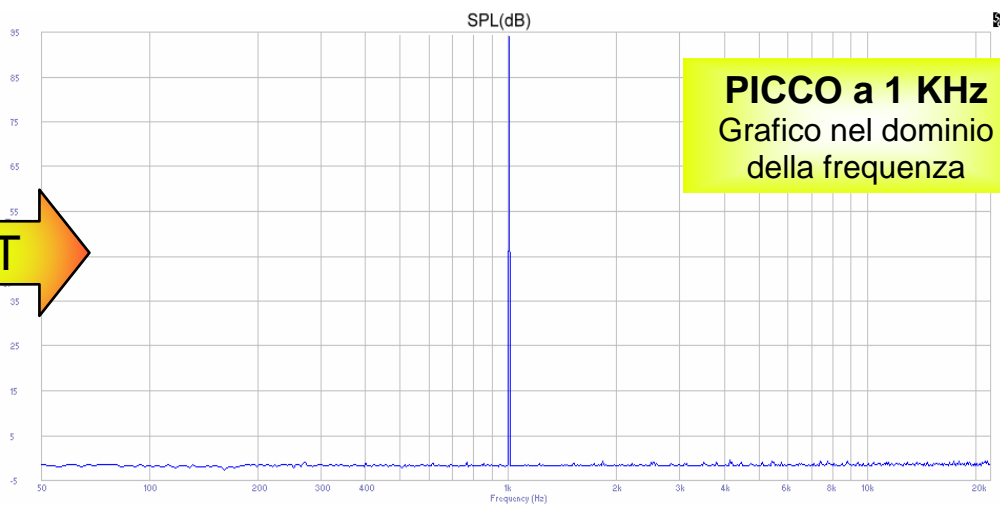
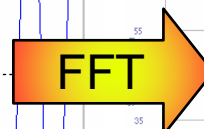
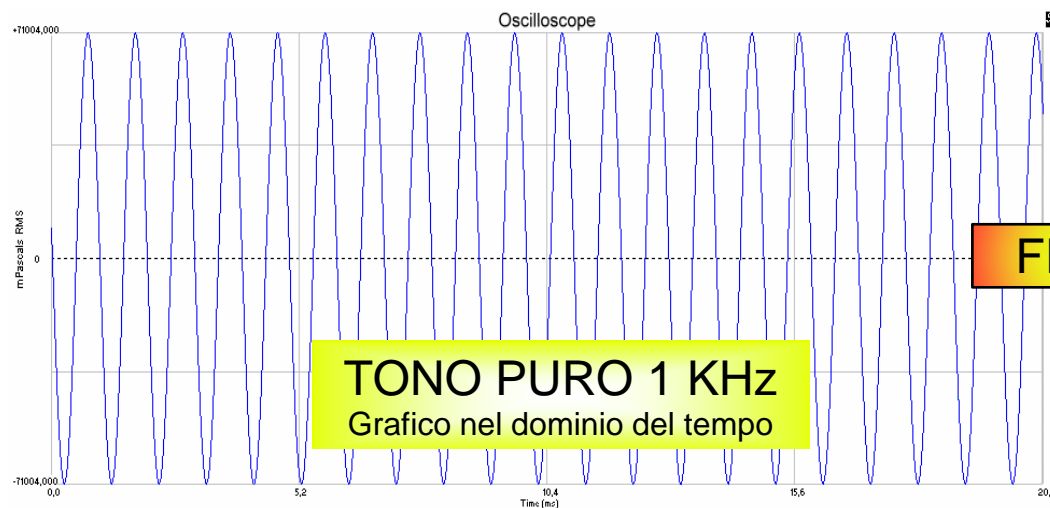
Banda No.	Centro frequenza Nominale Hz	Banda Filtro 1/3 ottava Hz	Banda Filtro 1/1 ottava Hz
1	1.25	1.12 – 1.41	1.41 – 2.82
2	1.6	1.41 – 1.78	
3	2	1.78 – 2.24	
4	2.5	2.24 – 2.82	
5	3.15	2.82 – 3.55	
6	4	3.55 – 4.47	
27	500	447 – 562	355 – 708
28	630	562 – 708	
29	800	708 – 891	
30	1000	891 – 1120	
31	1250	1120 – 1410	
32	1600	1410 – 1780	
40	10 K	8910 – 11200	11.2 – 22.4 K
41	1.25 K	11.2 – 14.1	
42	16 K	14.1 – 17.8 K	
43	20 K	17.8 – 22.4 K	

BANDE NORMALIZZATE (IEC1260) – Frequenze di centro banda (1/1, 1/2 e 1/3 di Ottava)

16	16	12.5	250	250	200	4000	4000	3150
		16			250			250
31.5	22.4	20	500	500	315	8000	8000	5000
	31.5	25			400			6300
	45	31.5			500			8000
63	63	40	1000	1000	630	16000	16000	10000
	90	50			800			12500
	125	63			1000			16000
125	125	80	2000	2000	1250	31500	31500	20000
	180	90			1400			22400
		125			1000			2000
		160		2000	2000			25000
				2800	2500			40000

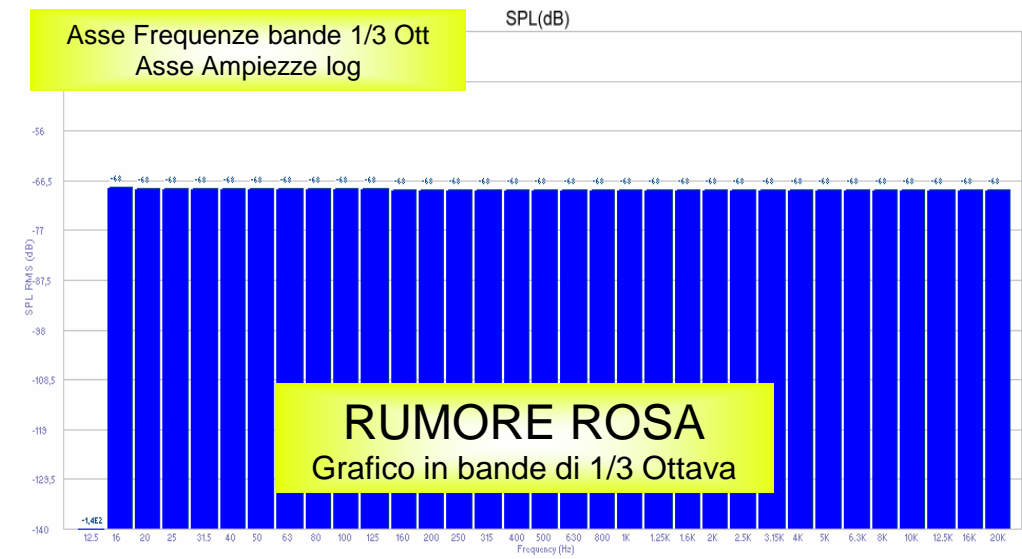
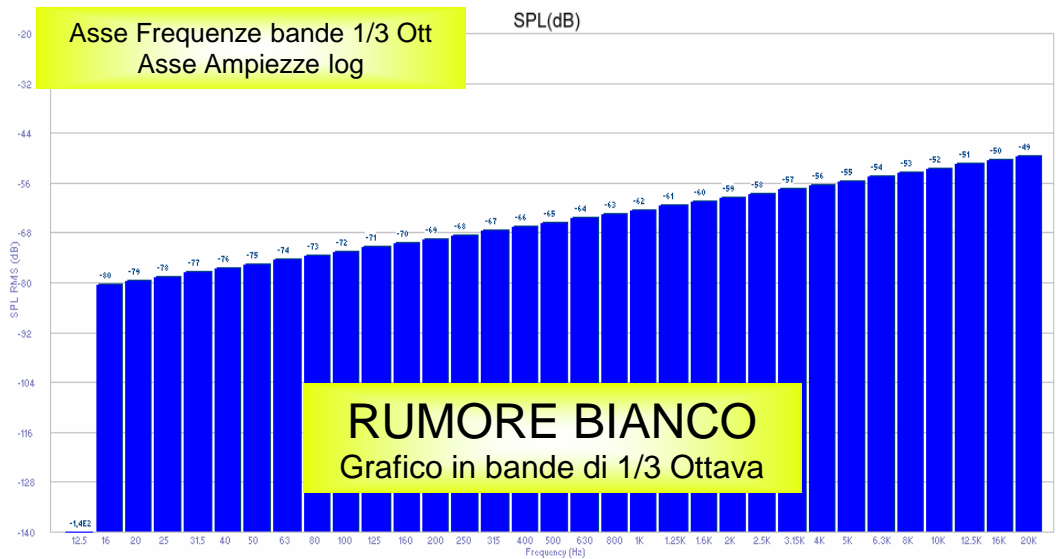
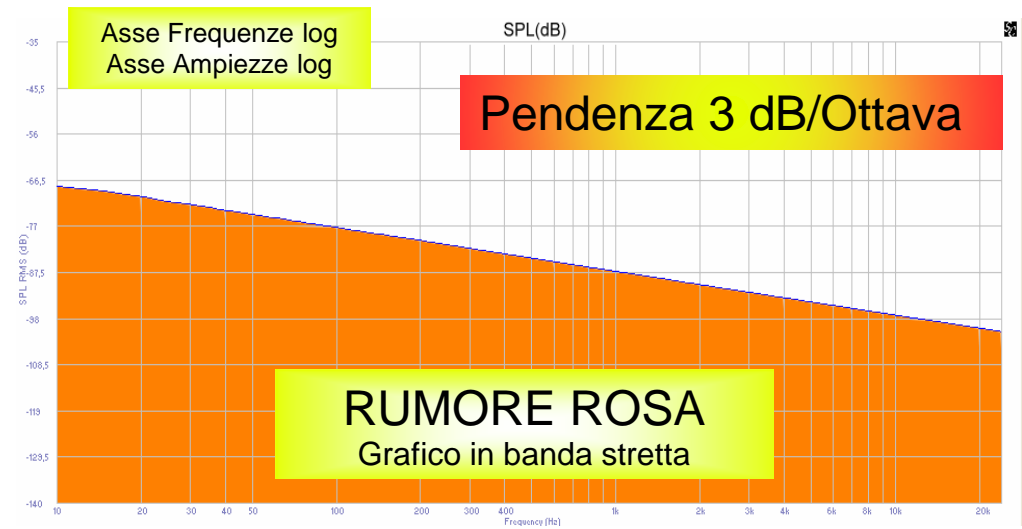
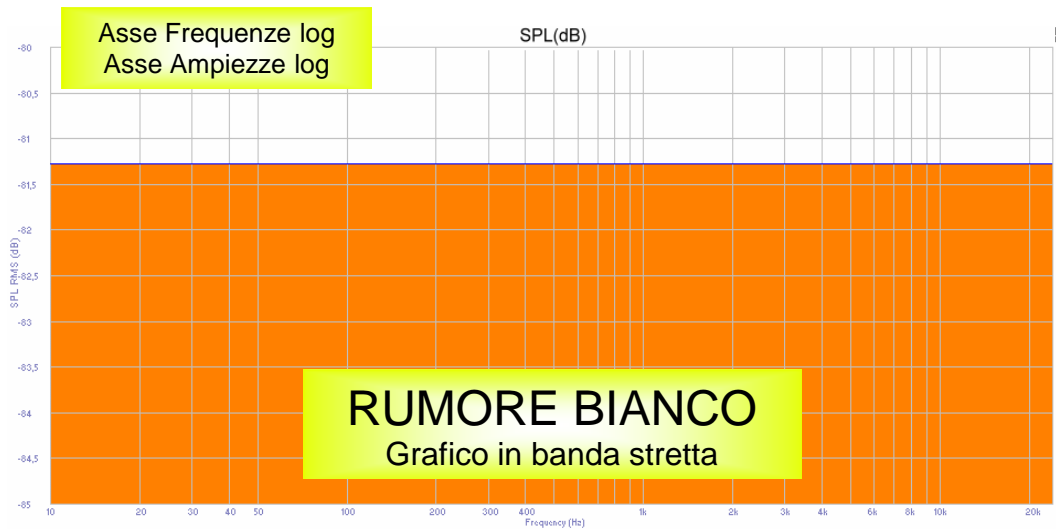


ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



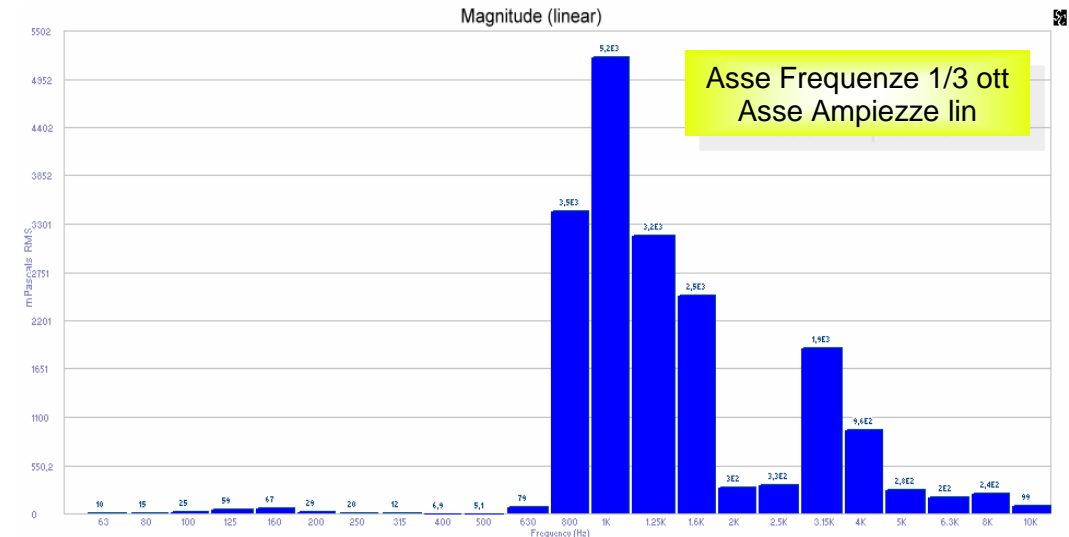
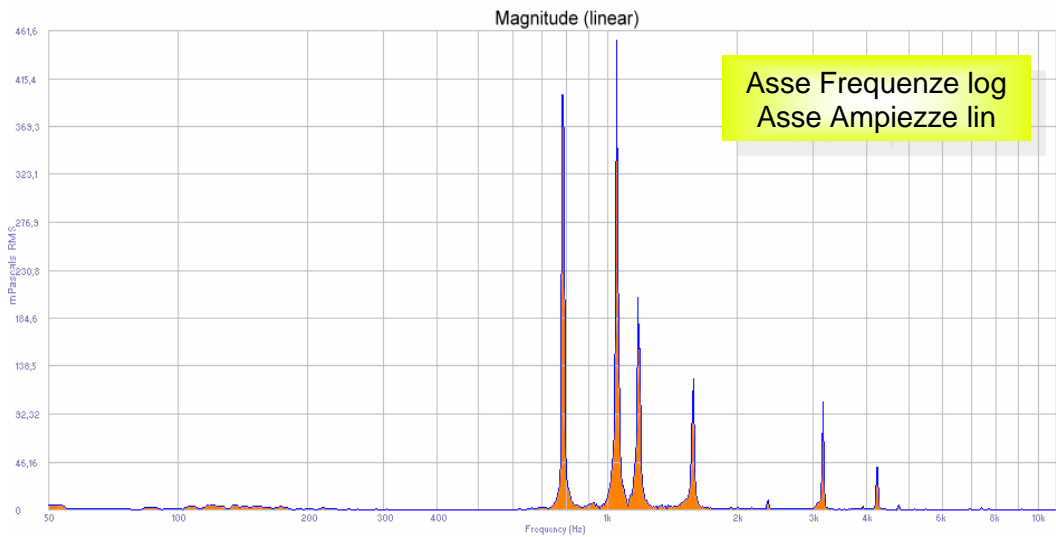
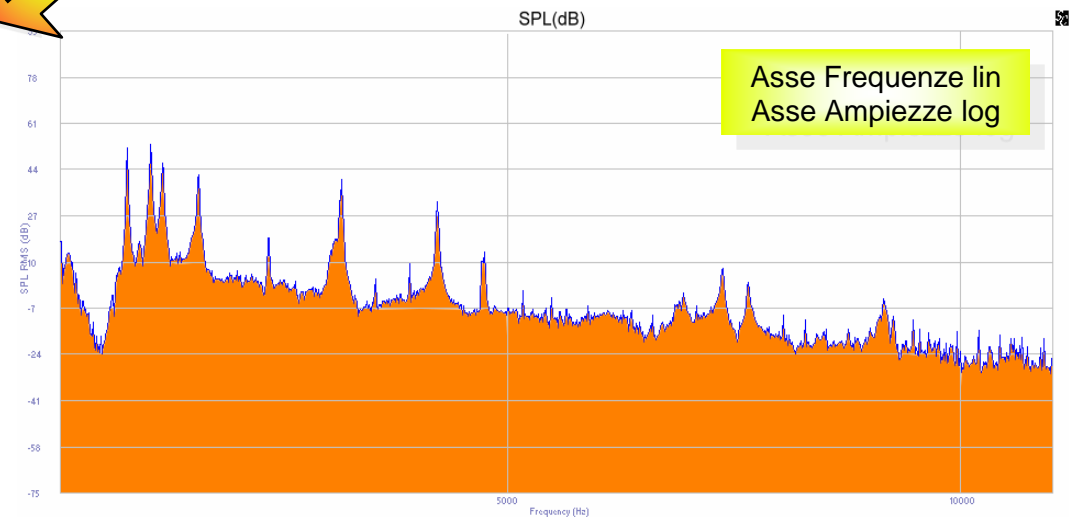
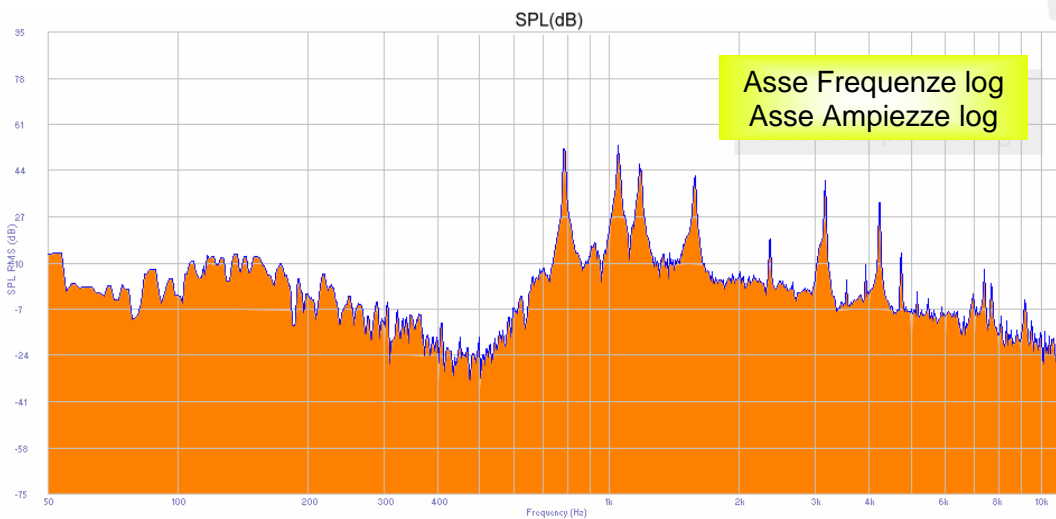
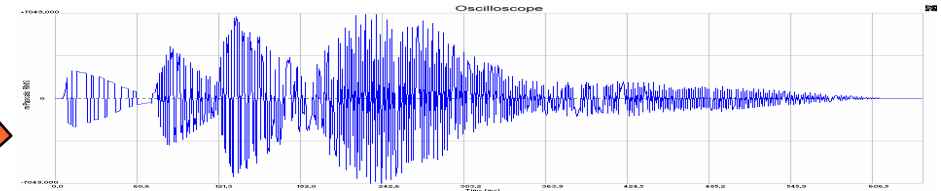


ESEMPI DI SUONI E SPETTRI

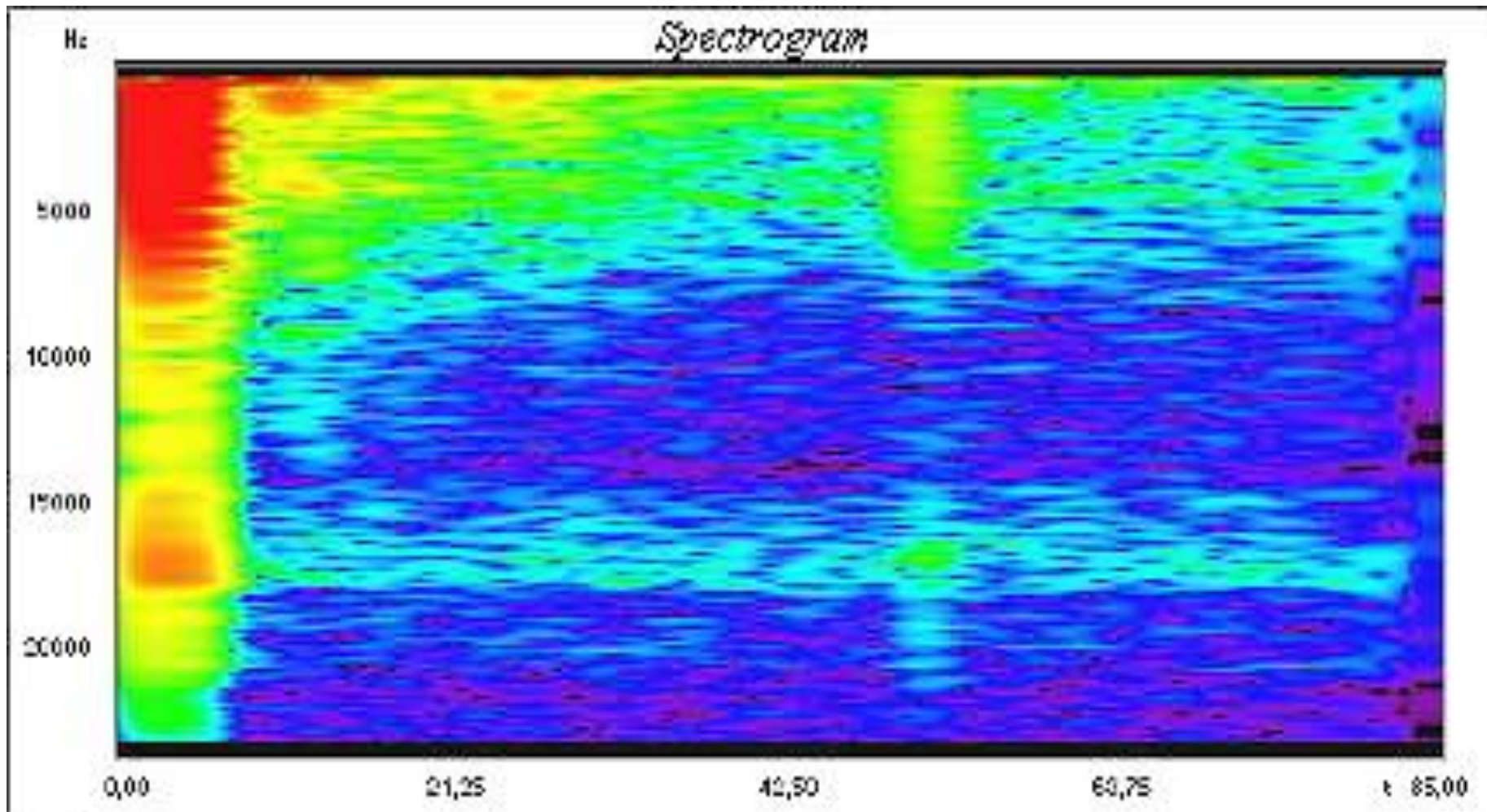




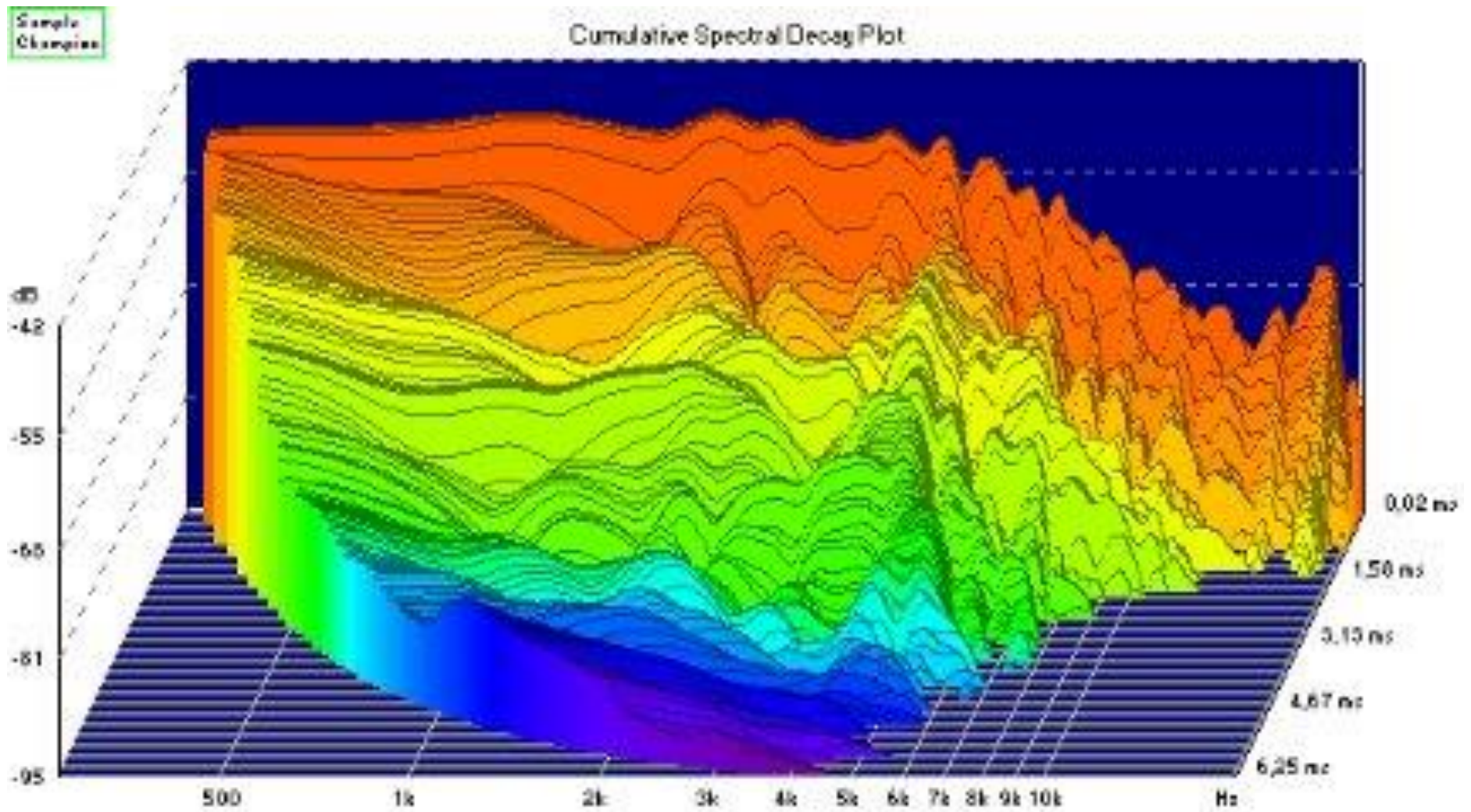
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



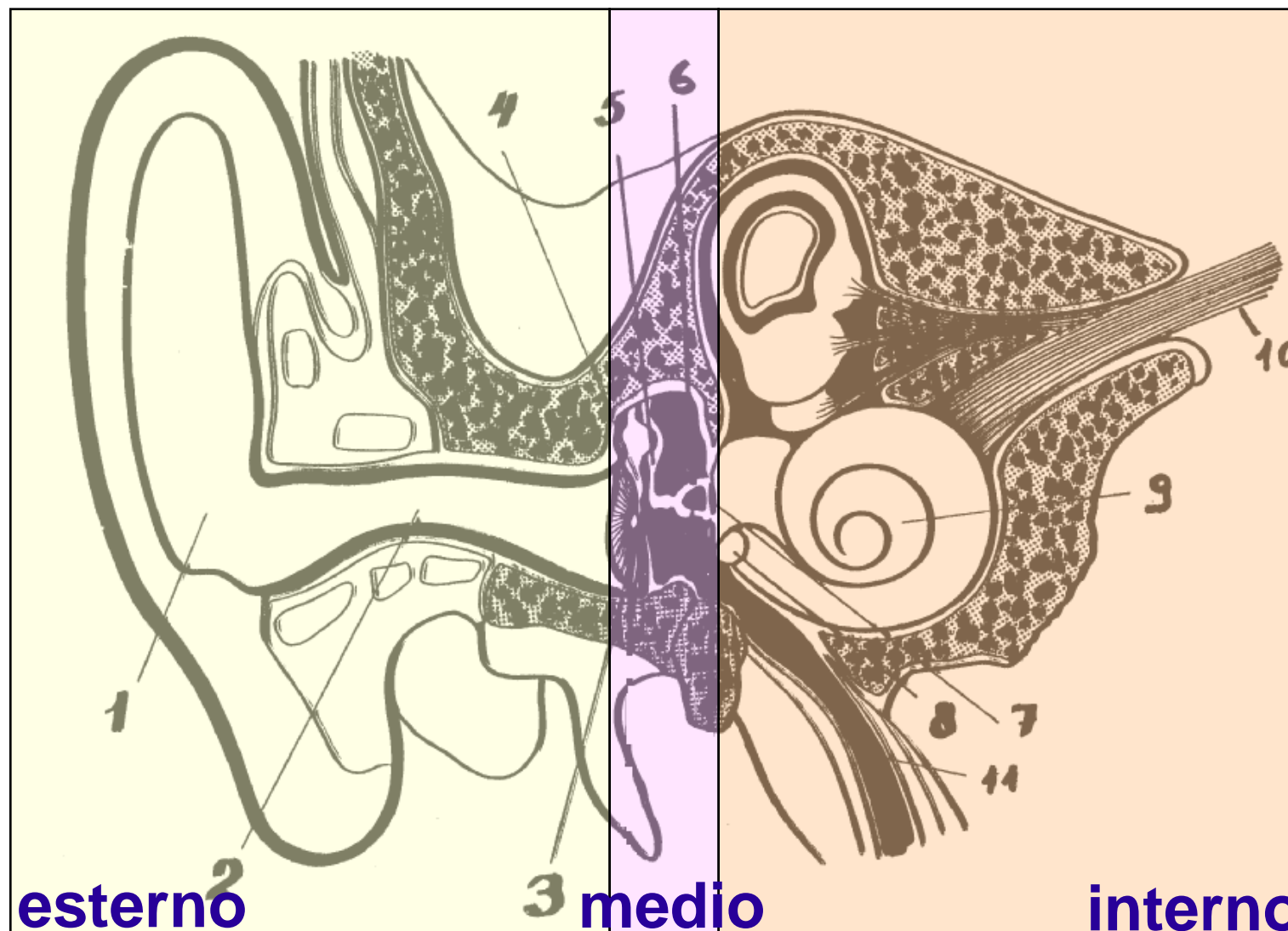
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI

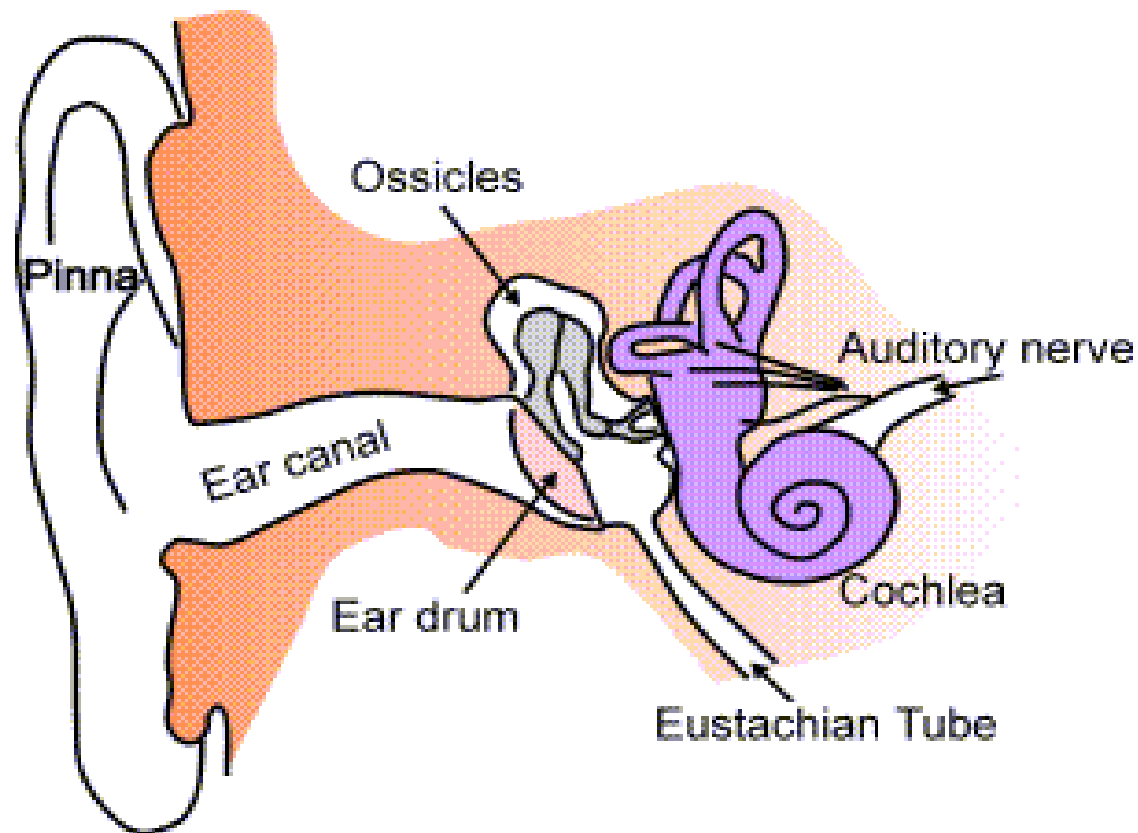


ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



IL SISTEMA Uditivo UMANO

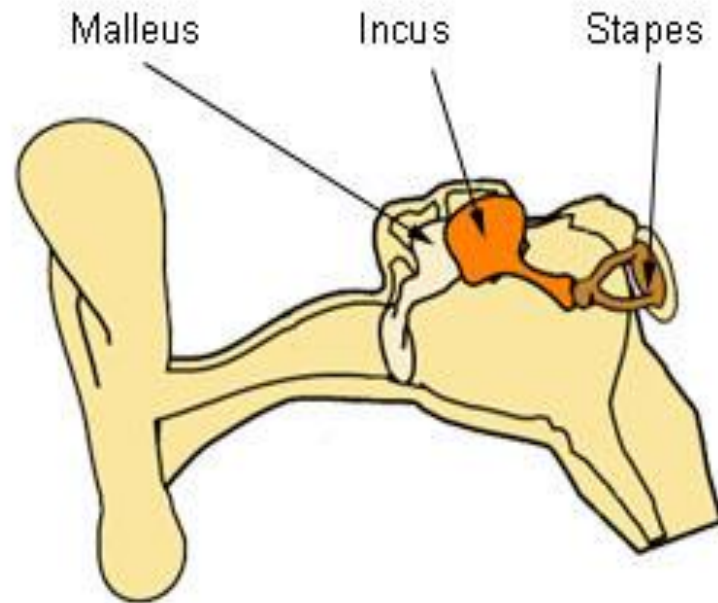
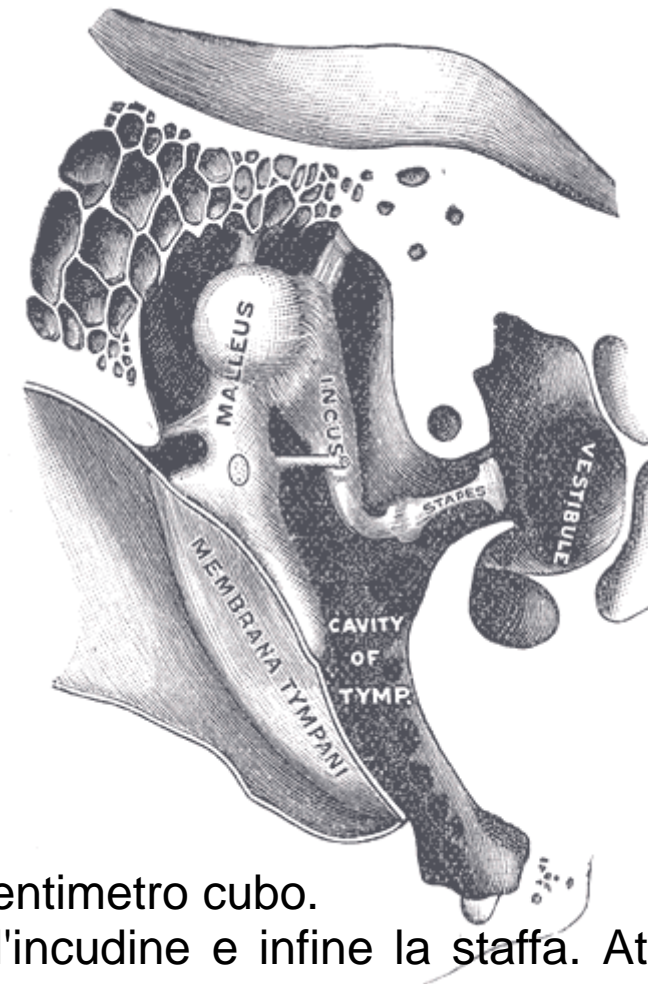




ORECCHIO ESTERNO: Il padiglione auricolare è posto all'esterno dell'orecchio, seguito dal condotto uditivo, che si conclude sulla membrana del timpano

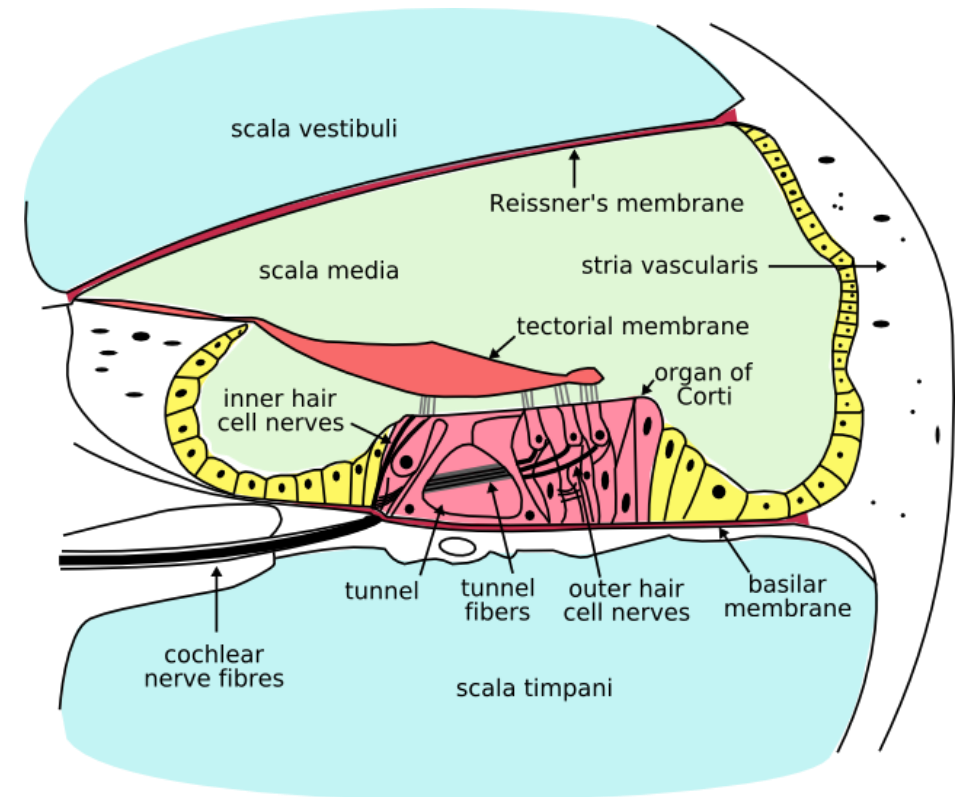
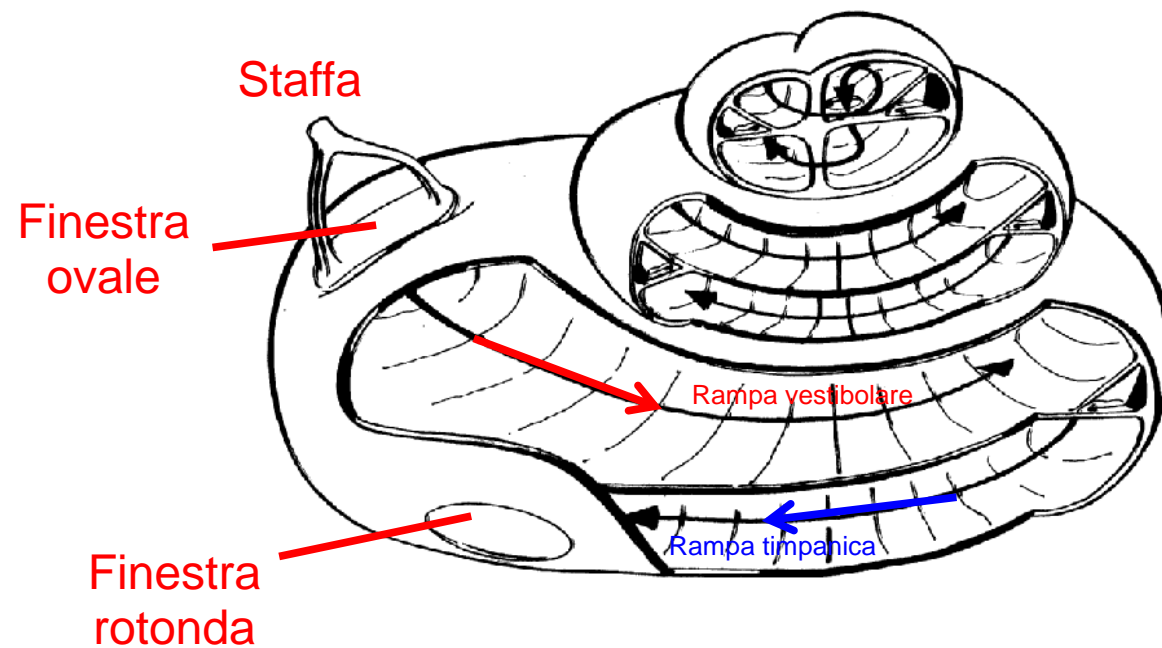
ORECCHIO MEDIO: contiene 3 ossicini (martello, incudine e staffa); è in comunicazione con naso e bocca tramite la tuba di Eustachio (riequilibrio di pressione)

ORECCHIO INTERNO: chiocciola contenente cellule che “sentono” i suoni

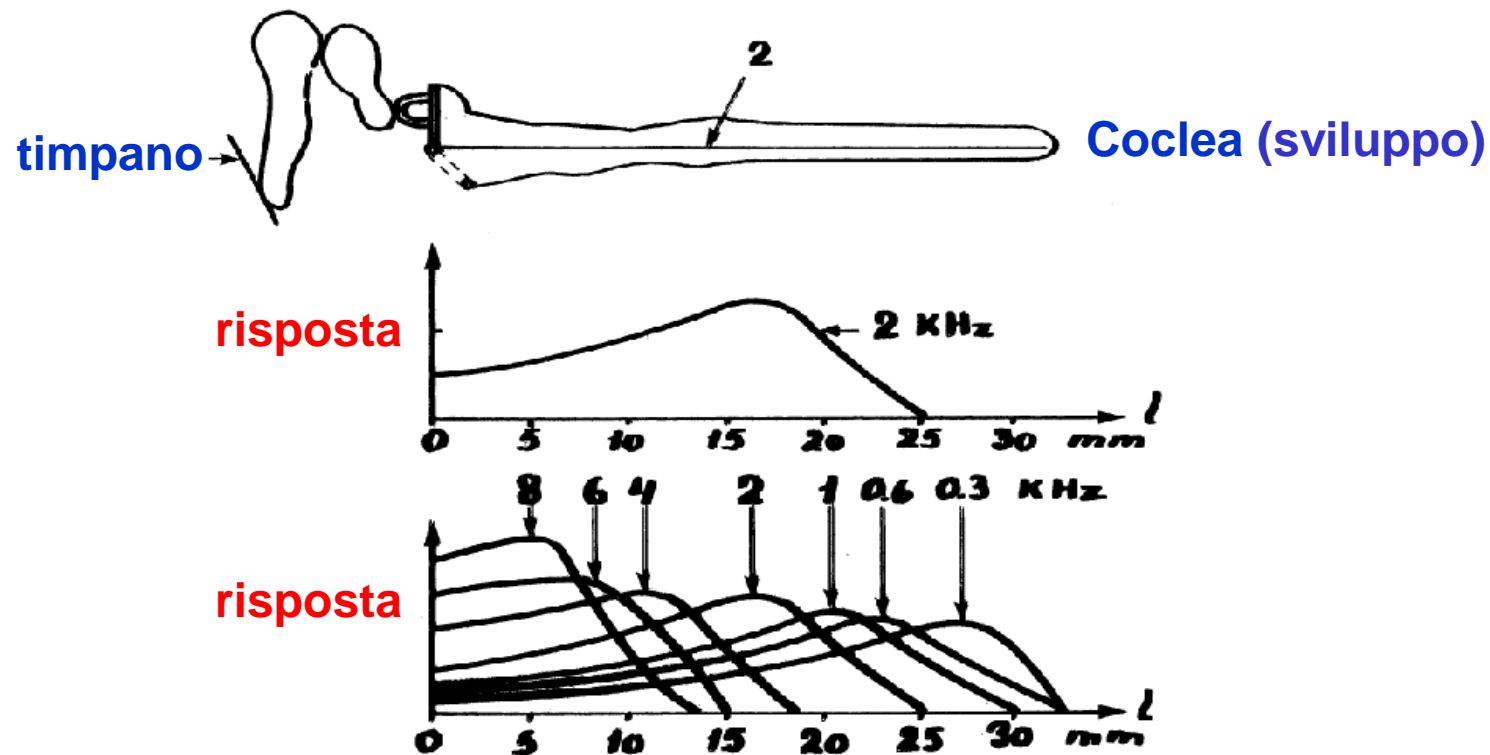
**Cranial Bones**

La cavità contenente i 3 ossicini ha dimensioni di circa 1 centimetro cubo.

Il martello è attaccato alla membrana timpanica, segue l'incudine e infine la staffa. Attaccato alla staffa è il muscolo stapideo. Il sistema formato dai 3 ossicini funziona come un adattatore di impedenza. Il sistema uditivo può in parte variare la sua impedenza tramite il muscolo stapideo, che irrigidisce la catena degli ossicini. Il riflesso stapediale si attiva all'arrivo di suoni superiori a 85 dB e permette di sentire meglio le basse frequenze. Fornisce solo in minima parte funzione protettiva a suoni troppo elevati. L'organo dell'udito non può proteggersi da suoni eccessivamente forti.



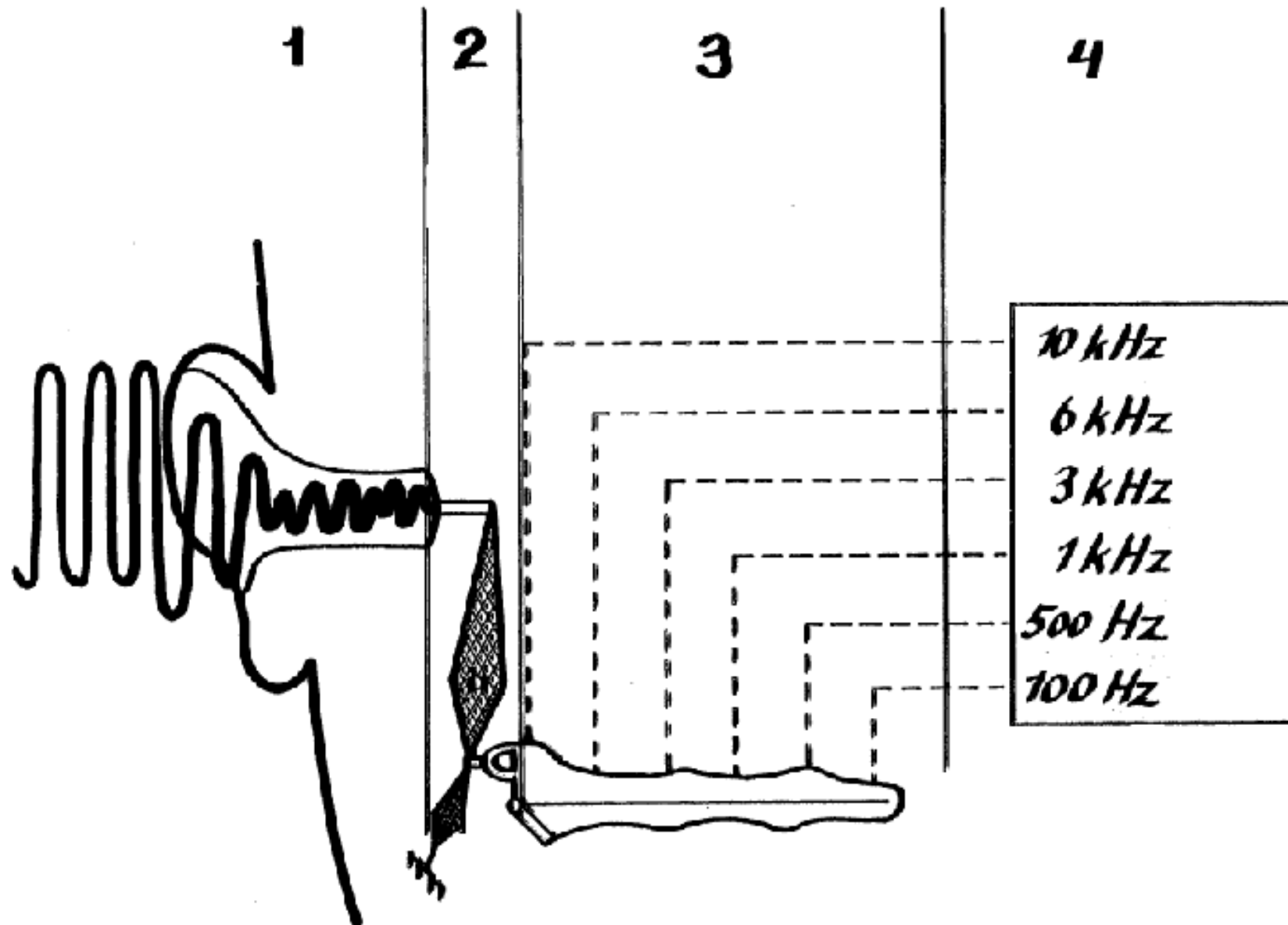
La staffa agisce come un pistone sulla finestra ovale, posta nella coclea (o chiocciola). La coclea è paragonabile a un piccolo tubicino attorcigliato su sé stesso e contenente un liquido simile ad acqua. In sezione è diviso in 3 parti: rampa vestibolare, rampa timpanica e condotto cocleare. La rampa vestibolare e quella timpanica sono congiunte all'estremità in modo da formare un condotto unico. Tra i due condotti, sulla membrana basilare, come in un sandwich, si trova l'organo del Corti, specificamente deputato alla funzione uditiva. Alla fine del condotto (rampa timpanica) è presente la finestra rotonda, una membrana elastica che serve a equilibrare le spinte sulla finestra ovale.

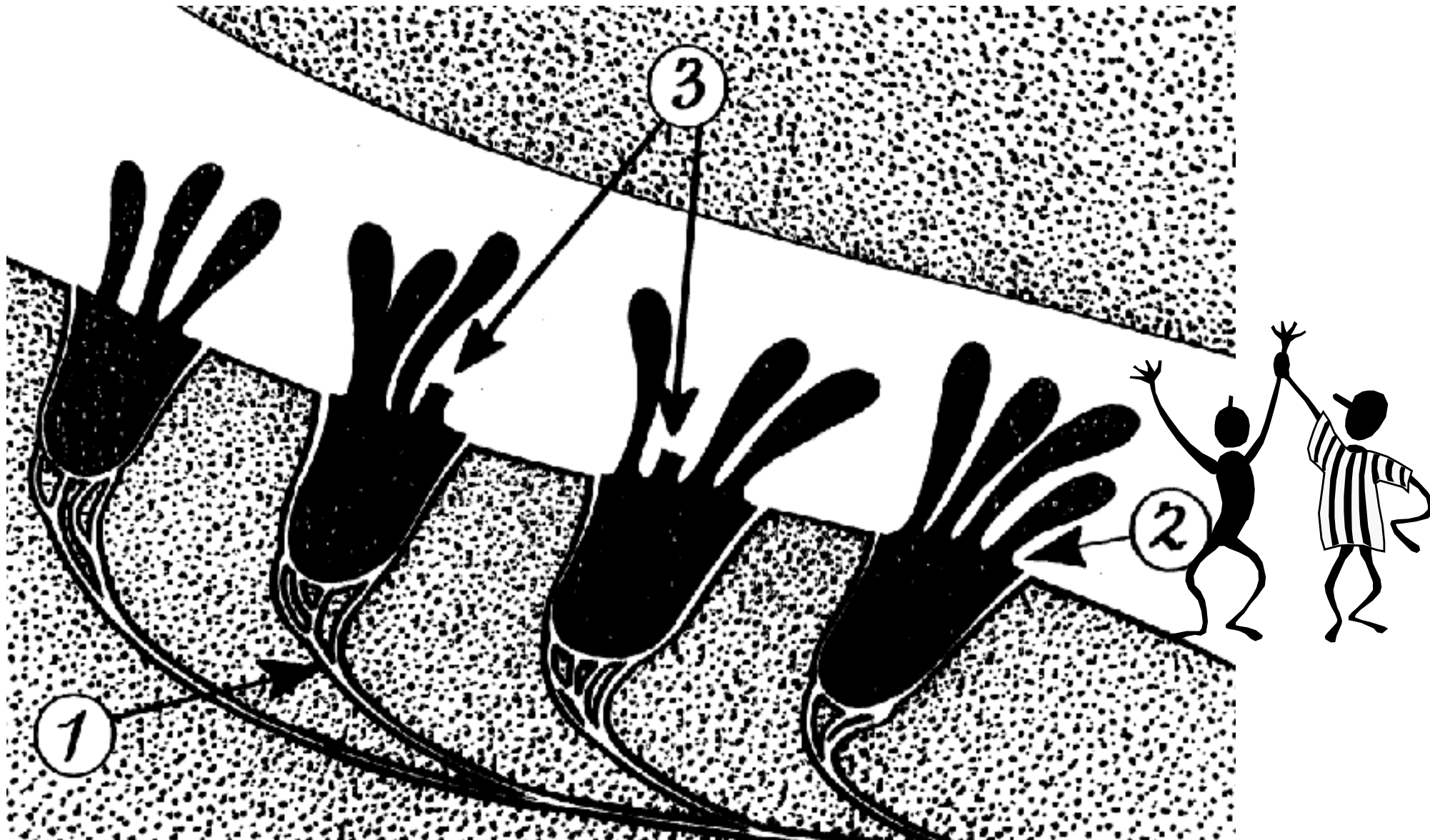


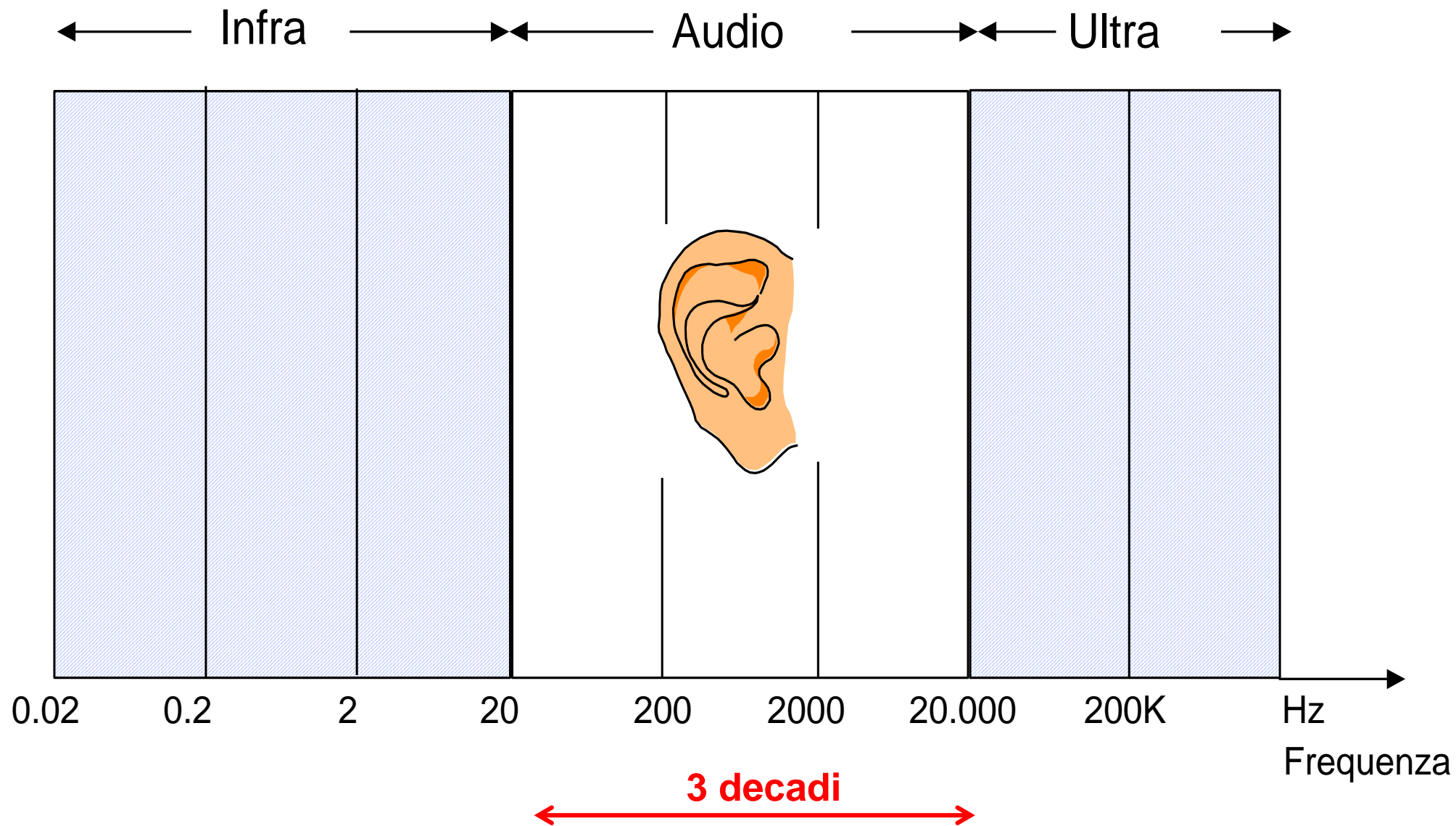
Lungo tutta l'estensione dell'organo del Corti sono presenti molte migliaia di cellule ciliate. Quando la staffa vibra in seguito a un suono, un'onda si propaga lungo la rampa vestibolare, proseguendo verso la rampa timpanica. Anche le cellule poste sulla membrana basilare sono poste in oscillazione. L'energia meccanica viene quindi trasformata in energia chimica e quindi elettrica (dell'ordine di 80 microV), raccolta dal nervo acustico. Le cellule ciliate poste nella coclea reagiscono in modo diverso alle varie frequenze a seconda della loro posizione. Vicino all'ingresso della coclea le cellule ciliate reagiscono alle frequenze acute, mentre verso l'apice le cellule "sentono" le frequenze basse. In pratica ogni cellula ciliata è sensibile a una determinata frequenza e l'orecchio effettua un'**analisi in frequenza** in tempo reale. Anche i suoni sono memorizzati dal cervello frequenza per frequenza.

ANALISI IN FREQUENZA - IL SISTEMA UditIVO UMANO

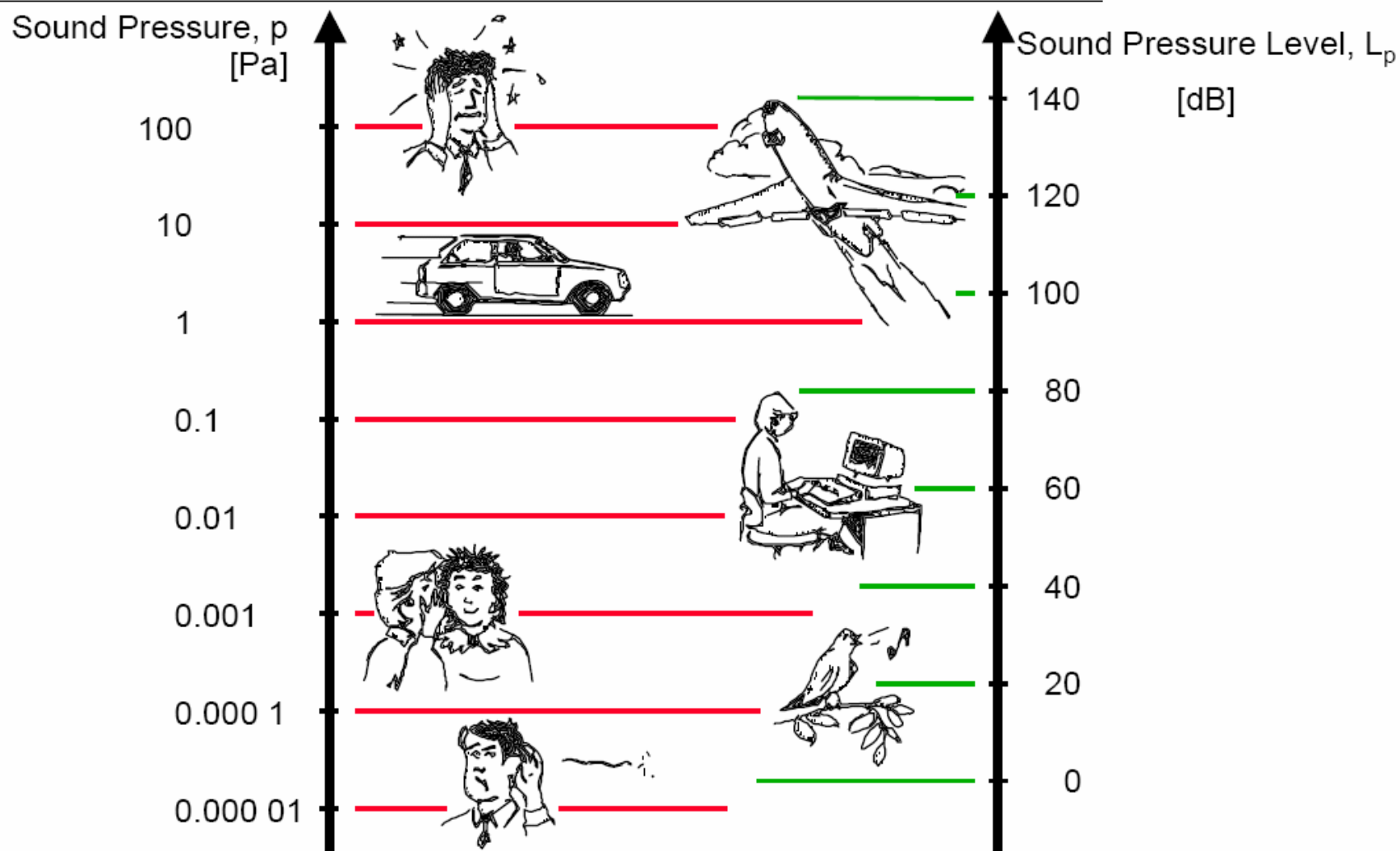
6 - Il sistema uditivo umano

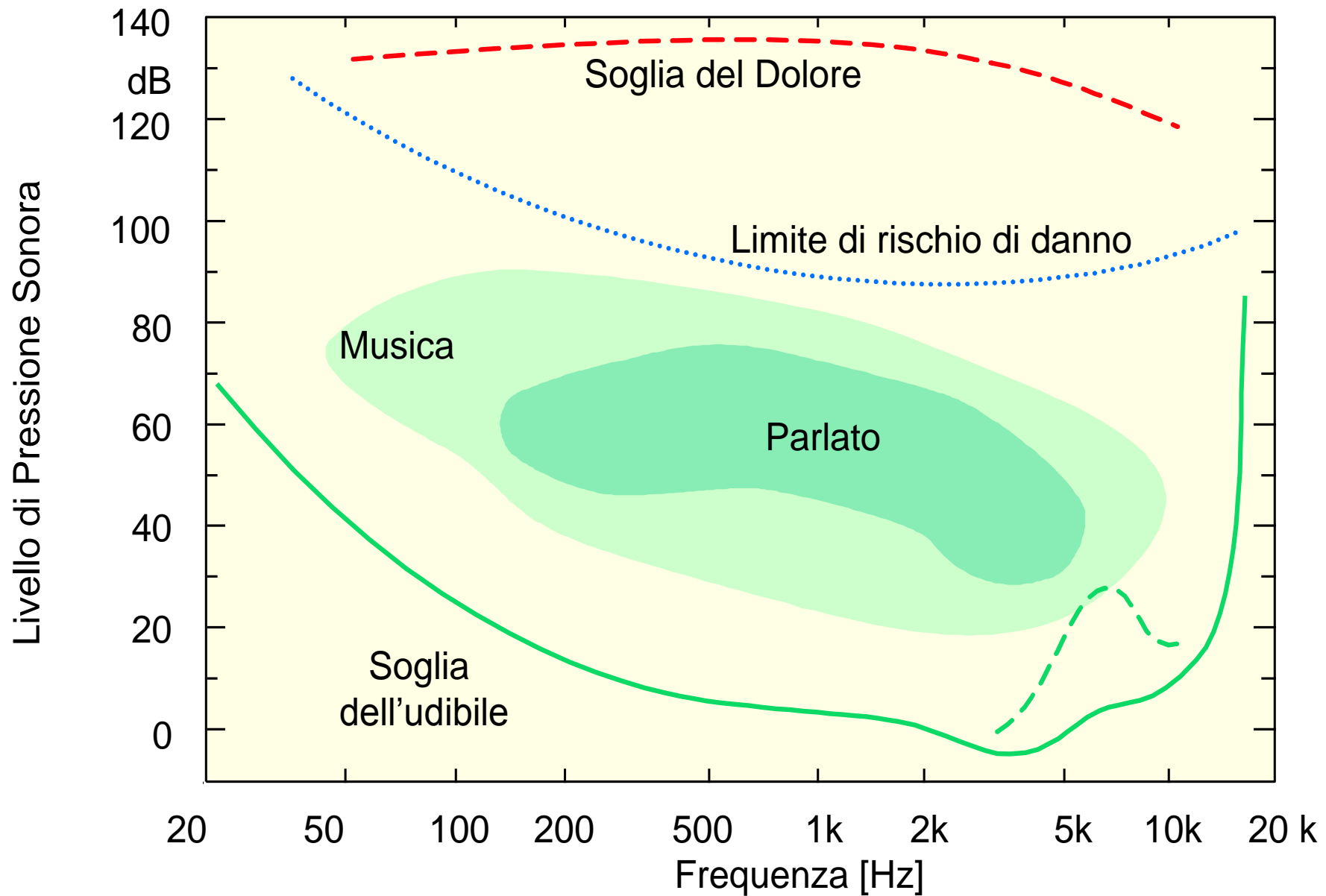






Range of Sound Pressure Levels

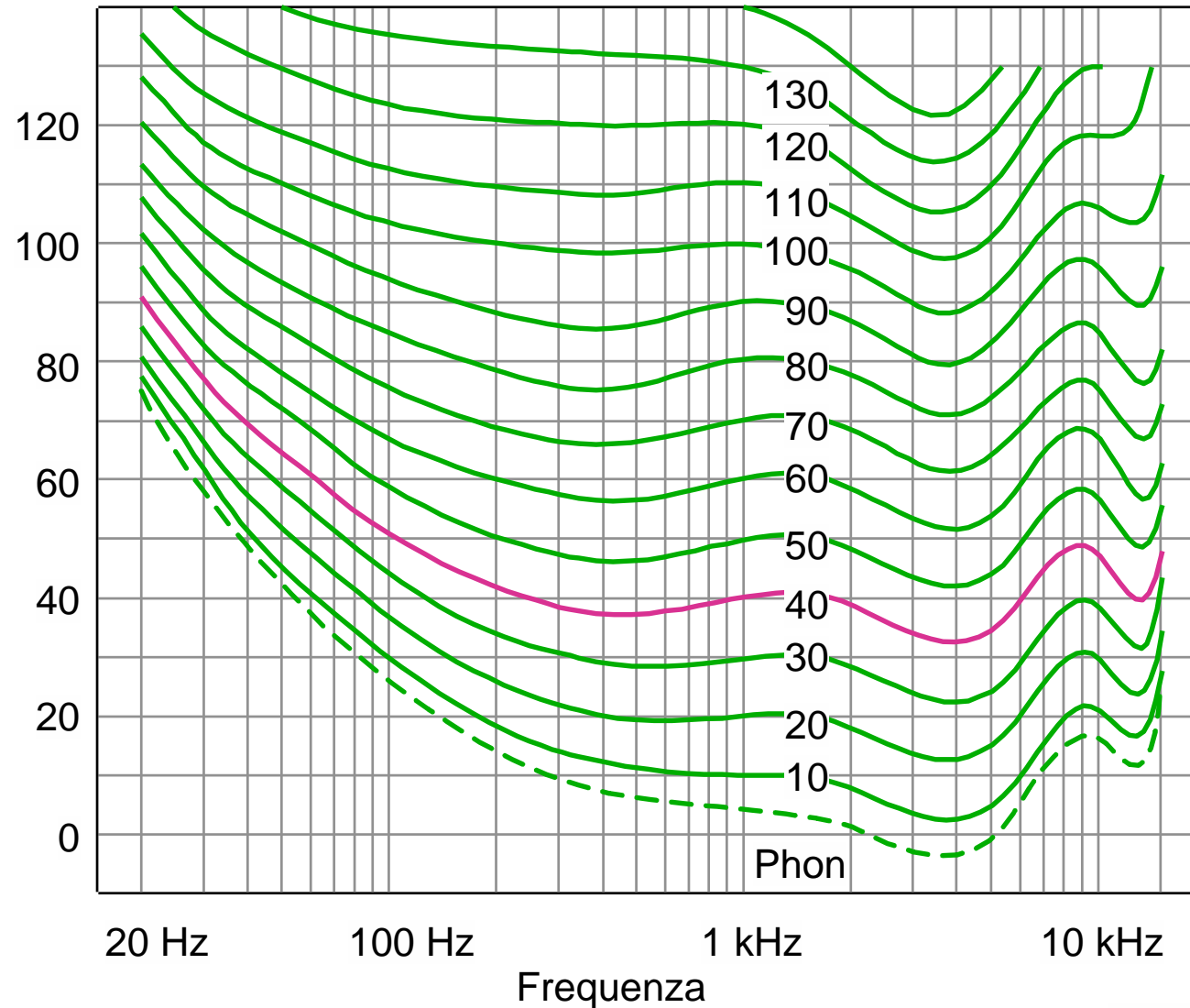




CURVE ISOFONICHE

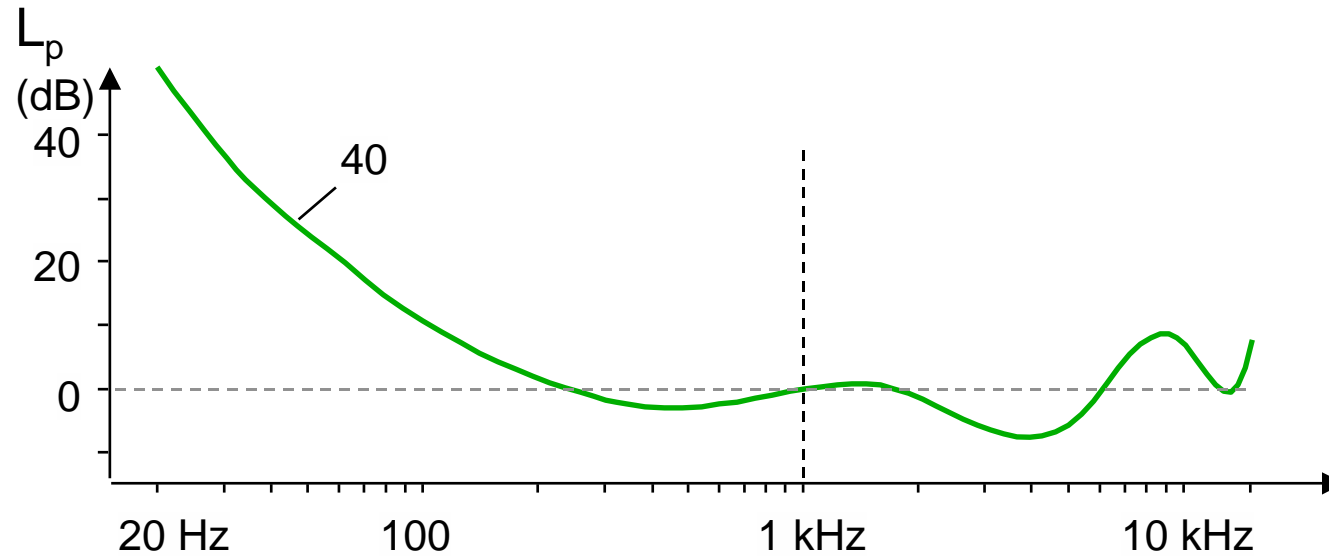
Norma ISO 226/1987: curve isofoniche

Livello di
Pressione
Sonora, L_p
(dB re 20 μ Pa)

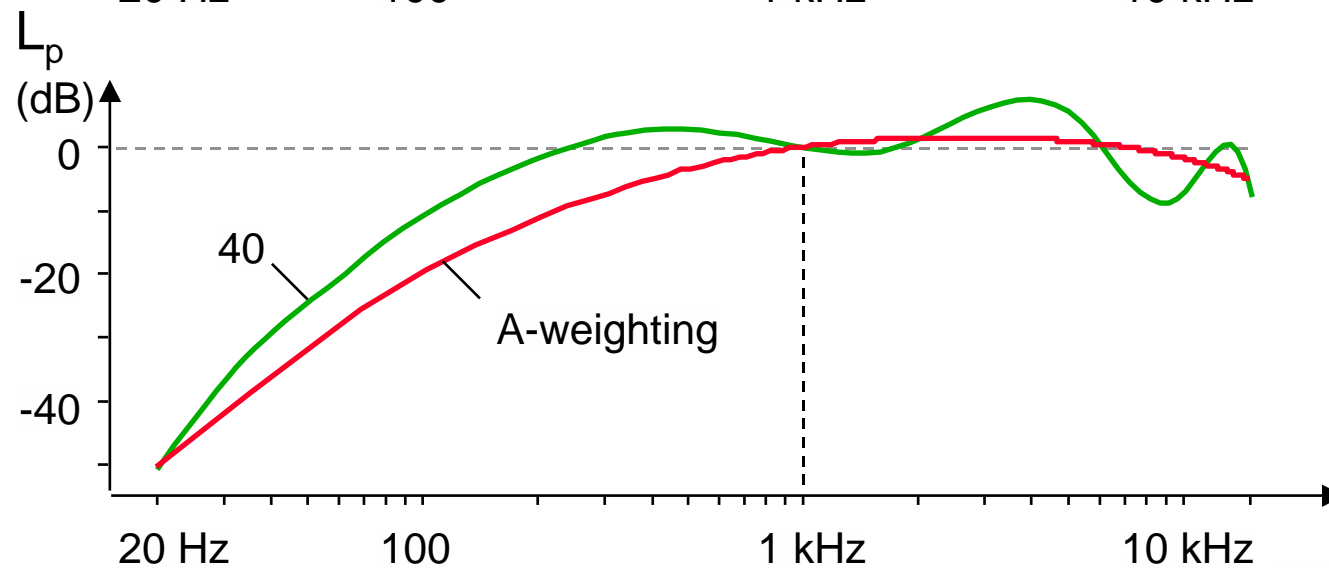


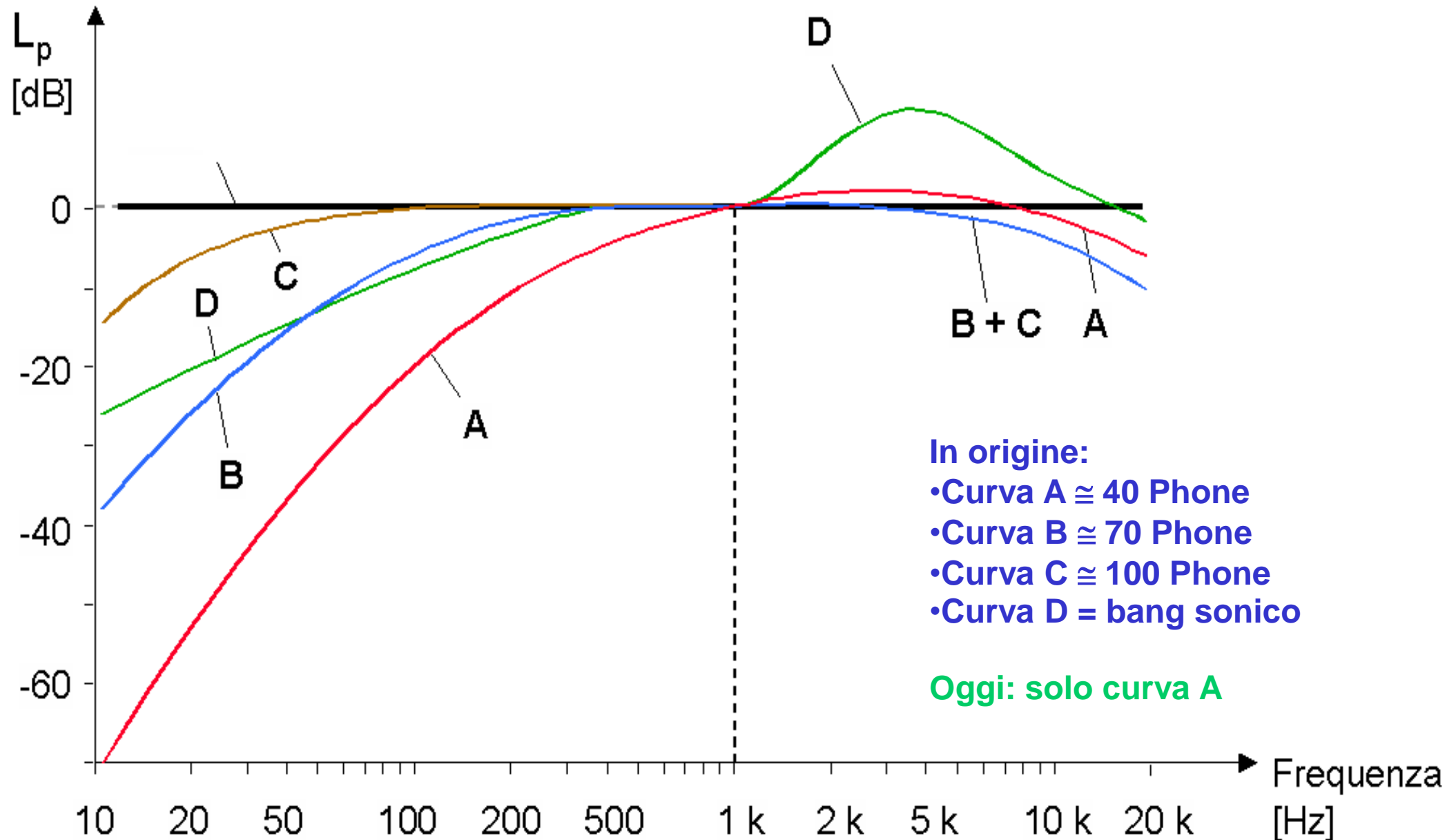
CURVE ISOFONICHE – PESATURA "A"

- Isofonica 40 dB normalizzata a 0 dB a 1 kHz



- Isofonica 40 dB Invertita confrontata con la curva A di ponderazione in frequenza





CURVE ISOFONICHE – PESATURA "A"

I filtri di ponderazione si sono resi necessari per **adattare** la risposta lineare, in ampiezza ed in frequenza, della strumentazione di misura alla risposta non lineare del sistema uditivo umano per ottenere una misura fisica confrontabile con la **sensazione** sonora evocata dal fenomeno acustico.

In origine sono stati definiti tre filtri di ponderazione:

- Filtro A: da impiegarsi all'intorno di 40 Phone
- Filtro B: da impiegarsi all'intorno di 70 Phone
- Filtro C: da impiegarsi all'intorno di 100 Phone

In seguito alla confusione dovuta all'indeterminatezza dell'uso dei vari filtri di ponderazione e alla conseguente difficoltà di confronto dei dati è stato deciso di adottare solo il **filtro di ponderazione A**

Tutti i valori in dB determinati con l'impiego del filtro A devono riportare, dopo il termine dB, la lettera (A).

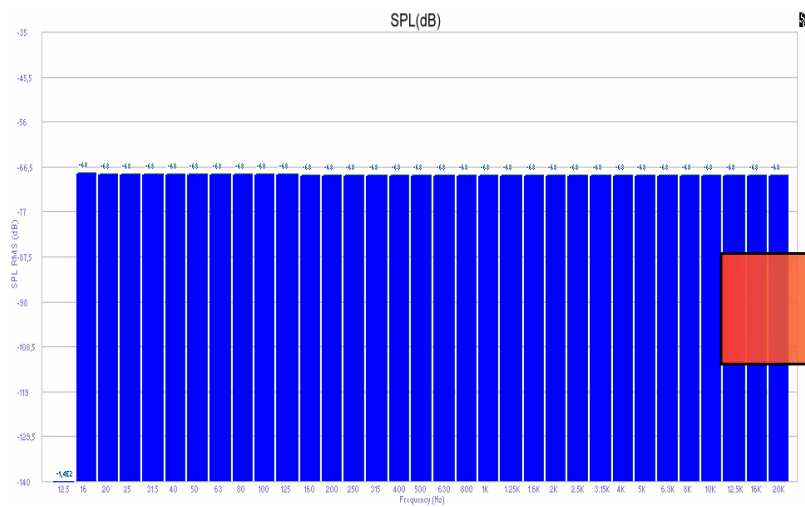


CURVE ISOFONICHE – COEFFICIENTI PER LA PESATURA "A"

Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
20	-50,5
25	-44,7
31,5	-39,4
40	-34,6
50	-30,2
63	-26,2
80	-22,5
100	-19,1
125	-16,1
160	-13,4
200	-10,9
250	-8,6
315	-6,6
400	-4,8
500	-3,2
630	-1,9

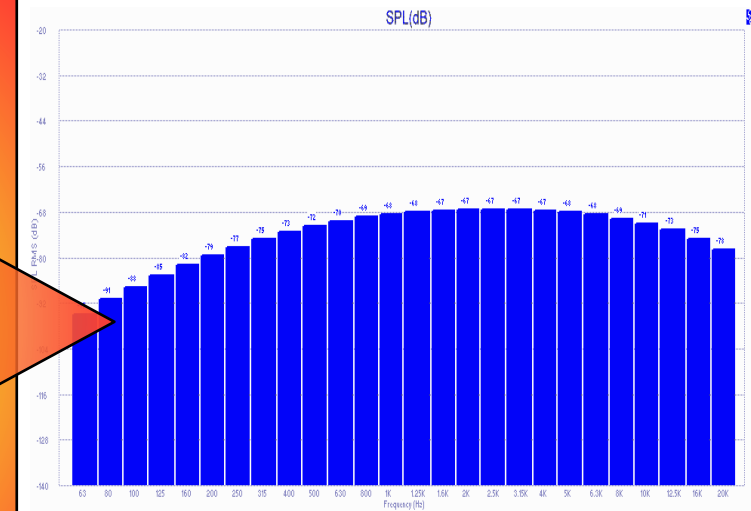
Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
800	-0,8
1000	0
1250	0,6
1600	1
2000	1,2
2500	1,3
3150	1,2
4000	1
5000	0,5
6300	-0,1
8000	-1,1
10000	-2,5
12500	-4,3
16000	-6,6
20000	-9,3

ANALISI IN FREQUENZA – Pesatura “A” di uno spettro in bande di 1/3 di Ottava



Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
20	-50,5
25	-44,7
31,5	-39,4
40	-34,6
50	-30,2
63	-26,2
80	-22,5
100	
125	
160	
200	
250	
315	
400	
500	
630	
800	-0,8
1000	0
1250	0,6
1600	1
2000	1,2
2500	1,3
3150	1,2
4000	1
5000	0,5
6300	-0,1
8000	-1,1
10000	-2,5
12500	-4,3
16000	-6,6
20000	-9,3

Filtro "A"





Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

Dispensa n. 4

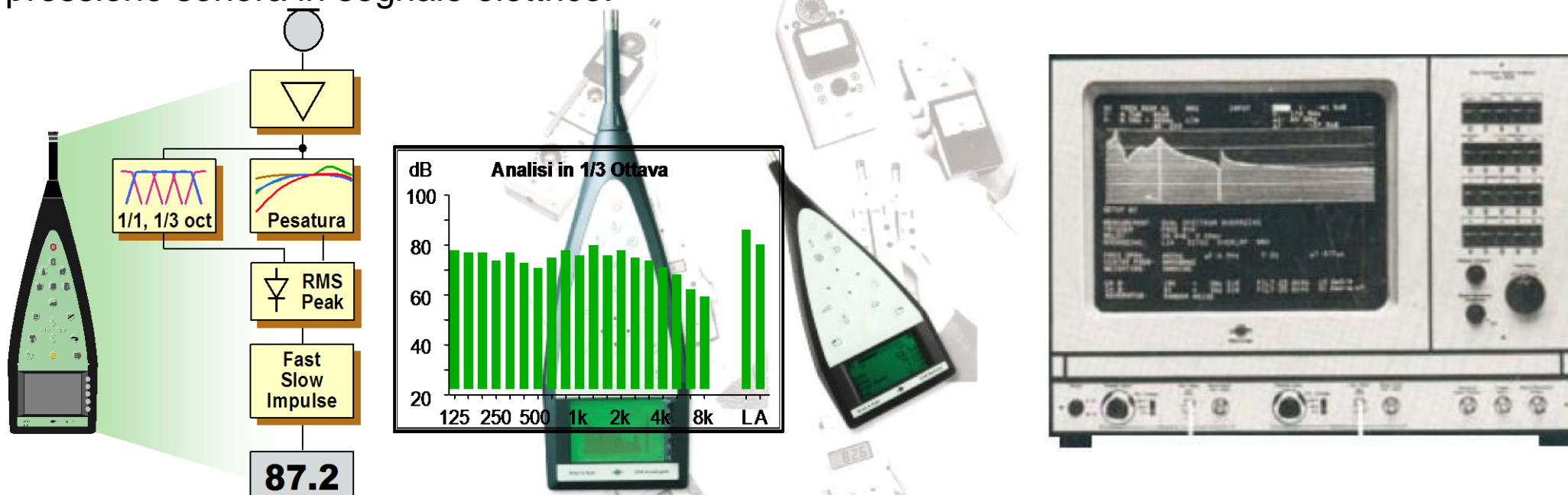
**MICROFONI E FONOMETRI
MISURA DELL'INTENSITA' SONORA**

Docente: Paolo Guidorzi

FONOMETRO E MICROFONO

La misura del suono si effettua con il **fonometro**, uno strumento di precisione.

Il trasduttore, che fa da tramite tra onda sonora e fonometro, è il **microfono**, che trasforma la pressione sonora in segnale elettrico.



Per un'analisi più *fine* del fenomeno acustico, esistono gli **analizzatori di spettro**, che effettuano la FFT in tempo reale, ma sono di solito meno trasportabili dei normali fonometri. Con l'avanzare della tecnologia la distinzione tra fonometri e analizzatori si sta sempre più assottigliando e già si trovano in commercio sofisticati analizzatori FFT di dimensioni molto ridotte.

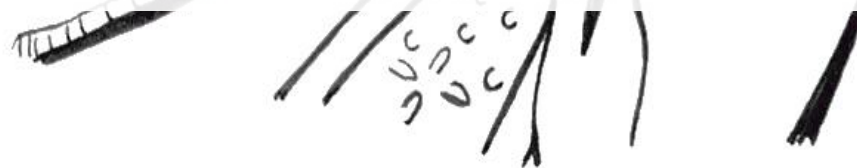
E' essenziale che l'operatore utilizzi tali strumenti con cognizione di causa, sapendo cosa sta facendo, e verificando l'attendibilità delle misure effettuate.

FONOMETRO - CLASSIFICAZIONE



Le norme internazionali dividono i fonometri in 3 classi di appartenenza:

- CLASSE 0: **di riferimento**. Sono usati per tarare gli altri strumenti. [Precisione: 0,3 dB]
- CLASSE 1: **di precisione**. Utilizzati per misure di inquinamento acustico, emissioni sonore in genere, zonizzazione acustica, ... [Precisione: 0,7 dB]
La legge prescrive di utilizzare solamente strumenti di classe 1 per le misure.
- CLASSE 2: **industriali o ingegneristici**. Si usano per rilevazioni di massima, quando non è richiesto alcun certificato. Forniscono solo il valore istantaneo. [Precisione: 1,1 dB]
- CLASSE 3: **di sorveglianza**. Usati da personale non specializzato per rilevazioni dirette. Questa classe è stata rimossa nella nuova norma. [Precisione: 1,5 dB]



OMOLOGAZIONE

Ogni modello di **fonometro** sul mercato è stato sottoposto a una procedura di **omologazione**, certificato chiesto dal produttore a un ente preposto, specifica per un certo modello.

(come il crash-test e le altre verifiche che si effettuano su un modello di autovettura prima di poterla commercializzare)

TARATURA

Al **fonometro**, prima di uscire dalla fabbrica, viene effettuata la **taratura**. Essa va ripetuta, a cura di un ente accreditato, di solito ogni 2 anni. Uno strumento col certificato di taratura scaduto non può più essere utilizzato con sicurezza (potrebbe fornire misure non corrette).

(come la revisione periodica che si effettua ogni 2 anni all'autovettura)

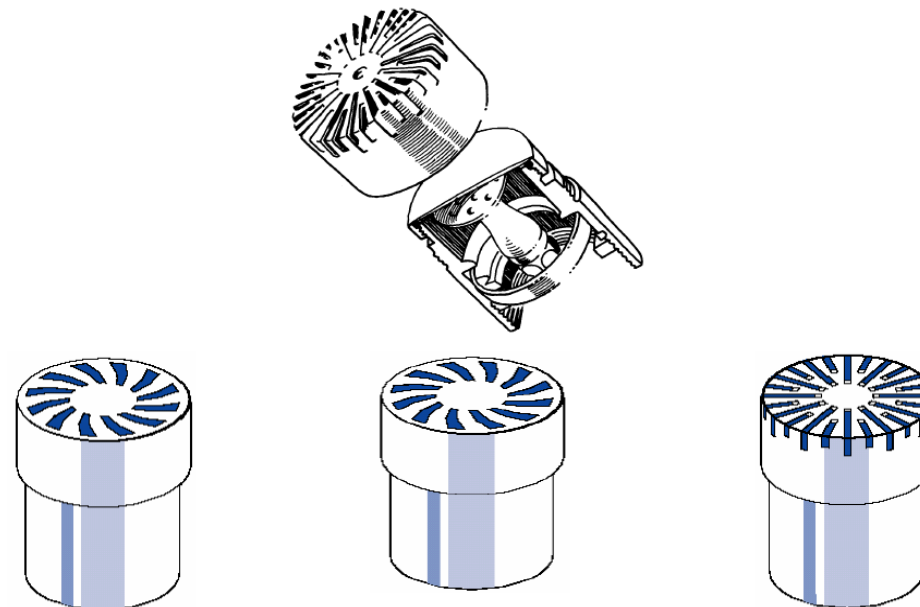
CALIBRAZIONE

Prima di ogni sessione di misura (e possibilmente alla fine della stessa, per verifica), l'utente del fonometro deve effettuare la **calibrazione**. Questa consiste nel porre sul microfono il **calibratore**, un piccolo apparecchio che emette un tono puro con un ampiezza molto precisa; si imposta quindi lo strumento in modo da leggere esattamente quel valore (di solito 94 dB, ovvero 1 Pa, a 1 kHz).

*(come il controllo del livello dell'olio e della pressione delle gomme che *andrebbero* fatti tutti i giorni all'autovettura prima di metterla in marcia)*

MICROFONO A CONDENSATORE

Il tipo di microfono più utilizzato oggi per le misure acustiche è il microfono a condensatore



- Stabile in condizioni climatiche avverse
- Risposta piatta su un elevato range di frequenze
- Bassa distorsione
- Basso rumore
- Alta dinamica
- Alta sensibilità

Altre tipologie di microfono:

- DINAMICO
- A CARBONE
- PIEZOELETTRICI
- LASER
- A LIQUIDO (!!)

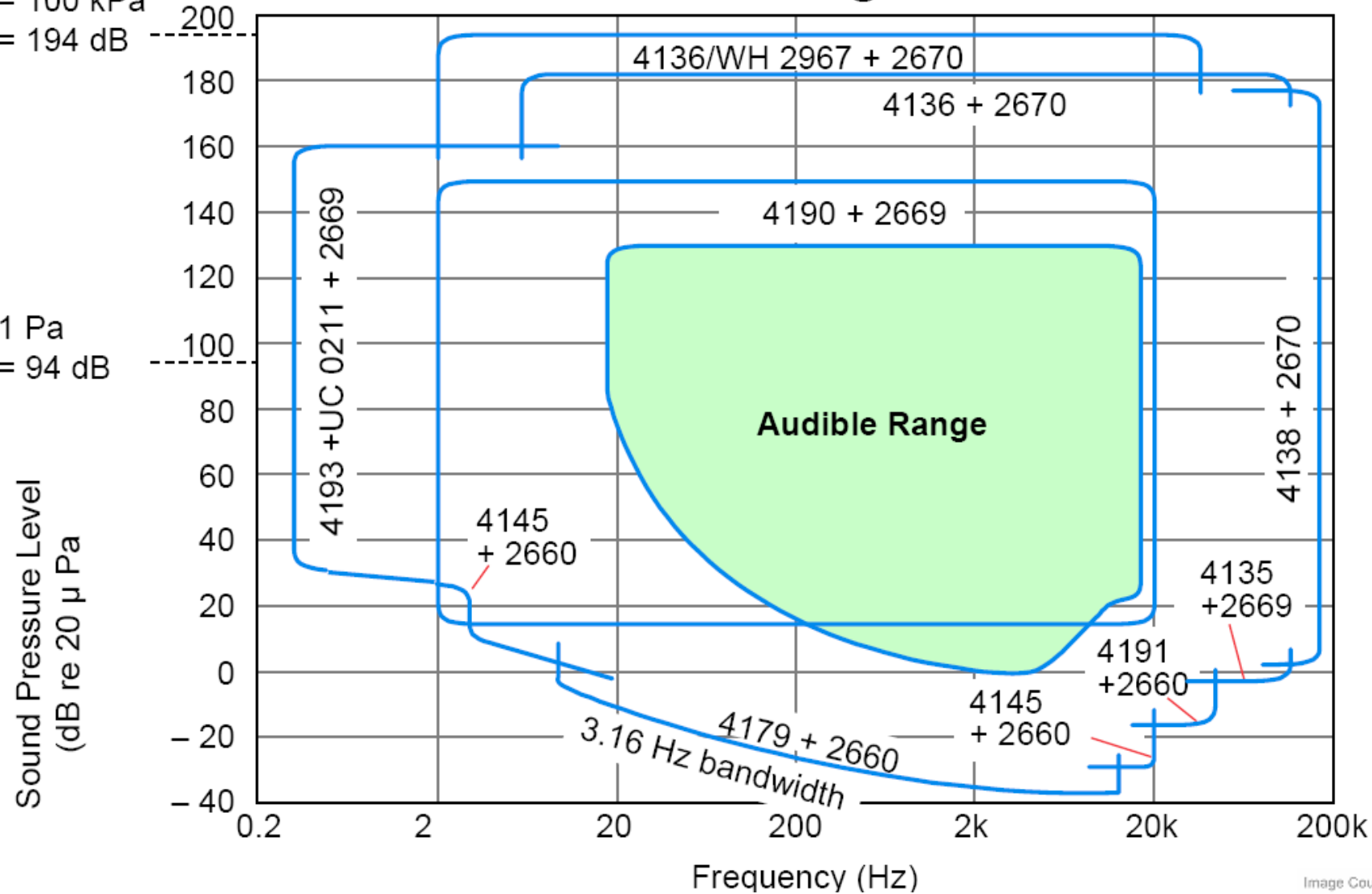
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>



Brüel & Kjær Microphones Measurable Range

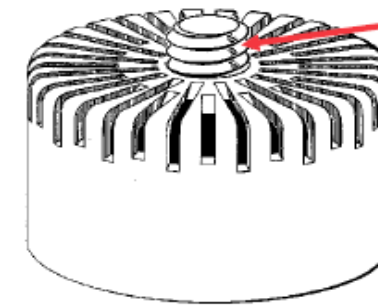
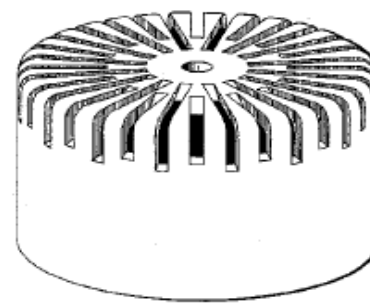
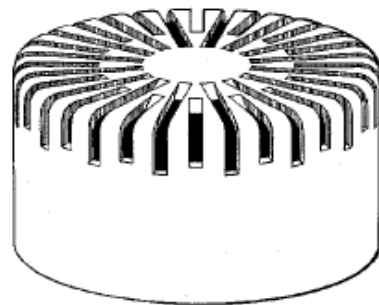
1 atm
= 100 kPa
= 194 dB

1 Pa
= 94 dB

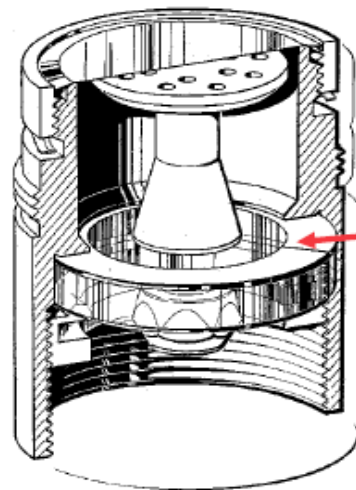




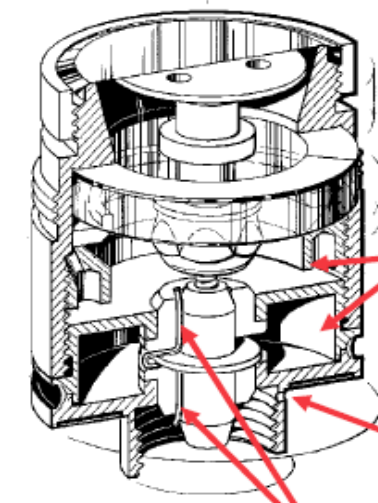
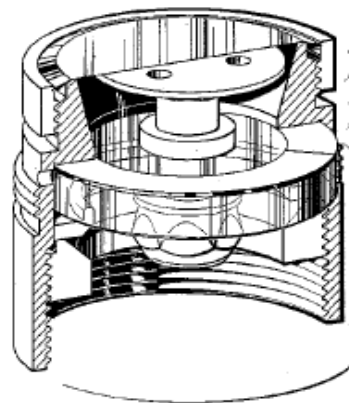
TIPOLOGIE DI MICROFONI



Spacer
Mounting
Thread



Vent
resistance



Cavities

External
Vent
Opening

Vent

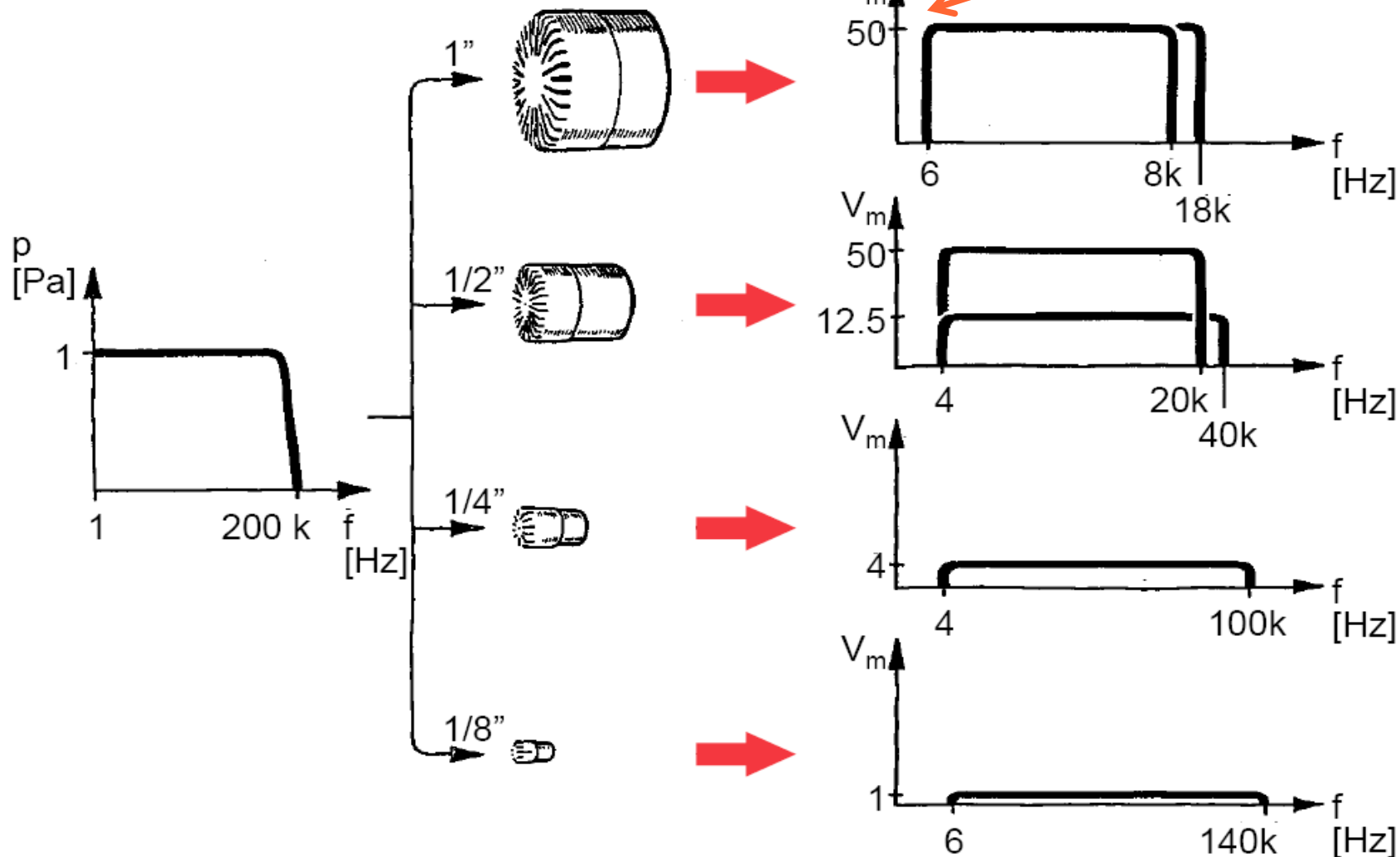
General Purpose

High Frequency

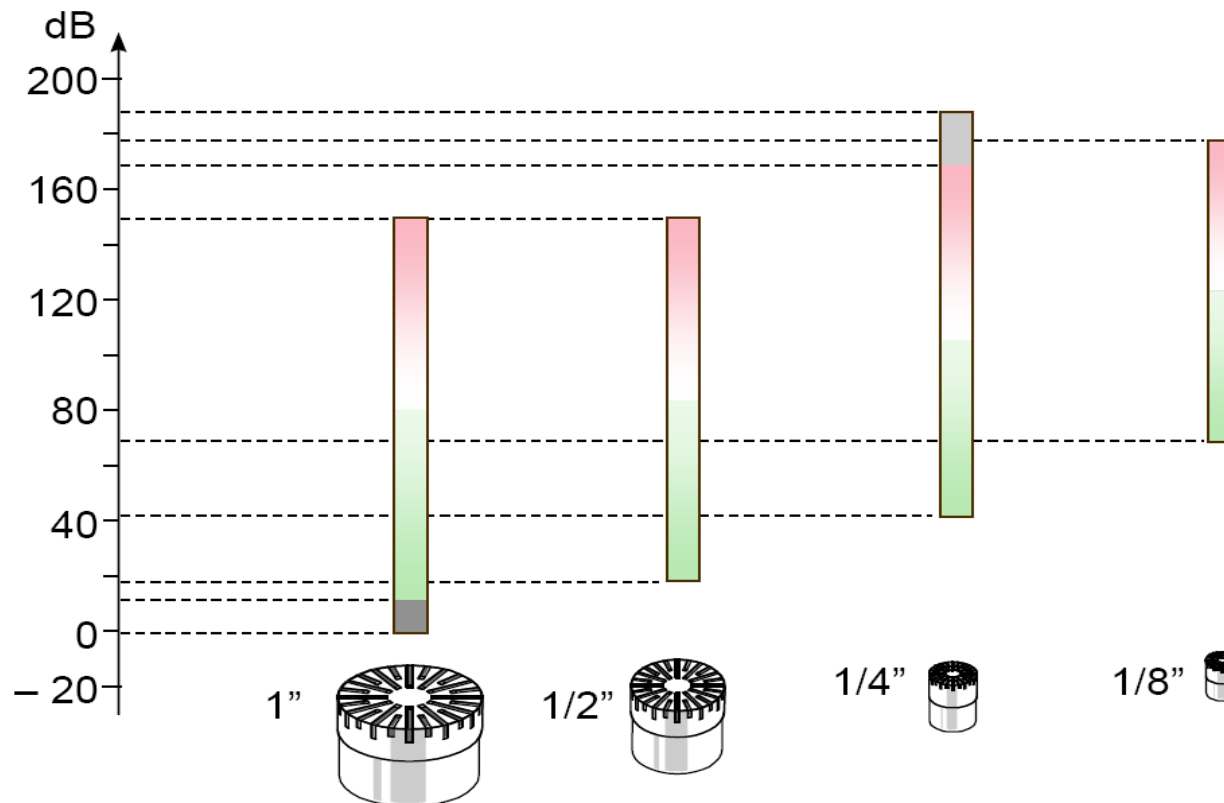
Intensity

SENSIBILITA' E RANGE DI FREQUENZA

Sensibilità
50 mV/Pa

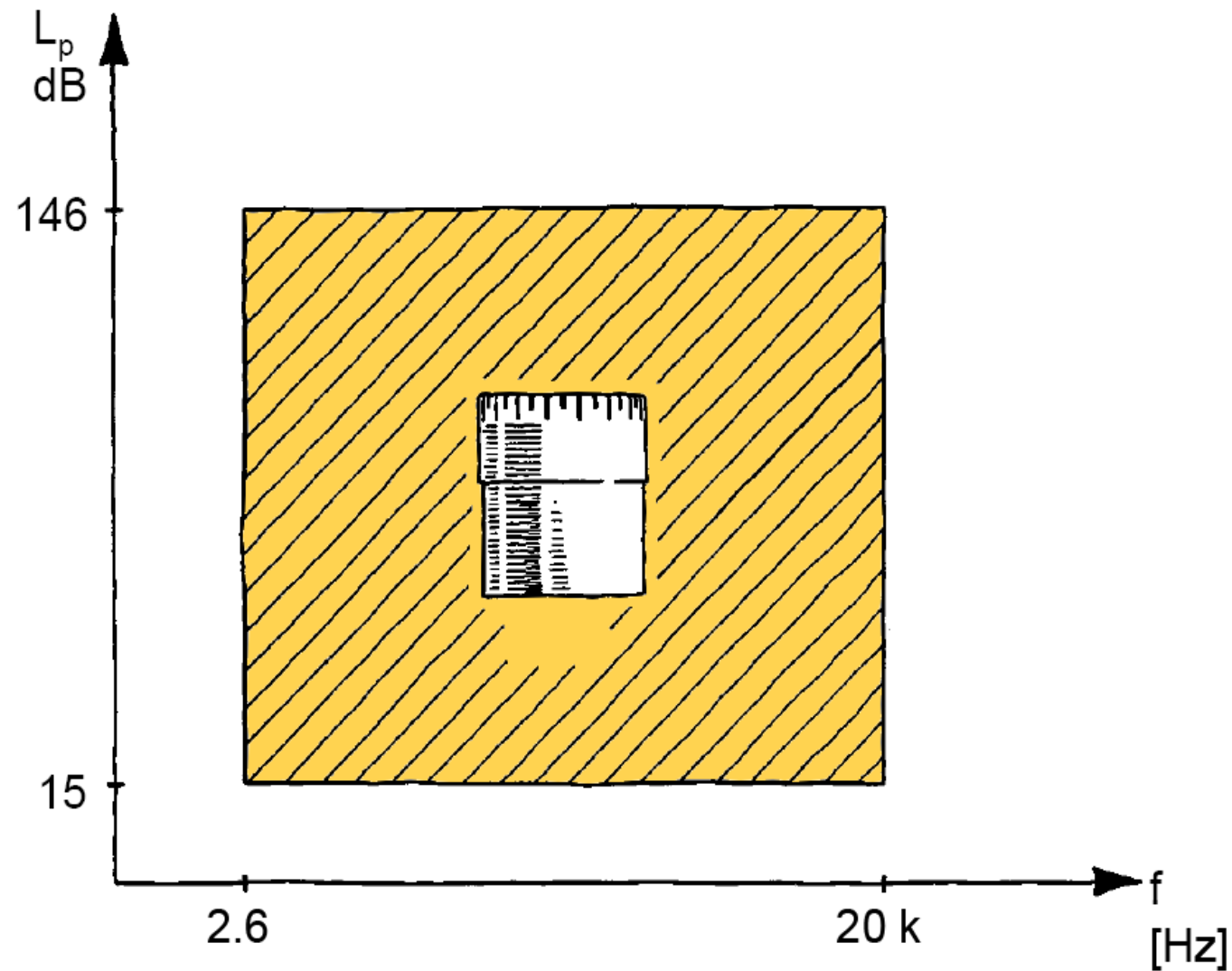


RANGE DINAMICO

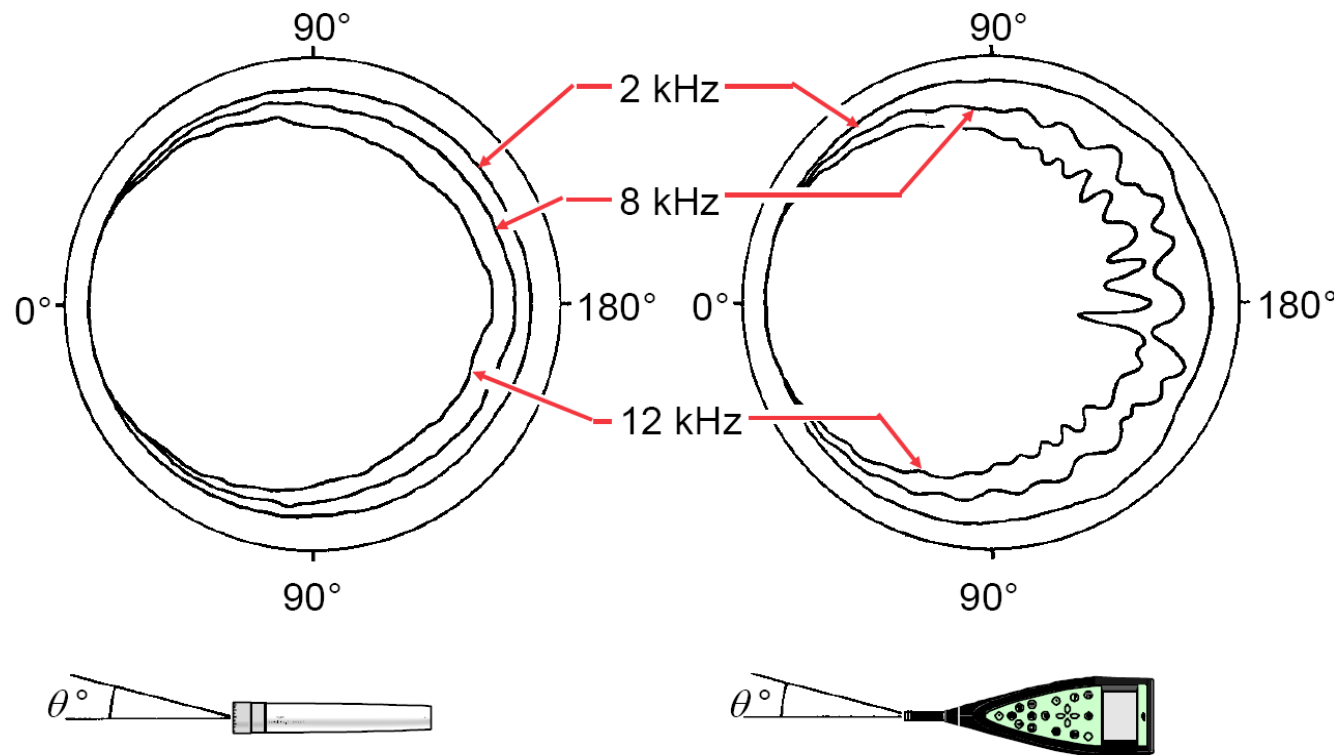


Il range dinamico di un microfono è definito come la differenza tra il rumore di fondo pesato "A" del microfono e il livello che fornisce una distorsione del 3%. Il rumore di fondo è il livello di pressione sonora che fa sì che il preamplificatore fornisca in uscita lo stesso livello di segnale elettrico creato dalla sola combinazione microfono e preamplificatore. Il livello corrispondente a una distorsione del 3% è il livello di pressione sonora che produce un segnale in uscita dal preamplificatore con una distorsione del 3%

REGIONE OPERATIVA

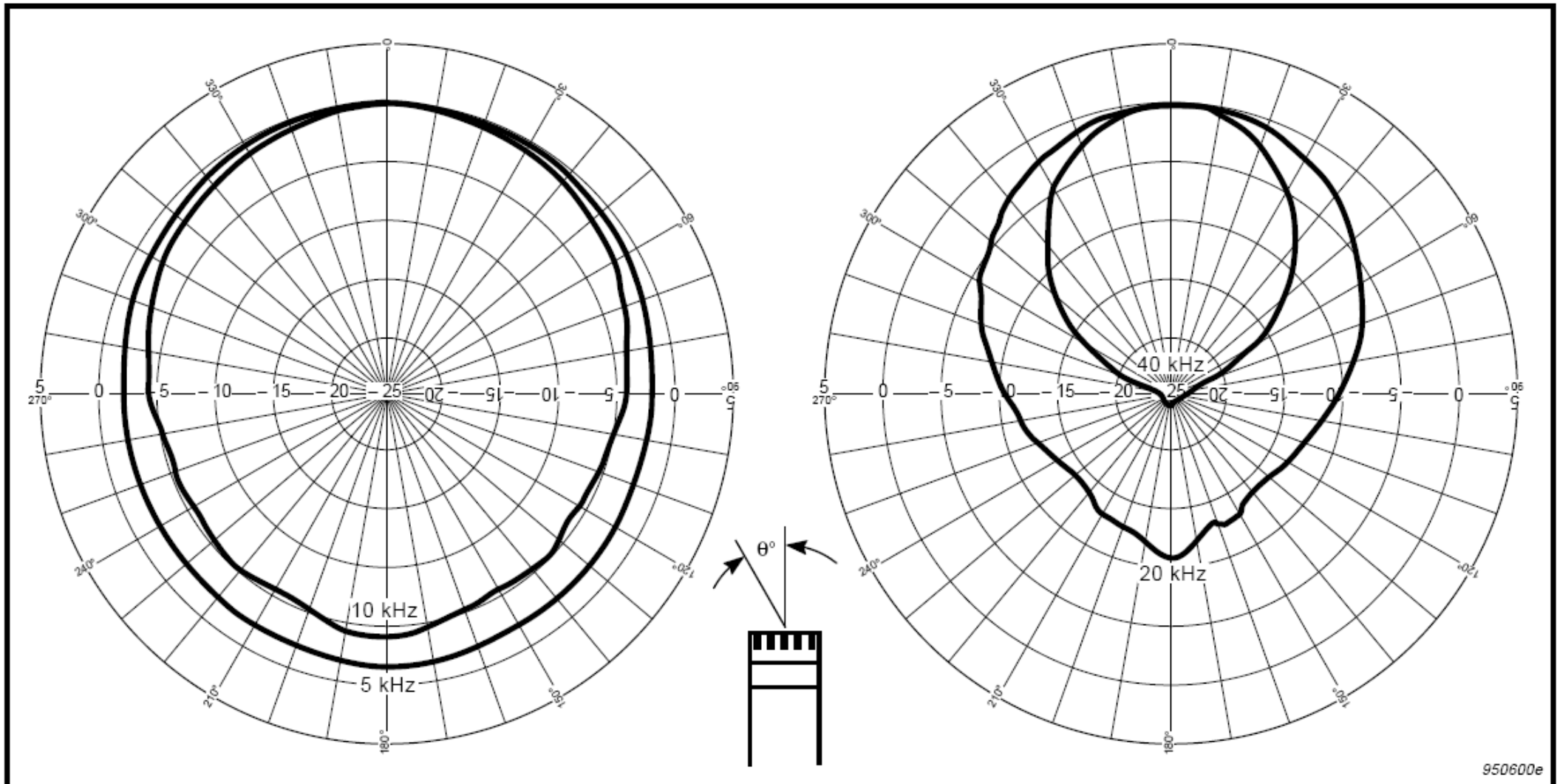


CARATTERISTICHE DIREZIONALI

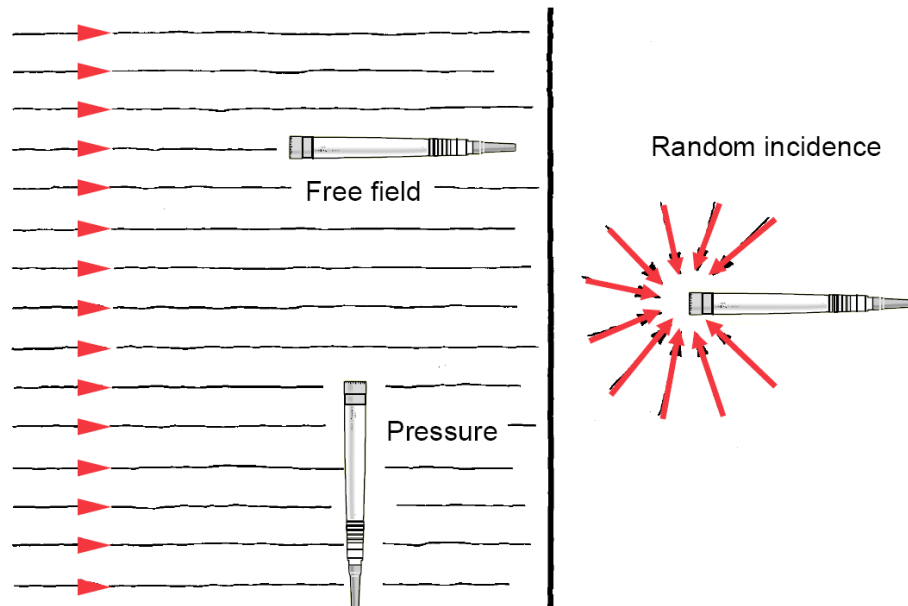


Il microfono non risponde in egual modo ai suoni provenienti dalle diverse direzioni. A frequenze basse i microfoni sono quasi perfettamente omnidirezionali, mentre ad alte frequenze la sensibilità ai suoni provenienti posteriormente alla capsula è ridotta. Anche l'involucro del fonometro influisce sulla risposta del microfono, quando questo è posto direttamente su di esso.

CARATTERISTICHE DIREZIONALI



MICROFONI PER CAMPO LIBERO, A PRESSIONE E PER CAMPO DIFFUSO



I microfoni a condensatore sono divisi in 3 tipologie, a seconda della loro risposta nel campo sonoro:

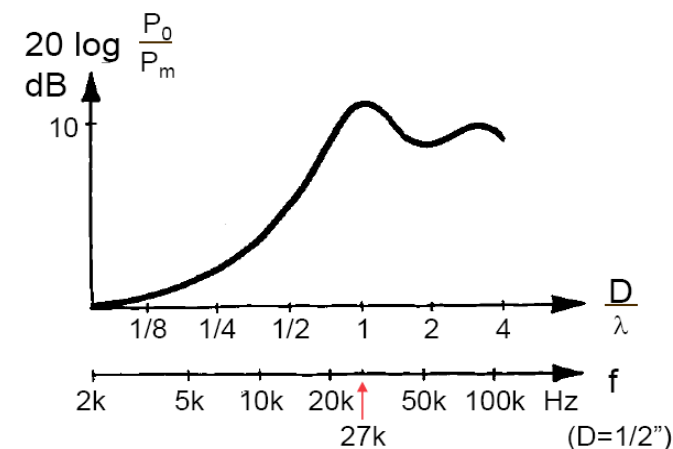
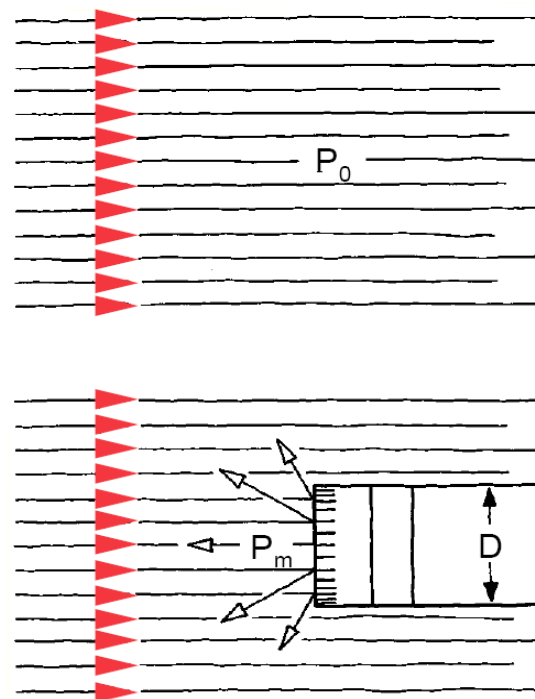
- **per campo libero**
- **a pressione**
- **per campo diffuso**

Il microfono **per campo libero** ha una risposta uniforme al campo sonoro che esisterebbe se il microfono non ci fosse. Va notato che ogni microfono disturba il campo acustico in cui è posto, ma il microfono per campo libero è progettato proprio per compensare la sua stessa presenza.

Il microfono **a pressione** è progettato per avere risposta in frequenza uniforme alla vera pressione acustica presente. Non compensa la sua presenza come quello per campo libero.

Il microfono **per campo diffuso** è progettato per rispondere in modo uniforme ai suoni in arrivo contemporaneamente da tutti gli angoli. E' detto anche microfono **per incidenza random**.

CORREZIONE PER CAMPO LIBERO

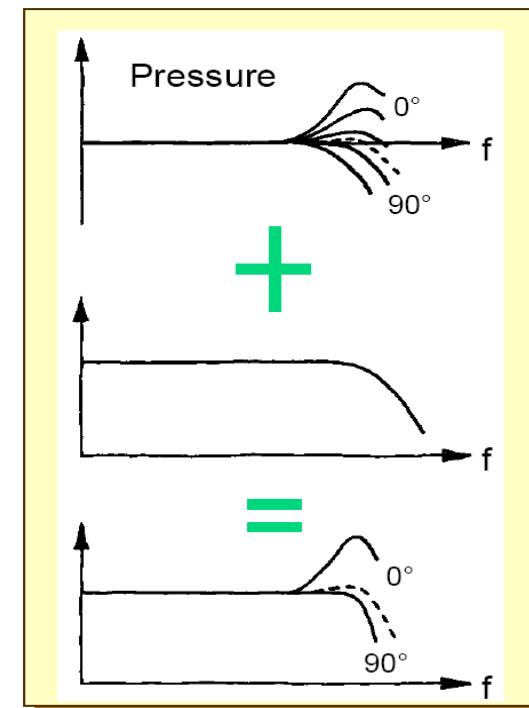
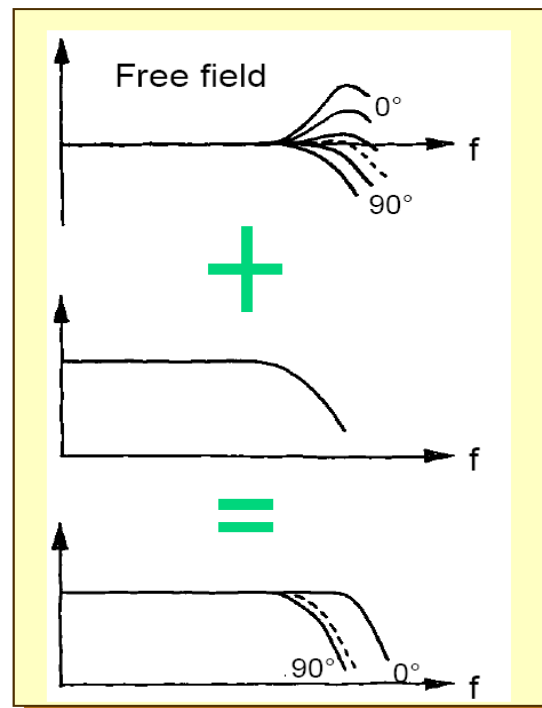


Quando un microfono è posto in un campo sonoro, lo modifica con la sua stessa presenza.

Sia p_0 la pressione acustica in un campo sonoro in assenza del microfono.

Se il microfono nel campo sonoro da misurare è posto di fronte alla direzione di arrivo delle onde acustiche, si avrà un incremento della pressione sonora misurata p_m a causa delle riflessioni locali. Questo incremento sarà massimo alla frequenza la cui lunghezza d'onda è uguale al diametro del microfono.

CORREZIONE PER CAMPO LIBERO



Il microfono **per campo libero** ha una risposta che cala alla frequenza alla quale la sua presenza comincerebbe a creare un incremento nella pressione misurata, così che la sua risposta totale è piatta fino ad alta frequenza, per incidenza normale. Sottostima le alte frequenze per incidenze non normali.

Il microfono **a pressione** ha risposta piatta fino ad alta frequenza, senza alcuna compensazione e va usato quando bisogna misurare il valore della pressione, indipendentemente dal disturbo del microfono al campo sonoro. Se posto in un campo libero e puntato verso la sorgente, sovrastima le alte frequenze



CARTA DI CALIBRAZIONE

Calibration Chart for Prepolarized Condenser Microphone Cartridge Type 4155

Brüel & Kjær
B K
Naarum Denmark

Serial No. 762949

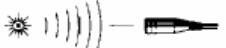
Open Circuit Sensitivity at 1013 mbar, 23°C and 50% R.H.
-26,5 dB re. 1 V per Pa or 47,3 mV per Pa

This Calibration is traceable to the National Bureau of Standards, Washington D.C.

Open Circuit Correction Factor:
Ko* = +0,5 dB

Cartridge Capacitance:
C = 16,2 pF

Frequency Response Characteristics:
The upper curve is the open circuit free field characteristic, valid for the Microphone Cartridge with protecting grid. Sound waves perpendicular to diaphragm (see Fig.). The lower curve is the open circuit pressure response recorded with electrostatic actuator.



* Subtract the gain of the preamplifier (see back of this card) from Ko to get the actual correction factor K (see instruction manual for the use of K).

1 Pa = 1 N/m² = 10 dynes/cm² = 10 μbar

BC 0111

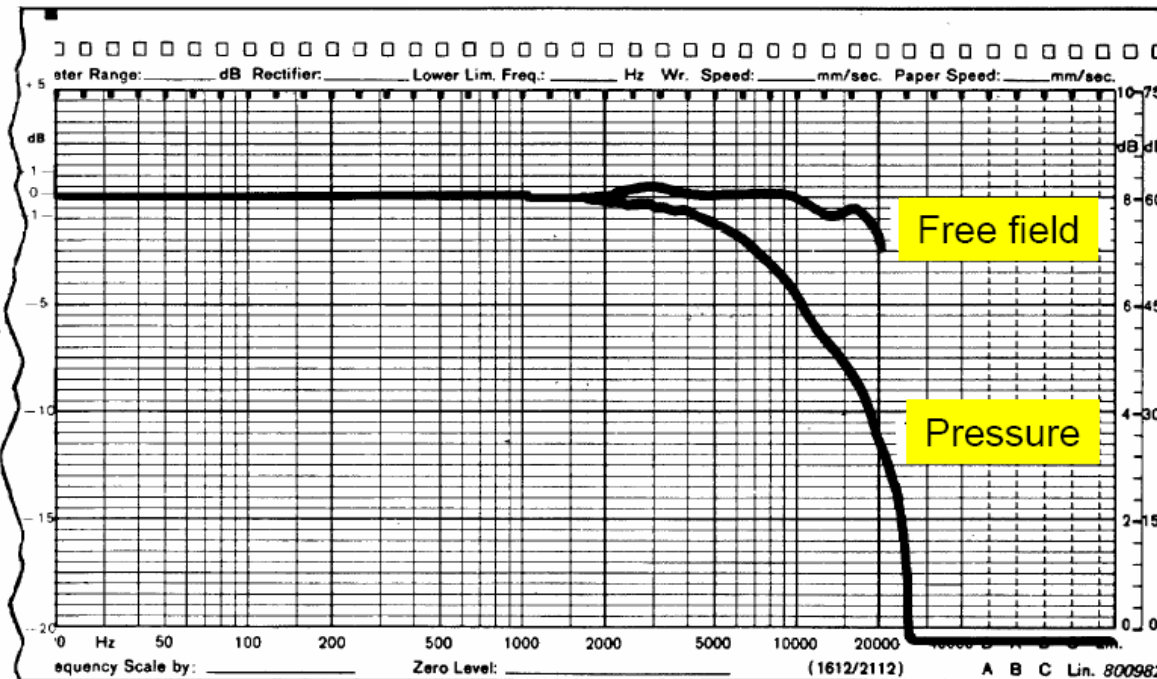
Conditions of Tests:
Polarization Voltage: 0 V (see rear side of chart)
Frequency: 250 Hz
Barometric Pressure: 1008 mbar
Relative Humidity: 44 %
Temperature: 28 °C

Date: 8-6-79 Signature: K.R.

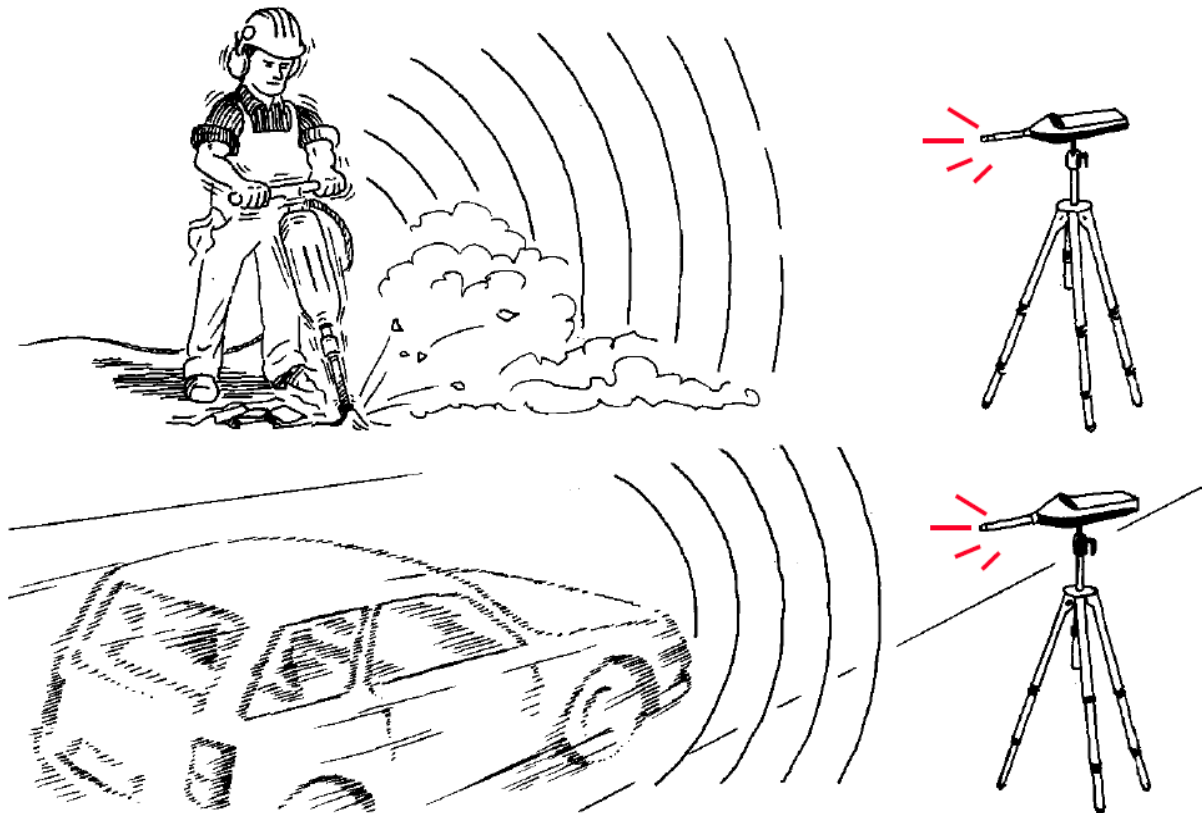
Summarized Specifications
Outside Diameter:
0.52 in (13.2 mm) with protecting grid
0.50 in (12.7 mm) without protecting grid



MICROFONO PER CAMPO LIBERO



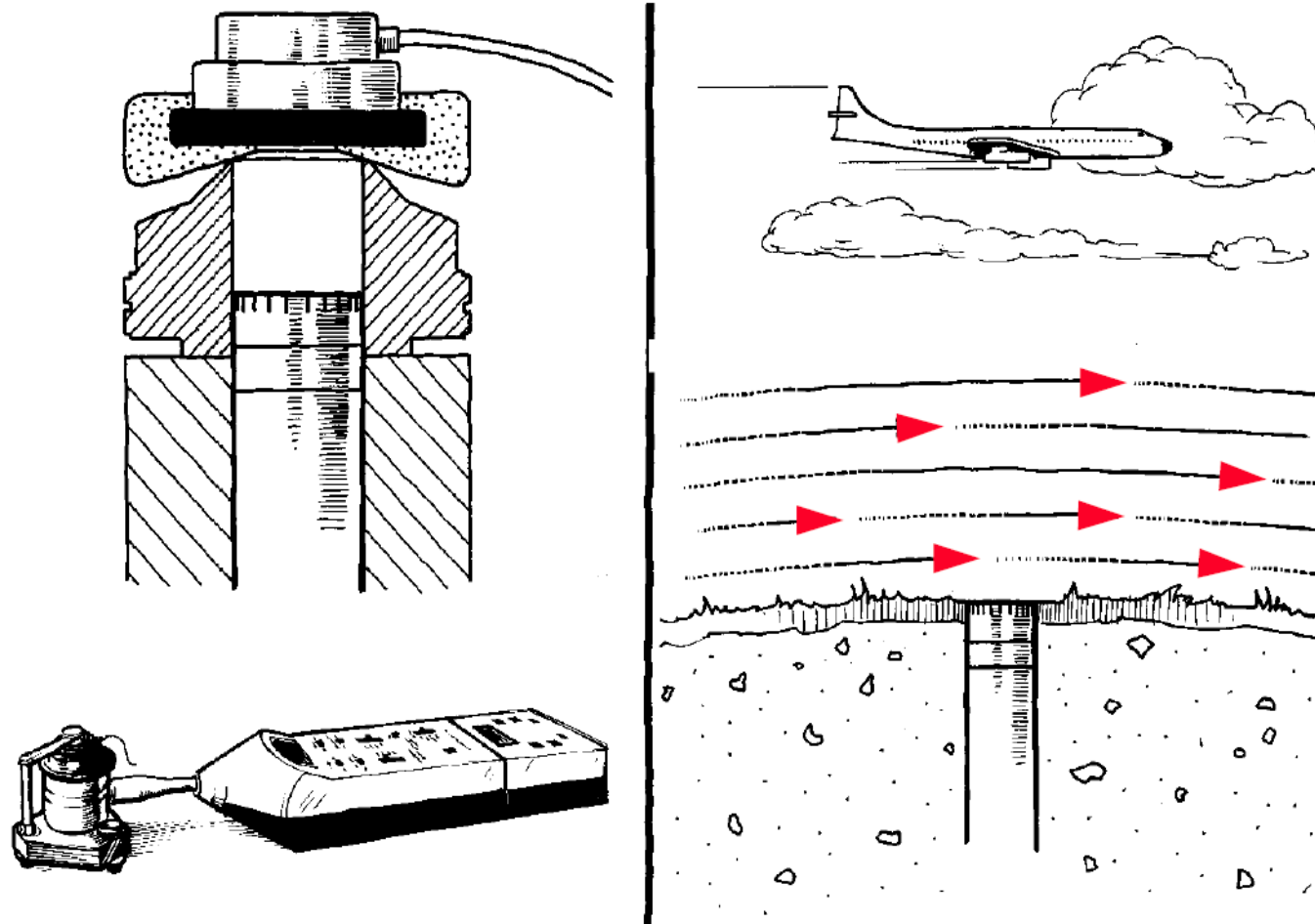
MICROFONO PER CAMPO LIBERO



Il microfono per campo libero va usato nei casi in cui il suono arriva principalmente da una sola direzione, e va puntato verso la sorgente.

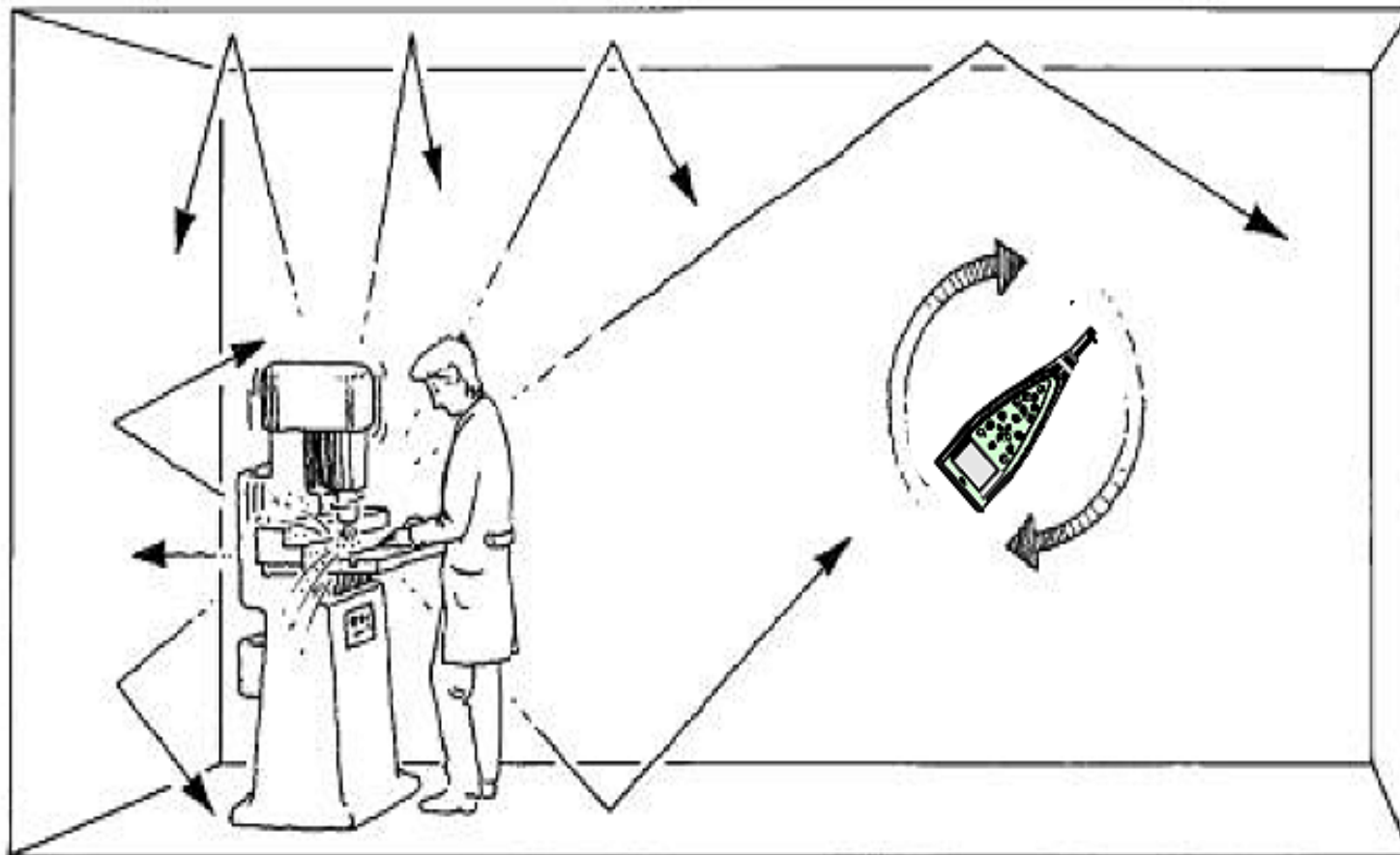
Si utilizza per misure all'aperto o all'interno di edifici quando non sono presenti riflessioni del suono (per esempio in camera anecoica).

MICROFONO A PRESSIONE



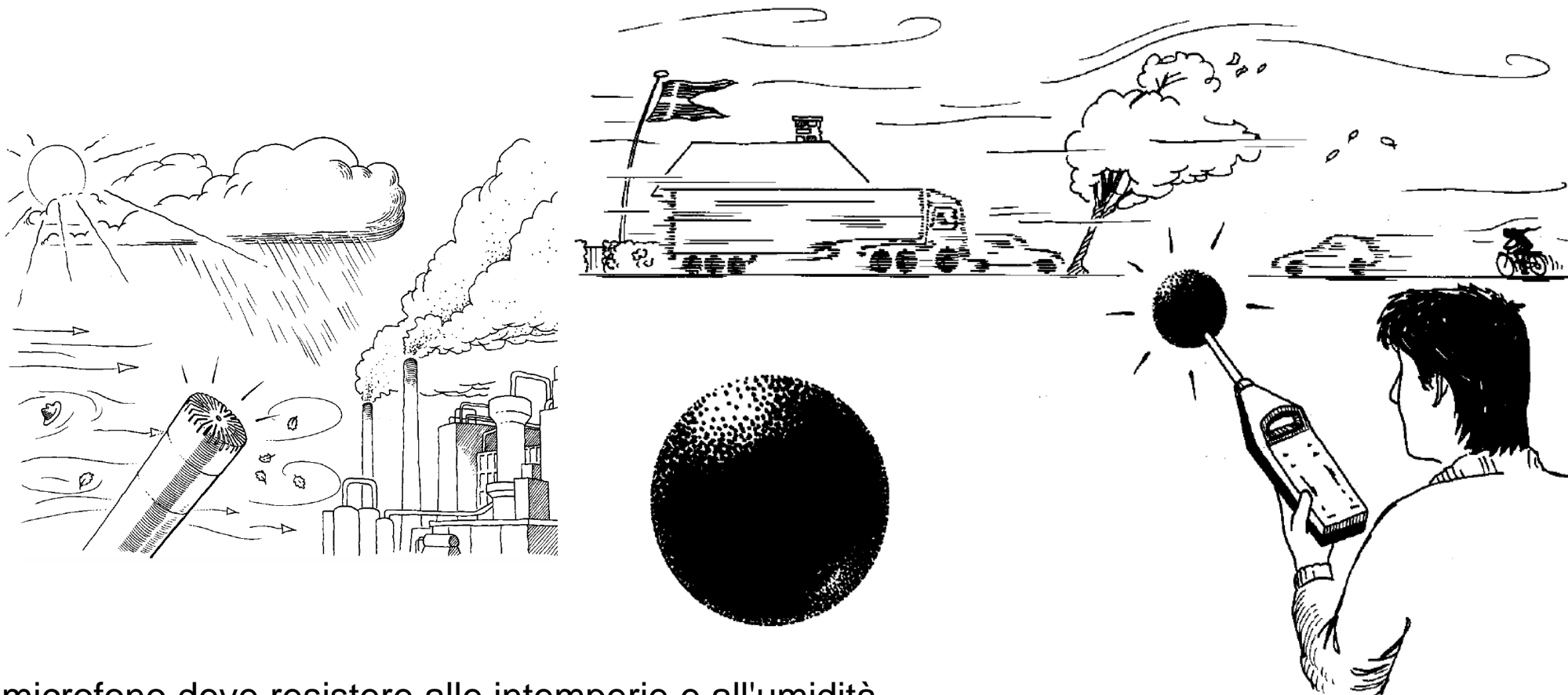
Il microfono a pressione si usa in piccole cavità (ad esempio in un calibratore) e per misure in cui il microfono può essere montato a filo di una parete o comunque quando il parametro da misurare è il valore della pressione acustica, ignorando gli effetti della presenza del microfono.

MICROFONO PER CAMPO DIFFUSO



Il microfono per campo diffuso risponde uniformemente ai suoni provenienti simultaneamente da tutte le direzioni. Va usato in camera riverberante, in misure all'interno in ambienti riflettenti e quando si effettuano misure di molte sorgenti contemporaneamente.

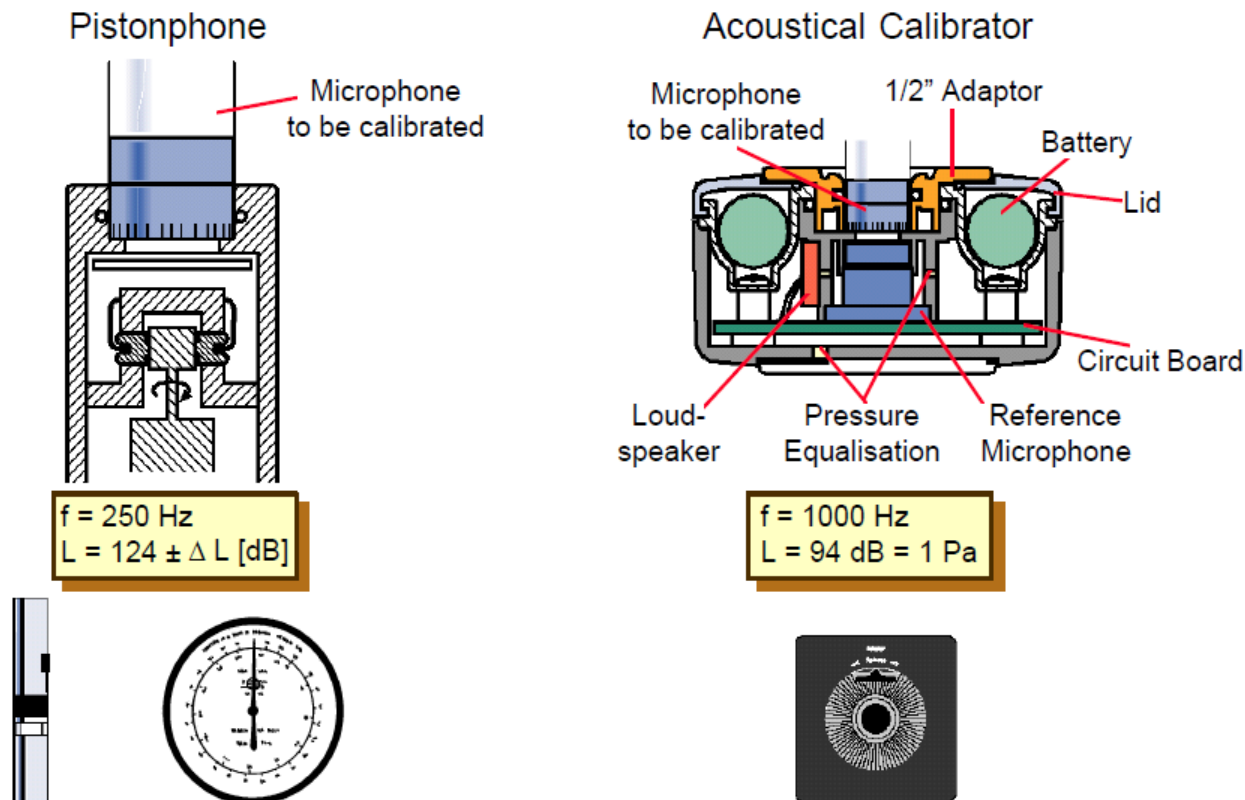
CONDIZIONI METEOROLOGICHE



Il microfono deve resistere alle intemperie e all'umidità.

Il vento può indurre rumore al microfono, specie in bassa frequenza, in quanto muove il diaframma. In condizioni ventose bisogna quindi utilizzare la "pallina antivento", che riduce il fenomeno, anche se a volte non lo elimina completamente. L'effetto in bassa frequenza del vento è ulteriormente ridotto quando è attiva nel fonometro la ponderazione "A"

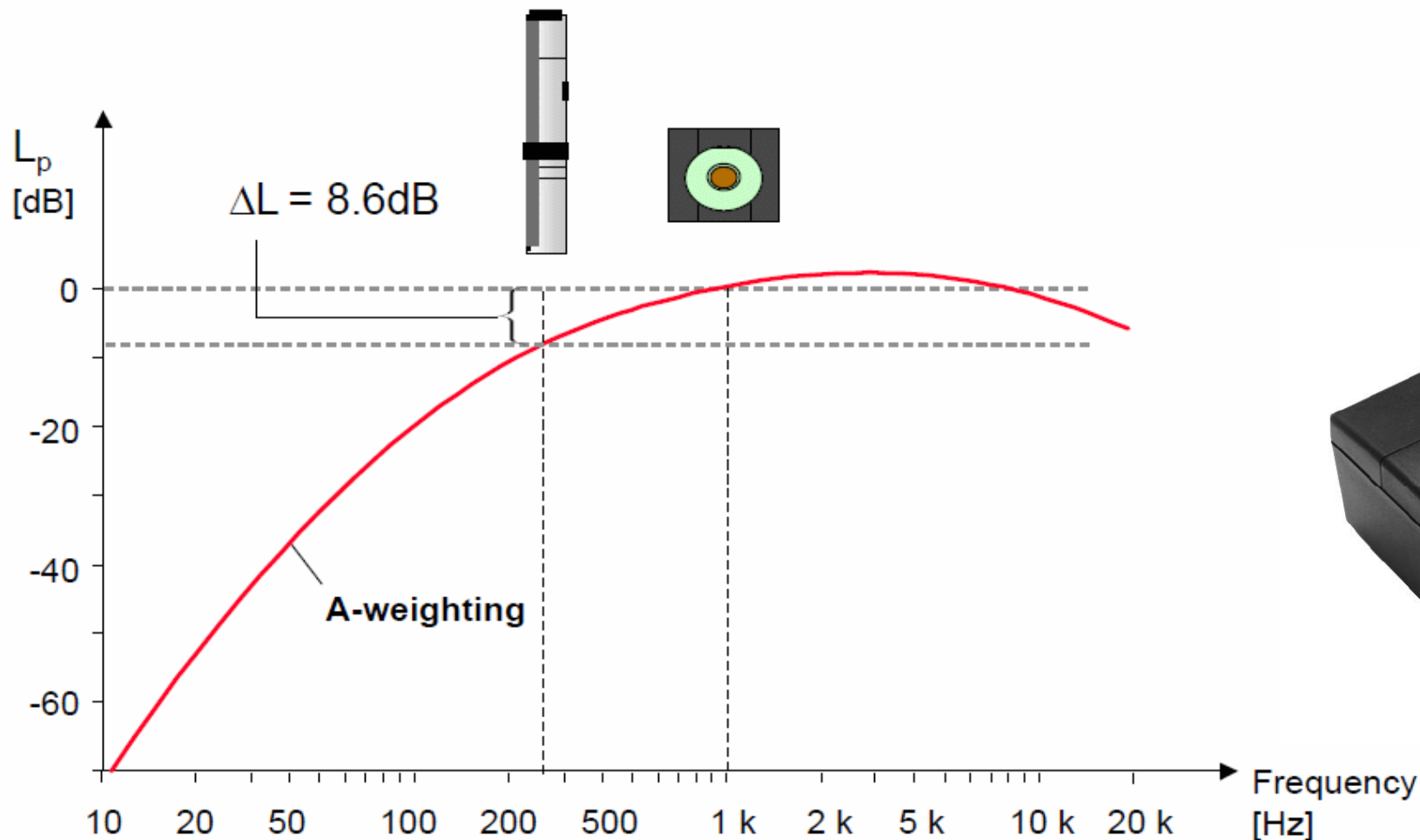
CALIBRAZIONE



La calibrazione si può effettuare in due modi:

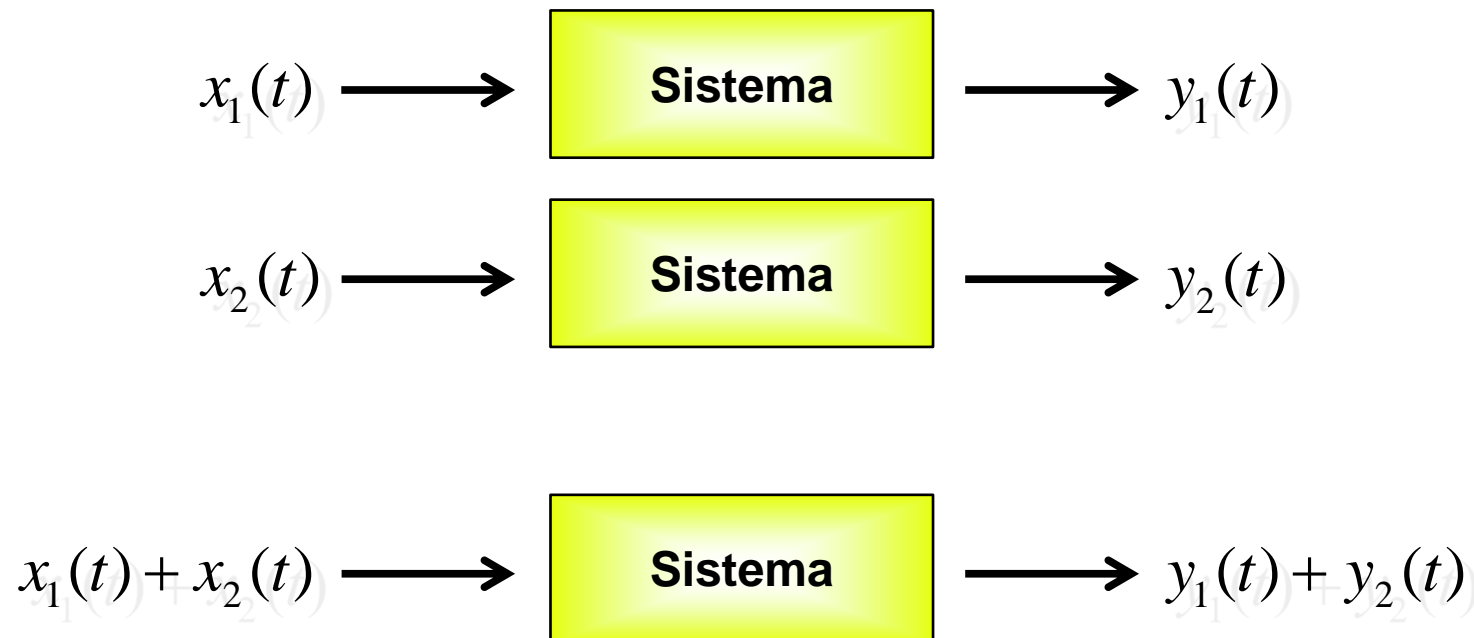
- col **PISTONOFONO**, che genera un livello di pressione di 124 dB a 250 Hz utilizzando 2 piccoli pistoni azionati da un motore. Occorre effettuare una correzione dipendente dalla pressione statica
- col **CALIBRATORE ACUSTICO**, che genera un livello di pressione di 94 dB \cong 1 Pa a 1 kHz, utilizzando un piccolo altoparlante e un microfono di precisione in configurazione feedback.

In genere è più utilizzato il calibratore acustico.



Quando si effettua la calibrazione bisogna disabilitare nel fonometro i filtri di ponderazione. Ciò è influente quando si utilizza il calibratore poiché a 1 kHz i filtri di ponderazione sono normalizzati a 0 dB, ma a 250 Hz, utilizzando il pistonofono, si avrebbe un errore se il fonometro non è in modalità lineare.

SISTEMI LINEARI-STAZIONARI



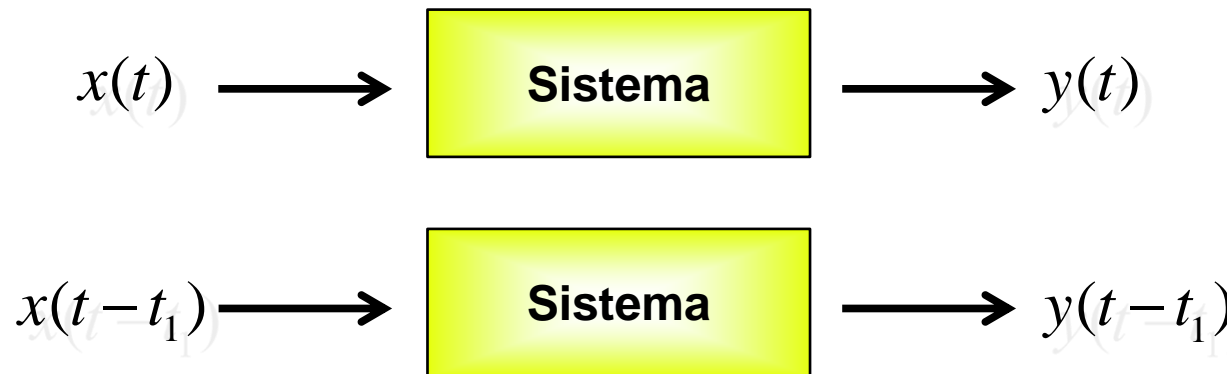
Sistemi lineari - Proprietà di additività



Sistemi lineari - Proprietà di scalabilità



Sistemi lineari - Principio di sovrapposizione



Sistemi stazionari - Proprietà di stazionarietà

I sistemi lineari-stazionari (detti anche sistemi ideali) sono quelli per cui valgono le proprietà di linearità e stazionarietà.

RISPOSTA ALL'IMPULSO E RISPOSTA IN FREQUENZA

Siano $x(t)$ e $y(t)$ l'ingresso e l'uscita di un sistema ideale, e $X(f)$ e $Y(f)$ le loro rispettive trasformate di Fourier. Si definisce **risposta all'impulso** del sistema una funzione $h(t)$ tale che:

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

La risposta all'impulso $h(t)$ è la risposta del sistema ad una sollecitazione rappresentata dalla **delta di Dirac**. Un sistema lineare-stazionario può essere completamente caratterizzato mediante la sua risposta all'impulso, ovvero, nota $h(t)$, a partire da $x(t)$ è sempre possibile ottenere $y(t)$, per ogni valore di x .

Si definisce **risposta in frequenza** del sistema una funzione $H(f)$ tale che:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

Questo risultato deriva direttamente dalla definizione di prodotto di convoluzione. Dunque risposta all'impulso e risposta in frequenza sono legate dalla trasformata di Fourier:

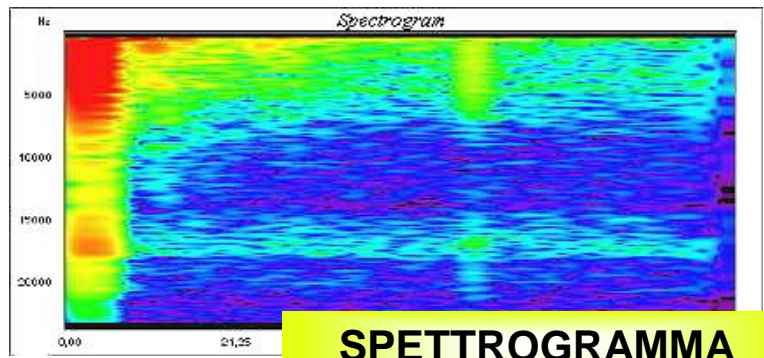
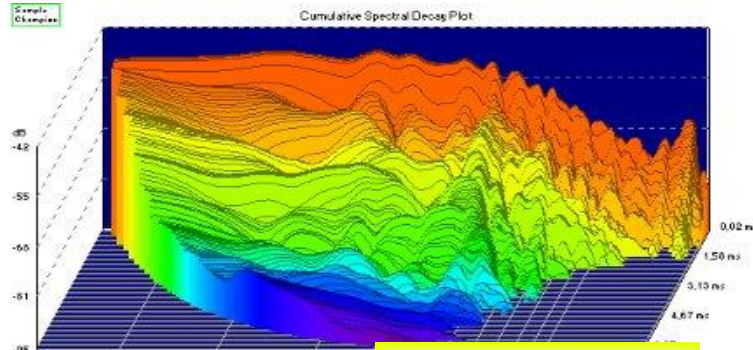
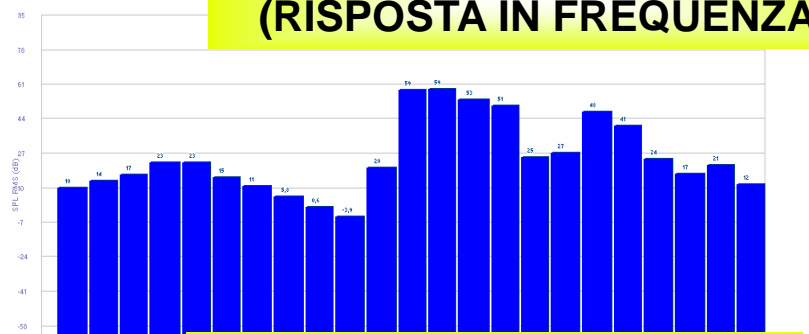
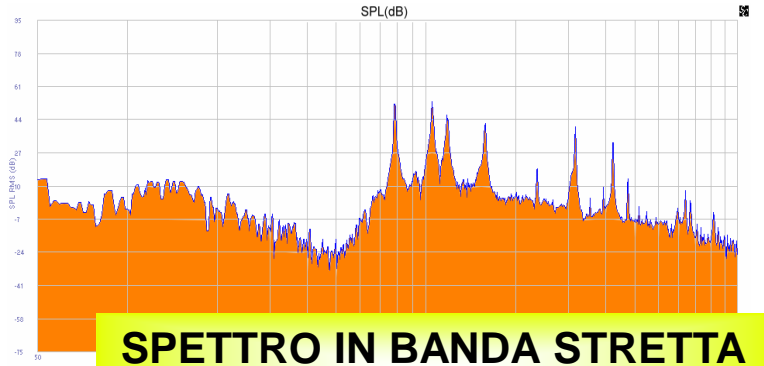
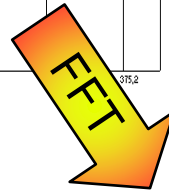
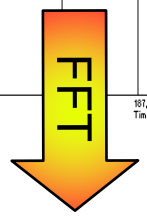
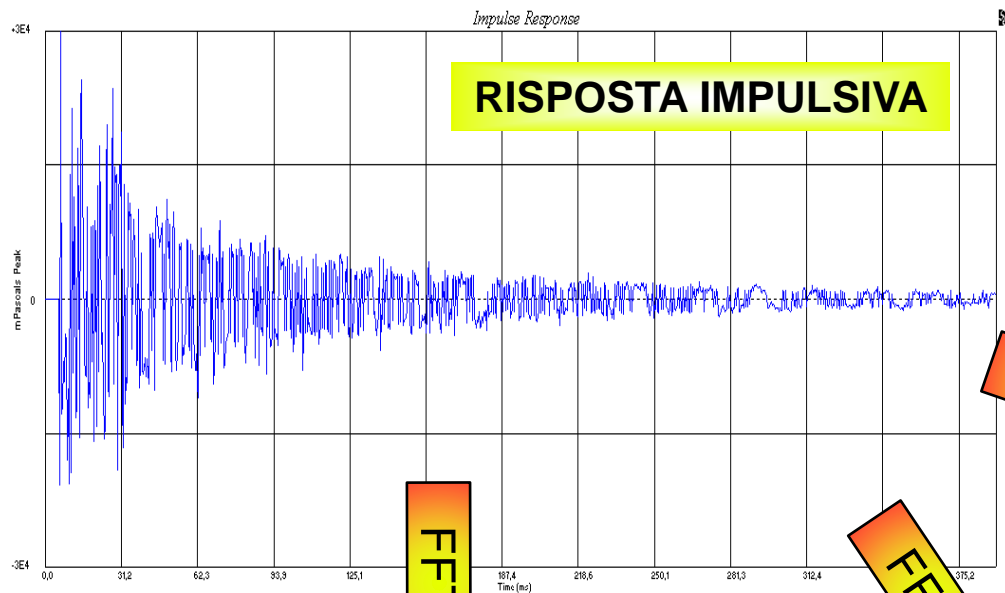
$$h(t) \xrightarrow{F} H(f)$$

La risposta in frequenza del sistema si può ottenere dal rapporto tra le trasformate dei 2 segnali:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$



RISPOSTA ALL'IMPULSO E RISPOSTA IN FREQUENZA





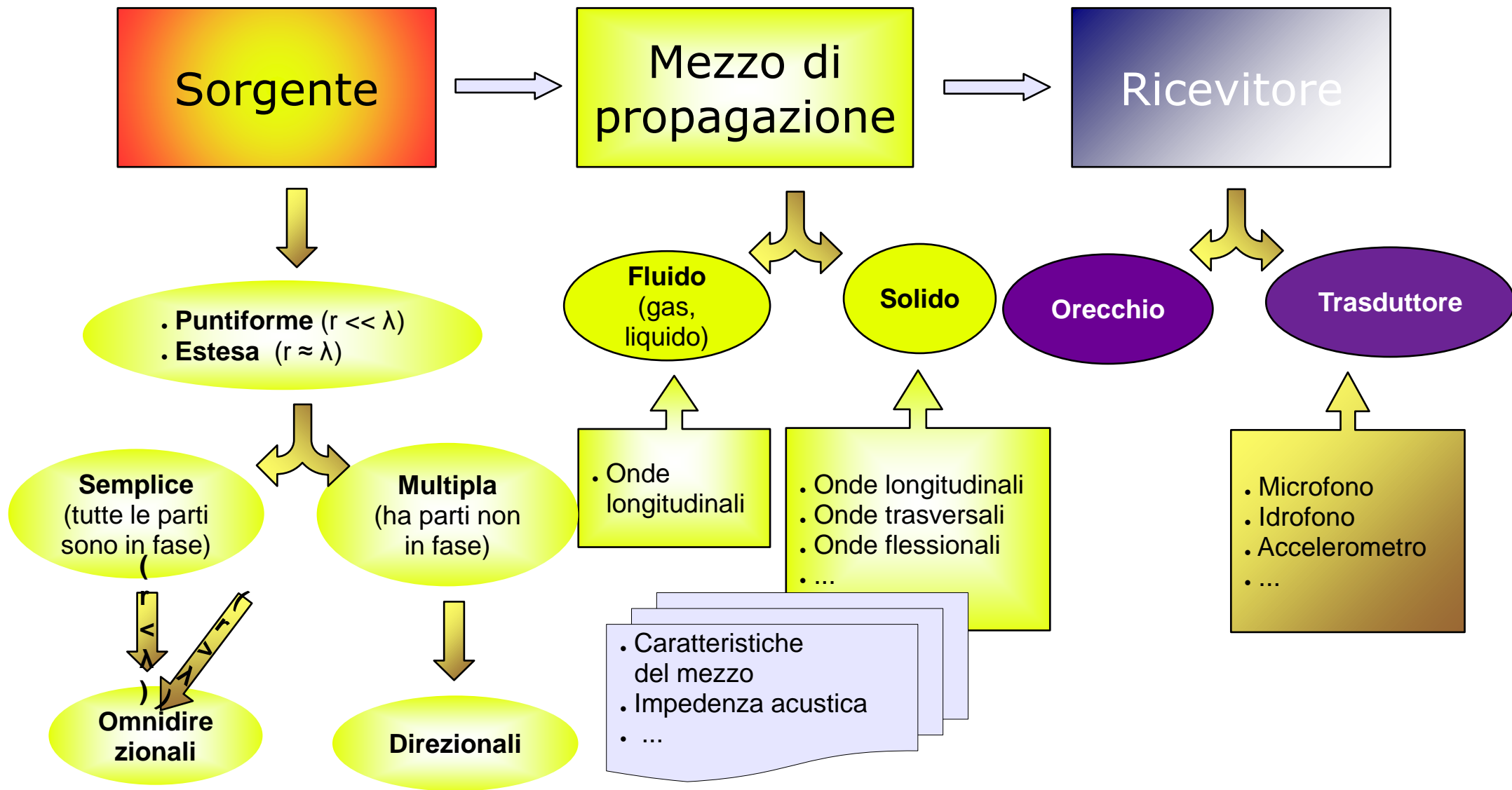
Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

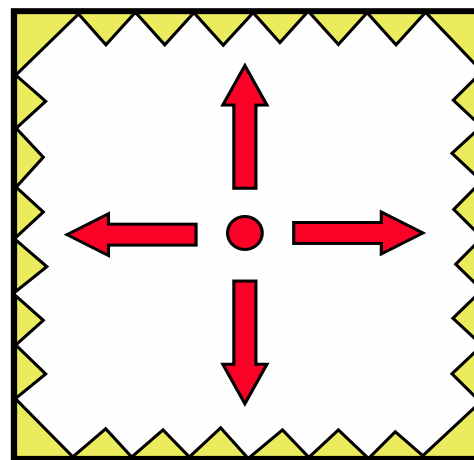
Dispensa n. 5

PROPAGAZIONE IN AMBIENTE ESTERNO

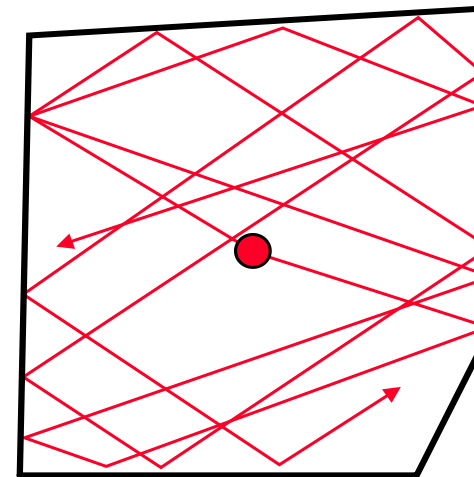
Docente: Paolo Guidorzi



Campo libero: campo acustico che presuppone assenza di superfici riflettenti o ostacoli
oppure
presenza di superfici altamente assorbenti (camera anecoica)



AMBIENTE ANECOICO
($\alpha = 1$)



AMBIENTE RIVERBERANTE
($\alpha = 0$)

Campo riverberante o diffuso: campo confinato in cui è preponderante l'energia riflessa dalle pareti; in ogni punto le onde sonore provengono da tutte le direzioni (camera riverberante)

Campo semi-riverberante: campo sonoro totalmente o parzialmente confinato in cui sono presenti sia onde sonore provenienti direttamente dalla sorgente che onde riflesse.

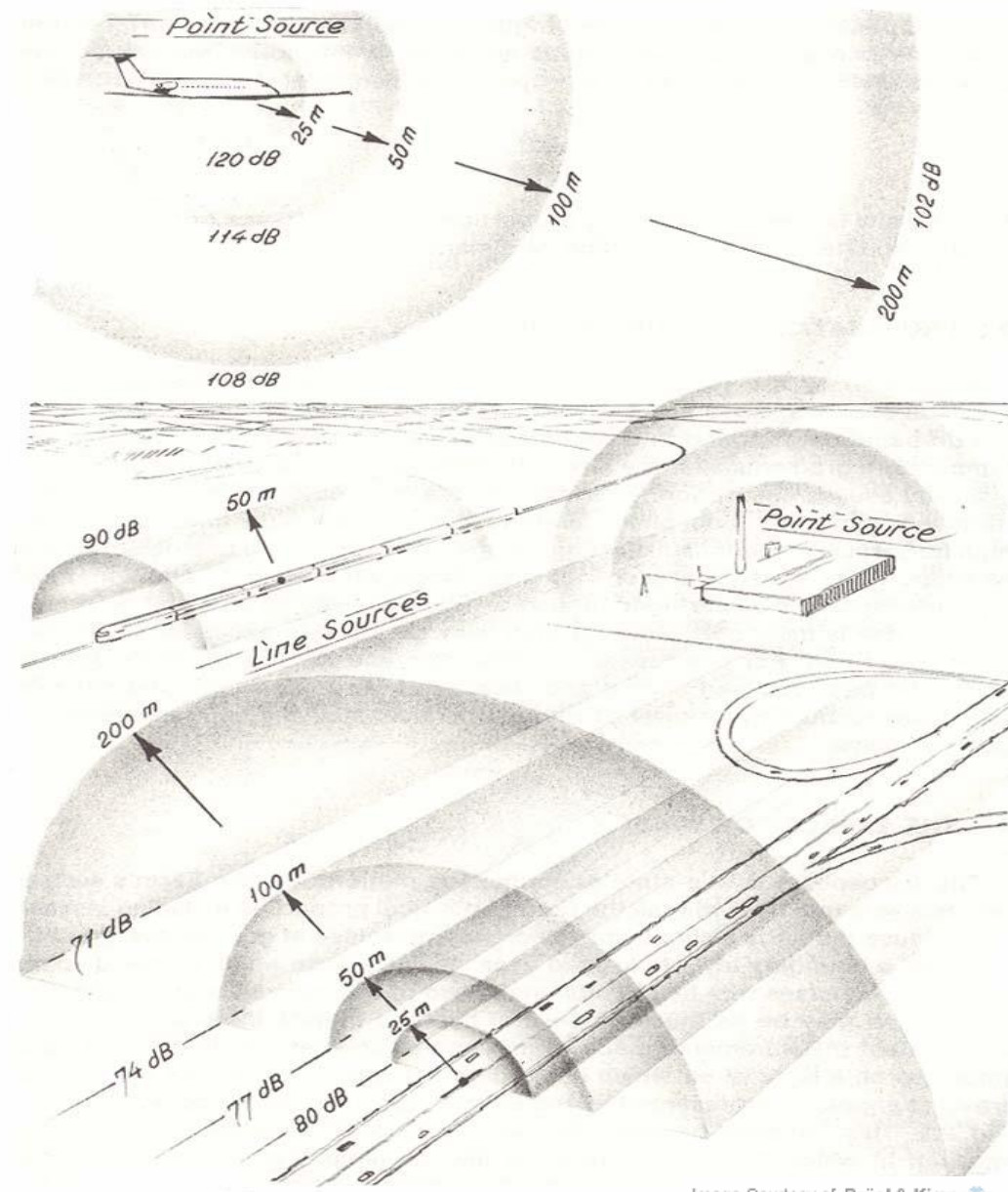
SORGENTI:

- puntiformi
- lineari
- piane

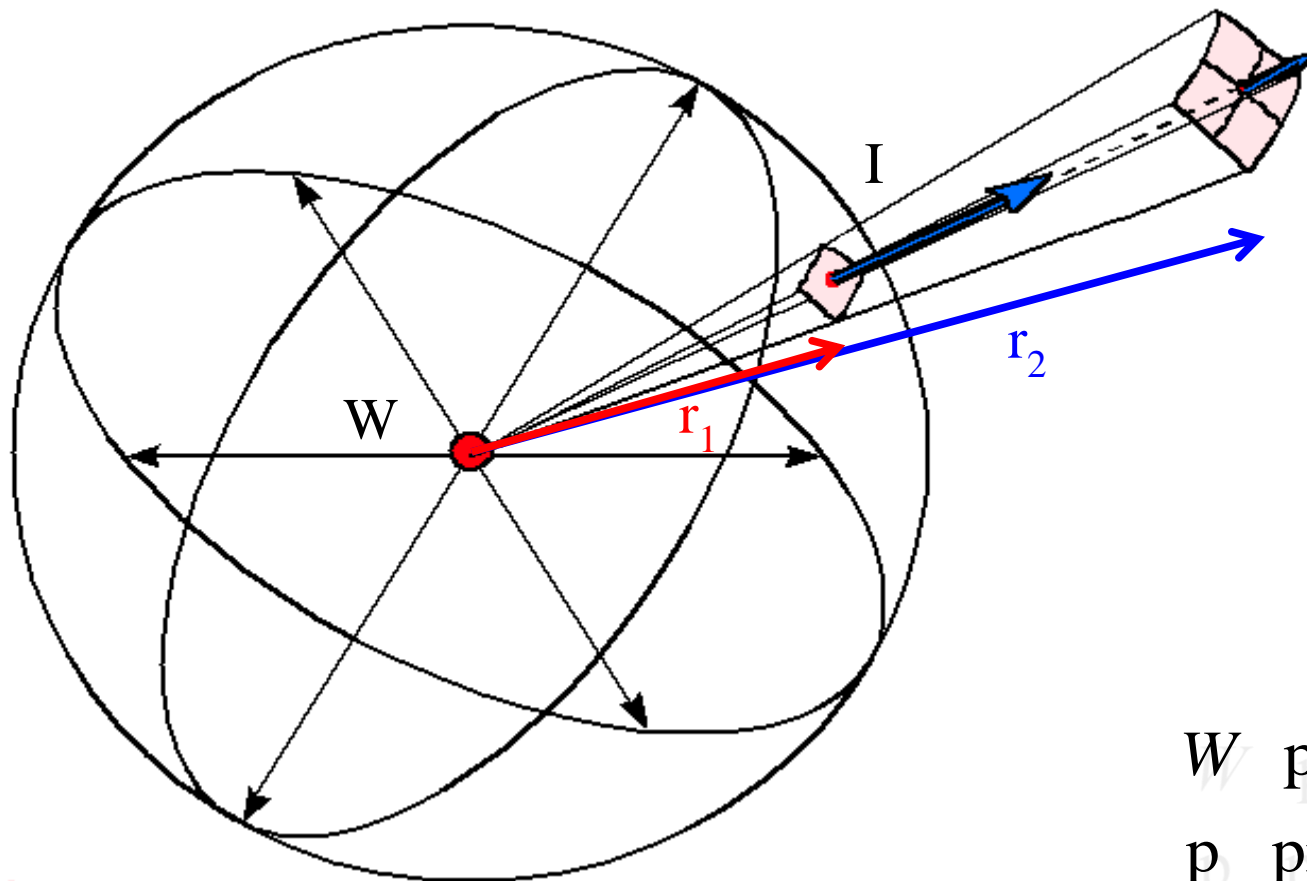
Si considera il **campo lontano**, ovvero a una distanza dalla sorgente maggiore o uguale a 1,6 volte la lunghezza d'onda del suono in esame.

Una sorgente si considera puntiforme, lineare o piana per la sua forma ma anche e soprattutto per la distanza dal ricevitore. Ciò che conta sono le sue dimensioni in rapporto a tale distanza.

Es. una sorgente si considera puntiforme quando le sue dimensioni sono piccole rispetto alla distanza dal ricevitore.



LA PROPAGAZIONE IN CAMPO APERTO – SORGENTE PUNTIFORME



$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS = I \cdot S$$

$$\Rightarrow I = \frac{W}{S}$$

Sorgente puntiforme in **campo libero** che irradia in modo uniforme in tutte le direzioni una potenza acustica costante W

W potenza acustica [W]

p pressione acustica [Pa]

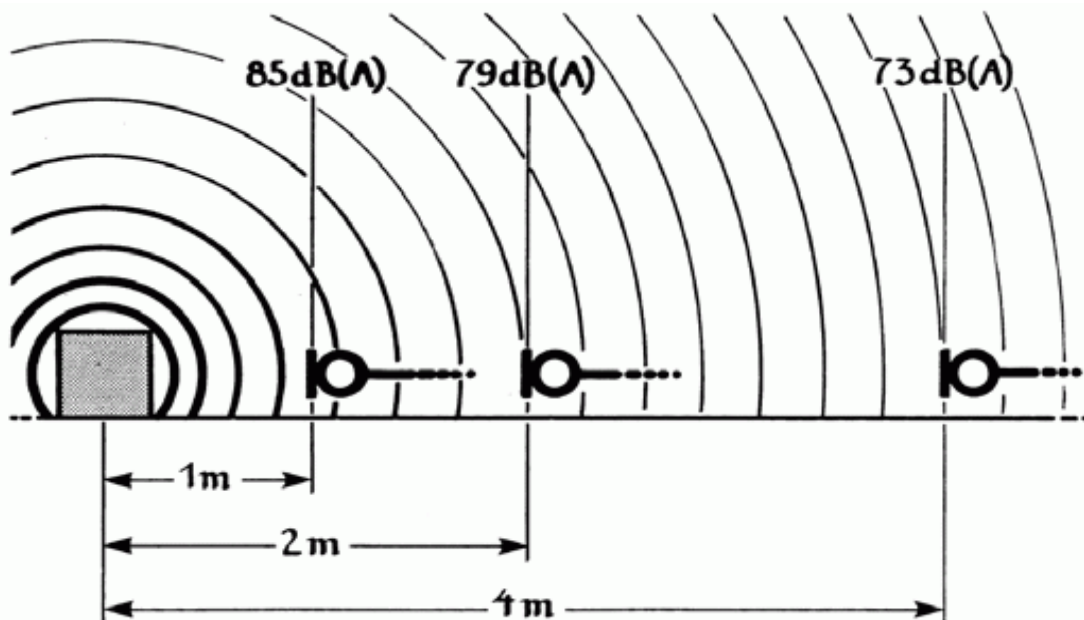
I Intensità acustica [W/m^2]

$\rho_0 c$ Impedenza acustica [$\text{Pa s}/\text{m}$]

$$L_W = L_p + 20 \log r + 11 \quad (\text{dB})$$

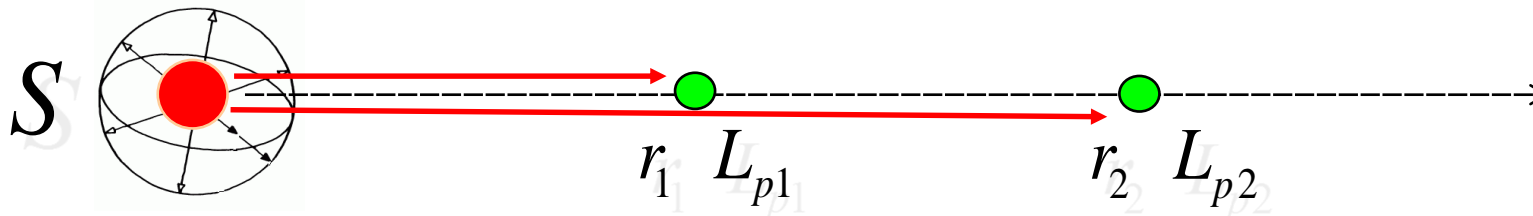
Il livello di potenza è costante, il livello di pressione cala allontanandosi dalla sorgente

$$L_p = L_W - 20 \log r - 11 \quad (\text{dB})$$



In assenza di ostacoli, il Livello di pressione cala di 6 dB al raddoppio della distanza

L'attenuazione per divergenza di **onde sferiche** ΔL si calcola nel seguente modo:



$$L_{p1} = L_W - 11 - 20 \log r_1$$

$$L_{p2} = L_W - 11 - 20 \log r_2$$

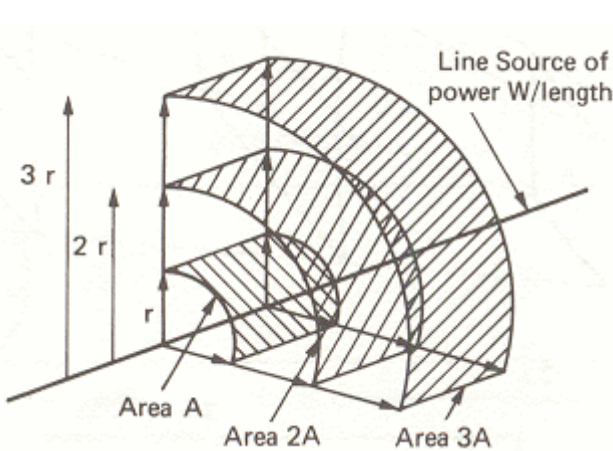
$$\Delta L = L_{p1} - L_{p2} = -20 \log r_1 + 20 \log r_2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

Nel caso di raddoppio della distanza si ottiene un'attenuazione di 6 dB.

Ciò è anche fisicamente spiegabile dal momento che raddoppiare la distanza significa quadruplicare la superficie del fronte d'onda; Raddoppiare la superficie significa dimezzare l'energia ($I=W/S$) e ottenere un'attenuazione di 3 dB. Se la superficie diventa 4 volte, come nel caso di onde sferiche, l'attenuazione diventa 6 dB.

LA PROPAGAZIONE IN CAMPO APERTO – SORGENTE LINEARE

Per una sorgente lineare di lunghezza infinita si ha propagazione per onde cilindriche



$$\left\{ \begin{aligned} W_L &= I \cdot S \\ S &= 2\pi r \\ I &= \frac{p^2}{\rho_0 c} \end{aligned} \right.$$

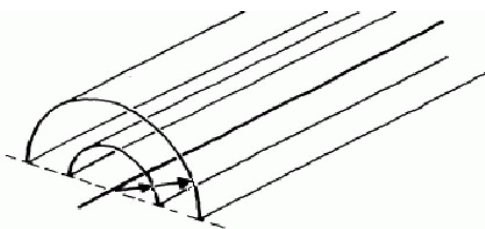


$$L_p = L_W - 10 \log r - 8 \quad (\text{dB})$$

Il calcolo si effettua in modo analogo al precedente caso di onda sferica. In questo caso si considera una superficie cilindrica di lunghezza unitaria.

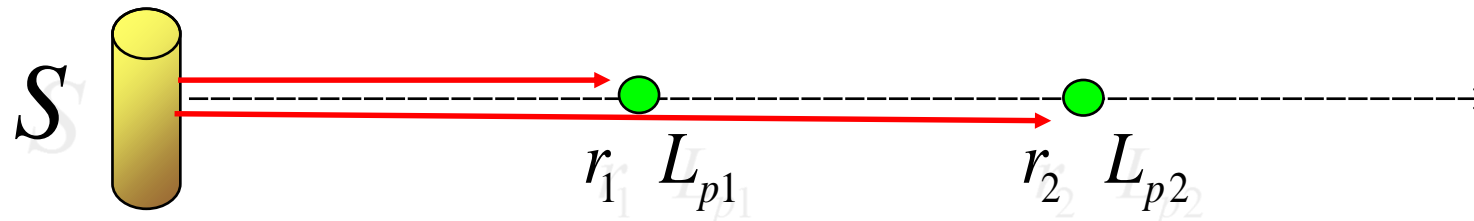
In assenza di ostacoli, il Livello di pressione cala di 3 dB al raddoppio della distanza

Per una sorgente lineare di lunghezza infinita su spazio riflettente (strade o ferrovie) si ha propagazione per onde semicilindriche



$$L_p = L_W - 10 \log r - 5 \quad (\text{dB})$$

L'attenuazione per divergenza di **onde cilindriche** ΔL si calcola nel seguente modo:



$$L_{p1} = L_W - 8 - 10 \log r_1$$

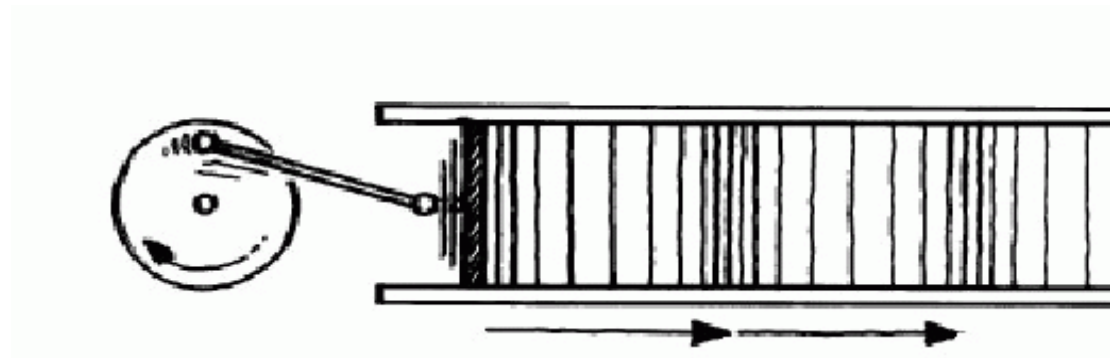
$$L_{p2} = L_W - 8 - 10 \log r_2$$

$$\Delta L = L_{p1} - L_{p2} = -10 \log r_1 + 10 \log r_2 = 10 \log \frac{r_2}{r_1}$$

Nel caso di raddoppio della distanza si ottiene un'attenuazione di 3 dB.

LA PROPAGAZIONE IN CAMPO APERTO – SORGENTE PIANA

Per una sorgente piana, non si ha diminuzione di livello all'aumentare della distanza

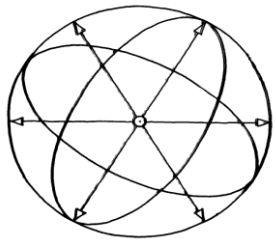


Un esempio di sorgente di onda piana può essere una lastra vibrante o la facciata di un edificio. La condizione di onda piana si perde vicino ai bordi o all'aumentare della distanza sorgente-ricevitore.

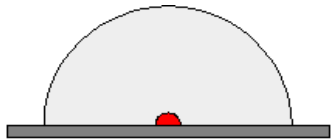
LA DIRETTIVITA' DELLA SORGENTE

Se la sorgente è posizionata in prossimità di una superficie solida, la formula diventa:

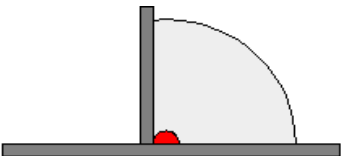
$$L_p = L_W - 20 \log r + 10 \log Q - 11 \quad (\text{dB})$$



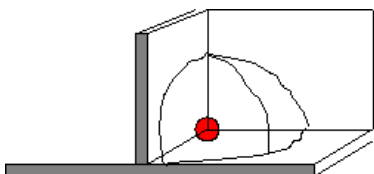
$$Q = 1 \quad 10 \log Q = 0$$



$$Q = 2 \quad 10 \log Q = 3$$



$$Q = 4 \quad 10 \log Q = 6$$



$$Q = 8 \quad 10 \log Q = 9$$

$$DI = 10 \log Q$$

DI = Indice di direttività
Q = fattore di direttività



$$Q = 1 \quad 10 \log Q = 0$$

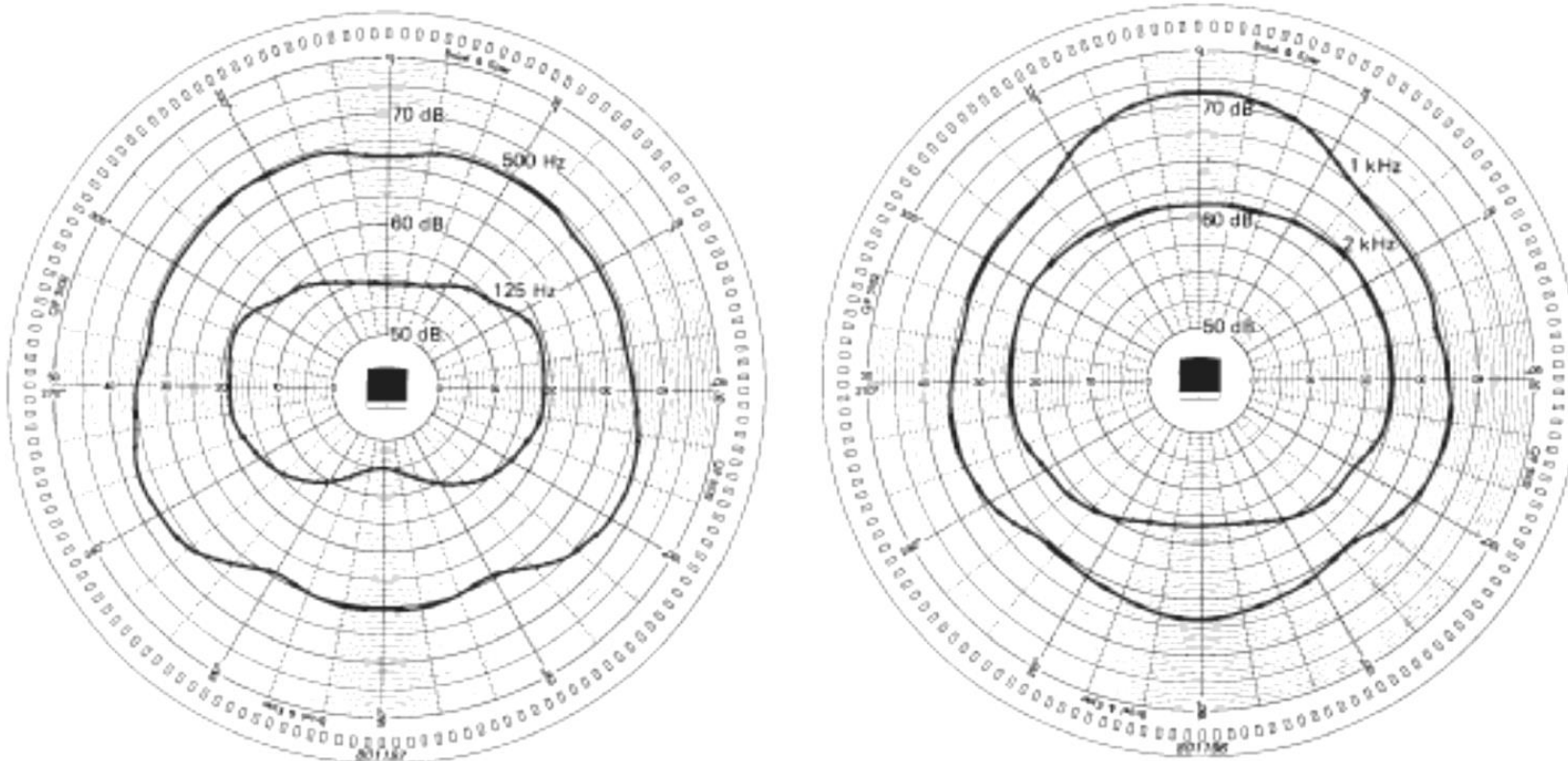
$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 \quad (\text{dB})$$



$$Q = 2 \quad 10 \log Q = 3$$

$$L_p = L_w - 20 \log r - 8 \quad (\text{dB})$$

Le sorgenti reali non sono omnidirezionali



Esempio di diagramma contenente informazioni sulla direttività per emissione di una sorgente

Entrambi i contributi (direttività per posizione e per emissione di una sorgente) vanno considerati quando si calcola la direttività complessiva.

IPOSTESI DELL'ACUSTICA GEOMETRICA

Si fa l'ipotesi che la lunghezza d'onda del suono che si sta considerando sia trascurabile rispetto alle dimensioni degli ostacoli contro cui va a riflettersi.

Quando questa ipotesi è verificata, invece di onda sonora si può trattare il problema parlando di *raggi sonori e sorgenti virtuali*.

Un raggio sonoro quindi sarà originato da una sorgente e si rifletterà contro gli ostacoli che incontrerà, attenuandosi a causa dell'assorbimento delle superfici e della divergenza geometrica (il raggio sonoro può essere pensato anche come una piccola porzione di un'onda sferica).

Si noti che questa teoria può essere applicata con buona approssimazione solo per le medie frequenze, ovvero per quei suoni la cui lunghezza d'onda non è paragonabile né alle dimensioni dell'ambiente o degli ostacoli né alla dimensione delle irregolarità delle superfici.

In l'aria ($c = 340$ m/s a 14 °C):

$$f = 10 \text{ Hz} \quad \lambda = 340/10 = 34 \text{ m}$$

$$f = 20 \text{ Hz} \quad \lambda = 340/20 = 17 \text{ m}$$

$$f = 50 \text{ Hz} \quad \lambda = 340/50 = 6,8 \text{ m}$$

$$f = 100 \text{ Hz} \quad \lambda = 340/100 = 3,4 \text{ m}$$

$$f = 340 \text{ Hz} \quad \lambda = 340/340 = 1 \text{ m}$$

$$f = 1000 \text{ Hz} \quad \lambda = 340/1000 = 0,34 \text{ m}$$

$$f = 10000 \text{ Hz} \quad \lambda = 340/10000 = 0,034 \text{ m}$$

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

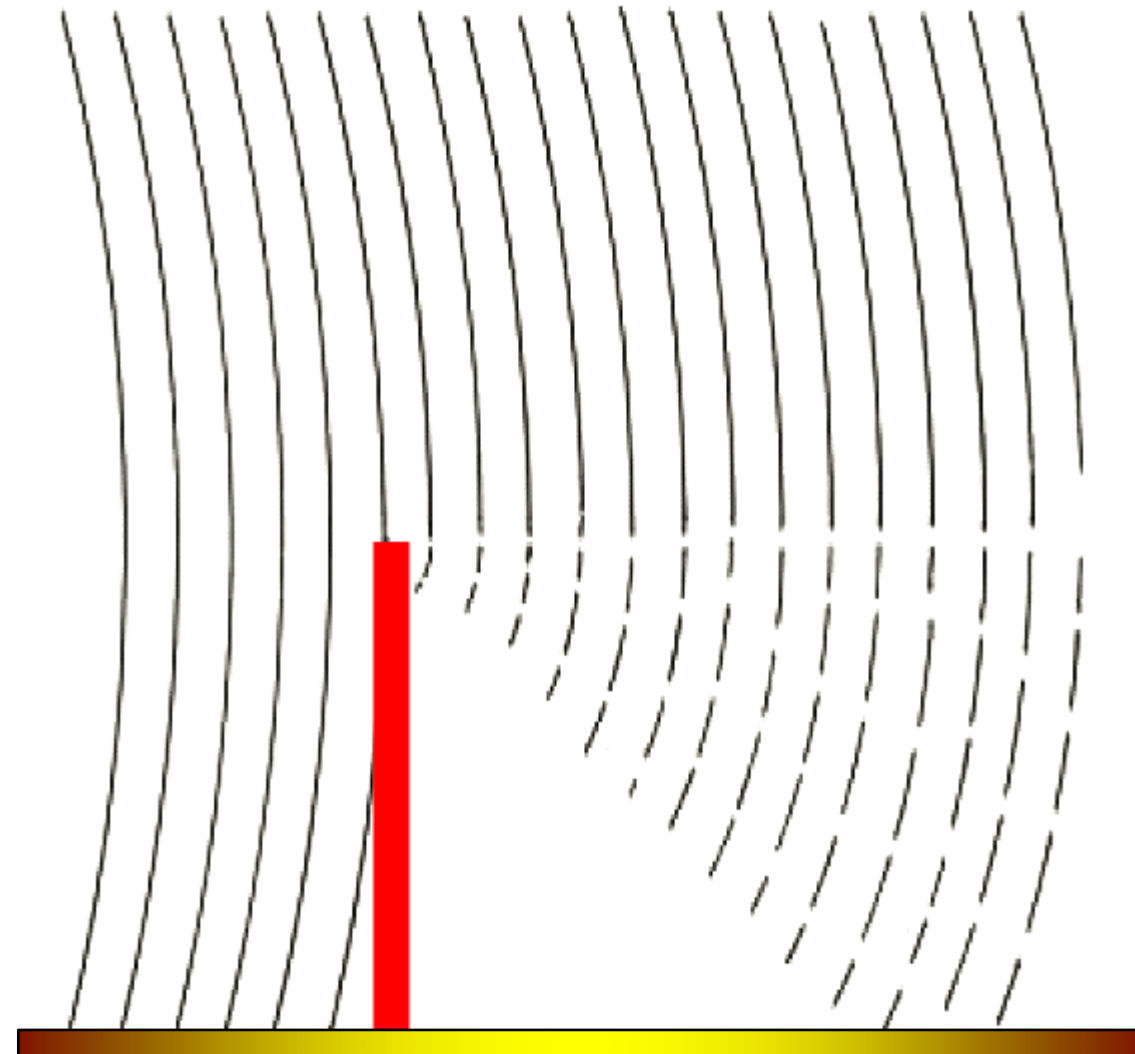
LA DIFFRAZIONE

Il fenomeno della diffrazione si verifica quando un'onda sonora incontra un ostacolo. L'effetto di tale interazione è diverso a seconda delle dimensioni dell'ostacolo rispetto alla lunghezza d'onda del suono incidente.

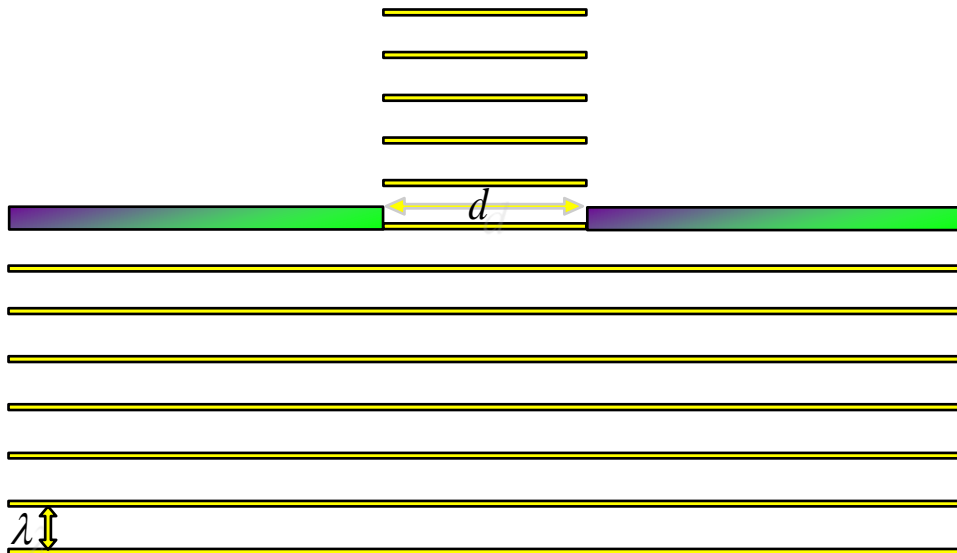
Ad esempio, una fenditura diventa sorgente di un'onda sferica se l'onda incidente ha bassa frequenza (ovvero lunghezza d'onda maggiore rispetto alla dimensione della fenditura).

Se invece un'onda sonora incontra una barriera, il suo bordo superiore si comporta come una nuova sorgente e l'effetto *ombra acustica* al di là della barriera dipende fortemente dalla frequenza dell'onda.

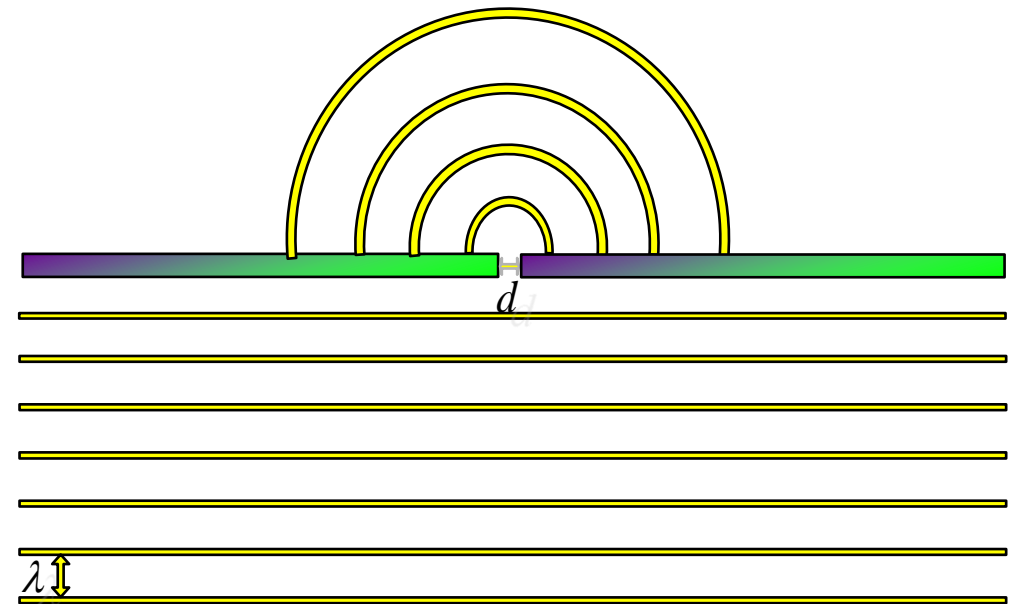
Lo studio dell'attenuazione di una barriera acustica, in dipendenza dalla frequenza dell'onda incidente, è stato studiato dal giapponese Maekawa.



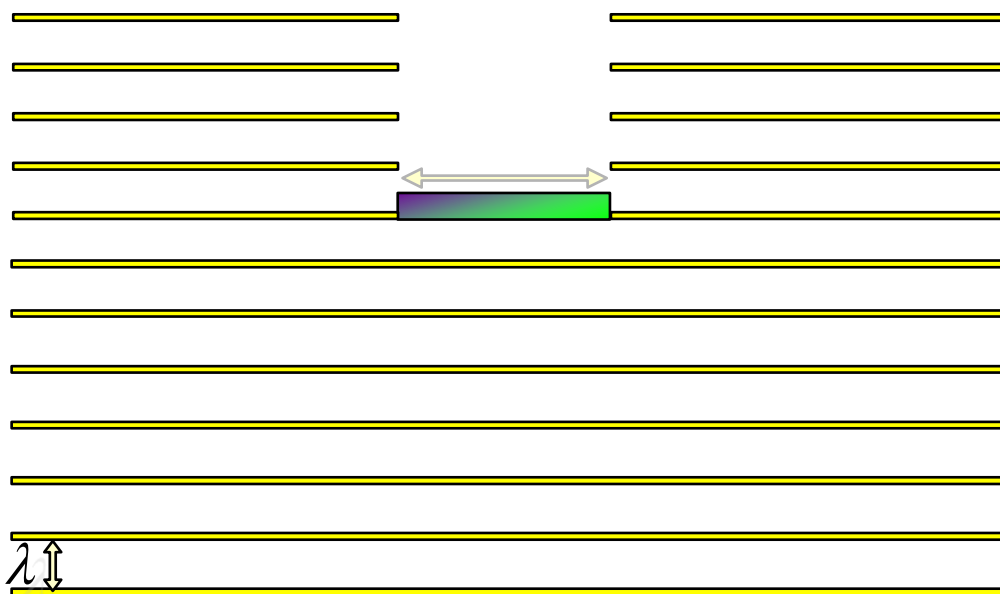
$d \gg \lambda \Rightarrow$ l'onda oltrepassa l'apertura
e si propaga in una zona limitata



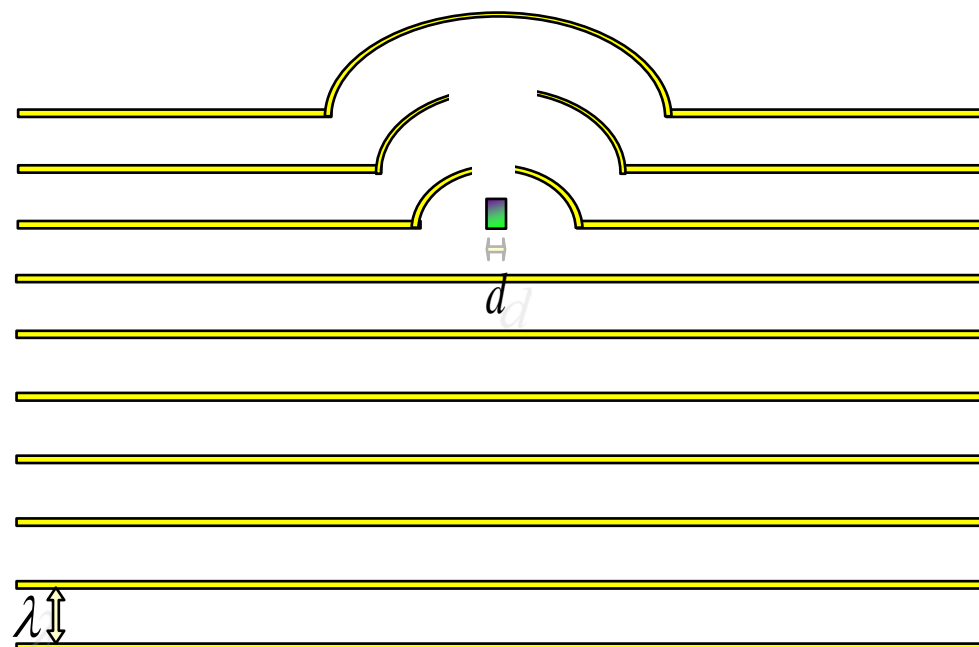
$d < \lambda \Rightarrow$ l'onda si propaga anche
in zone limitrofe all'apertura



$d \gg \lambda \Rightarrow$ l'onda oltrepassa l'ostacolo
e crea una zona d'ombra



$d < \lambda \Rightarrow$ l'onda si propaga anche
nella zona d'ombra oltre l'ostacolo



Esperimento per capire il fenomeno: porre uno schermo rigido davanti a una cassa acustica che emette prima un suono acuto e poi un suono grave. L'effetto di schermatura con il suono acuto sarà marcato. L'attenuazione del suono grave invece sarà trascurabile. Calcolare le lunghezze d'onda dei suoni emessi e valutare se sono maggiori o minori delle dimensioni dello schermo utilizzato.

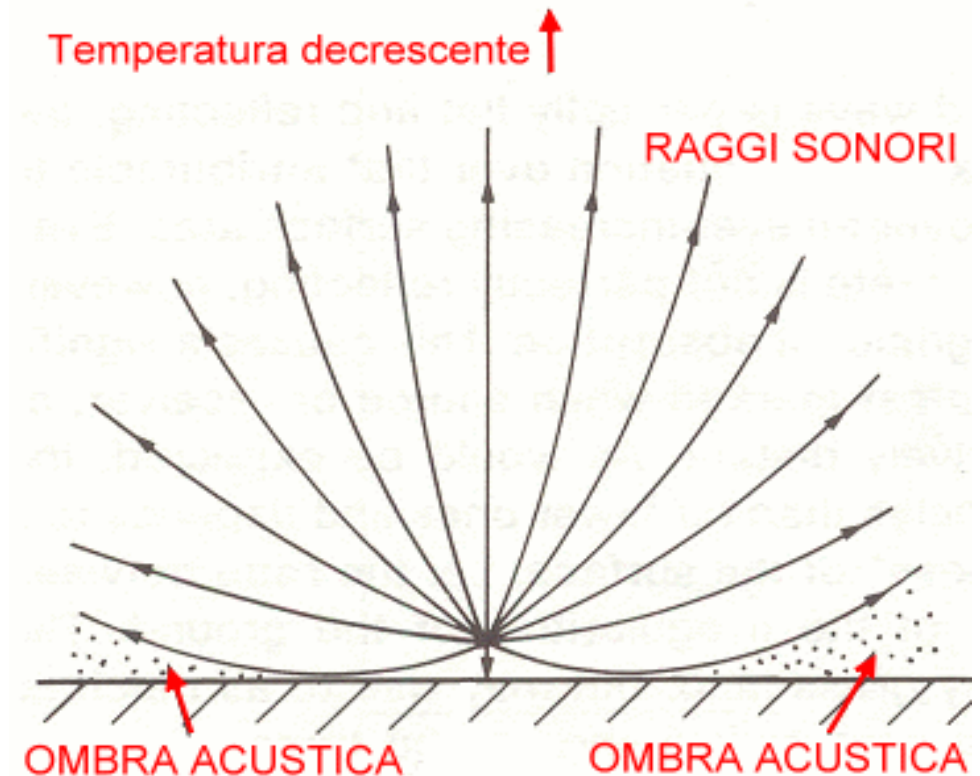
GRADIENTE DI TEMPERATURA E VENTO

E' noto che la velocità del suono è legata alla temperatura dell'aria dalla formula (approssimata):
 $c = 331 + 0,6T \text{ m/s}$ dove T è la temperatura dell'aria in gradi centigradi. Quindi se la temperatura dell'aria aumenta o diminuisce con l'altezza, si avrà una curvatura nella direzione di propagazione.

CASO NORMALE - GIORNO

La temperatura decresce allontanandosi dal suolo. Ciò avviene solitamente di giorno, quando la temperatura al suolo è maggiore della temperatura in quota grazie al riscaldamento solare.

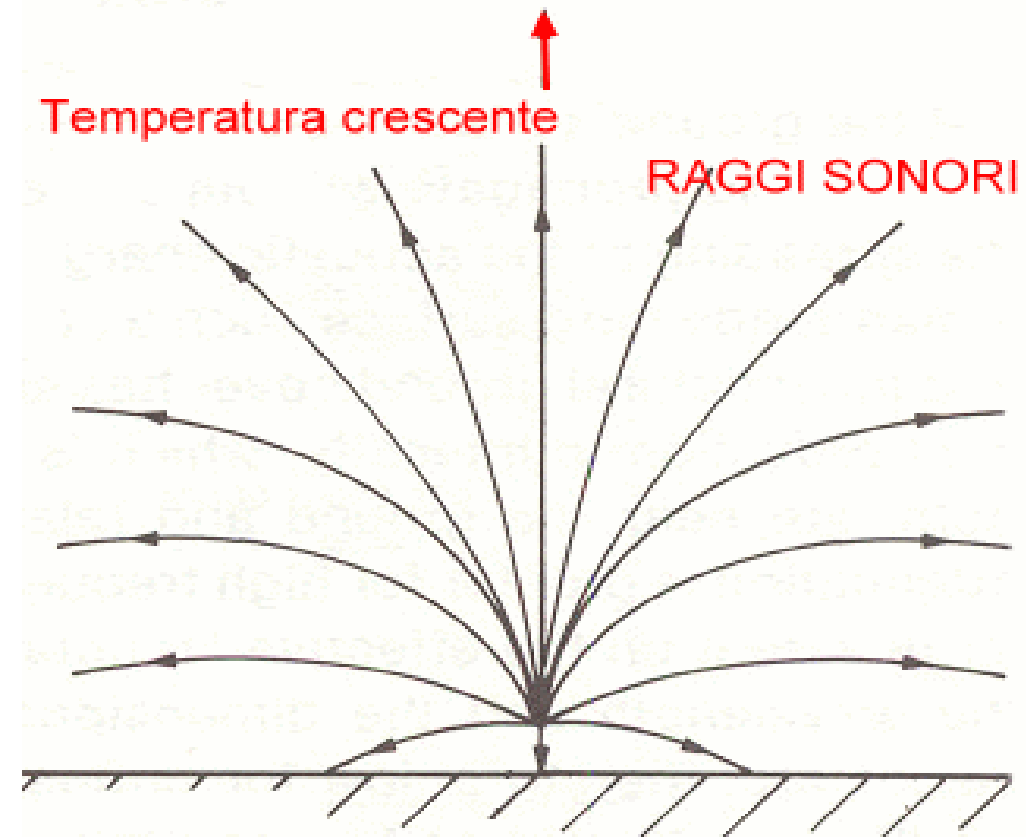
A causa della curvatura verso l'alto dei raggi sonori si formano delle vere e proprie zone d'ombra in cui il suono risulterà particolarmente attenuato o assente.



CASO DI INVERSIONE TERMICA – NOTTE O NUVOLOSO

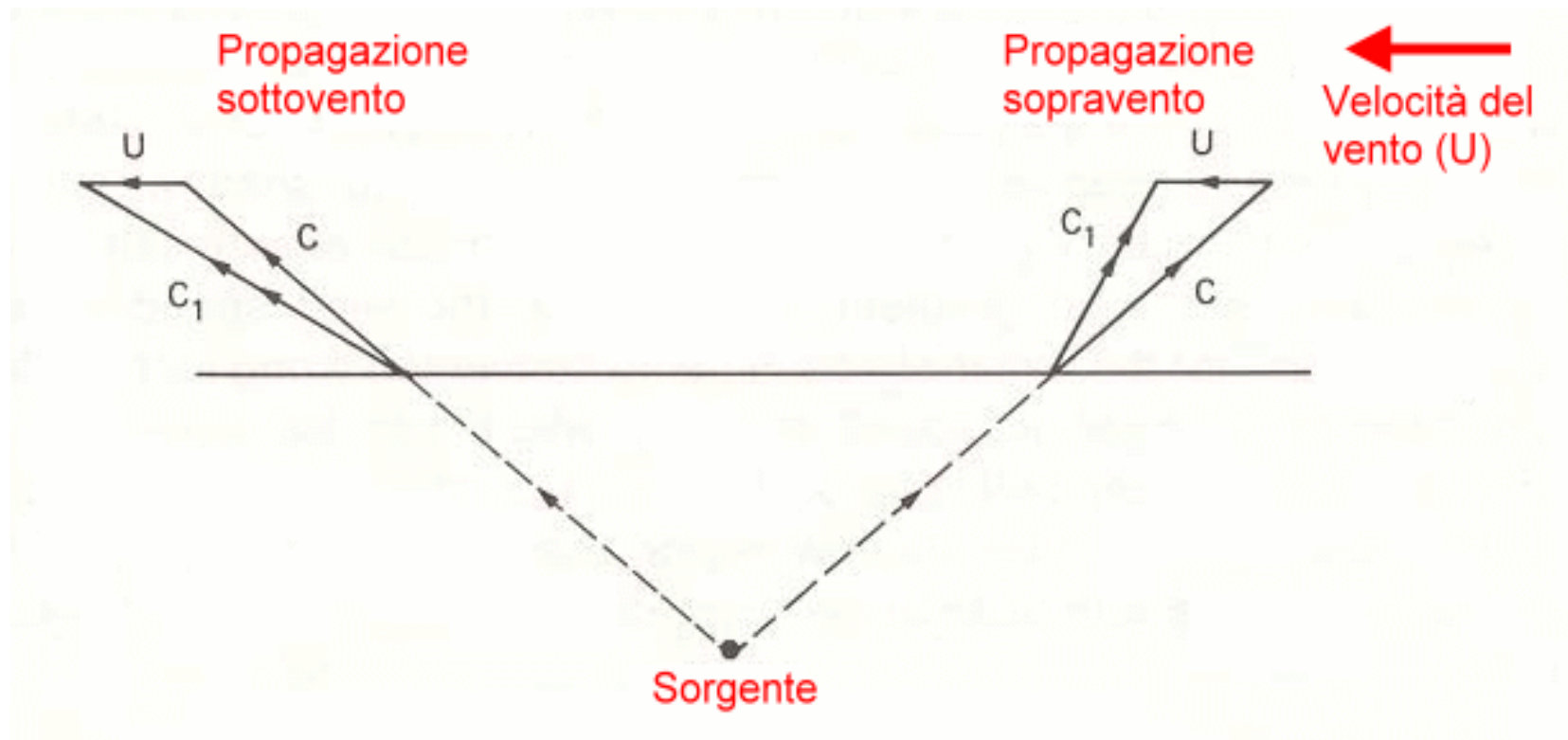
La temperatura cresce allontanandosi dal suolo. Ciò avviene solitamente di notte o in presenza di nuvole o in generale quando la temperatura al suolo è minore di quella dell'aria. In questo caso si ha la curvatura dei raggi sonori opposta rispetto al caso precedente: il suono può propagarsi più lontano di quanto avverrebbe normalmente.

Può manifestarsi un caso particolare, detto “canale sonoro”, quando si ha uno strato d'aria a una temperatura diversa rispetto agli strati superiore e inferiore. In questo caso il suono viene “intrappolato” e trasportato anche a notevole distanza. Ciò ad esempio può accadere in caso di presenza di banchi di nebbia.



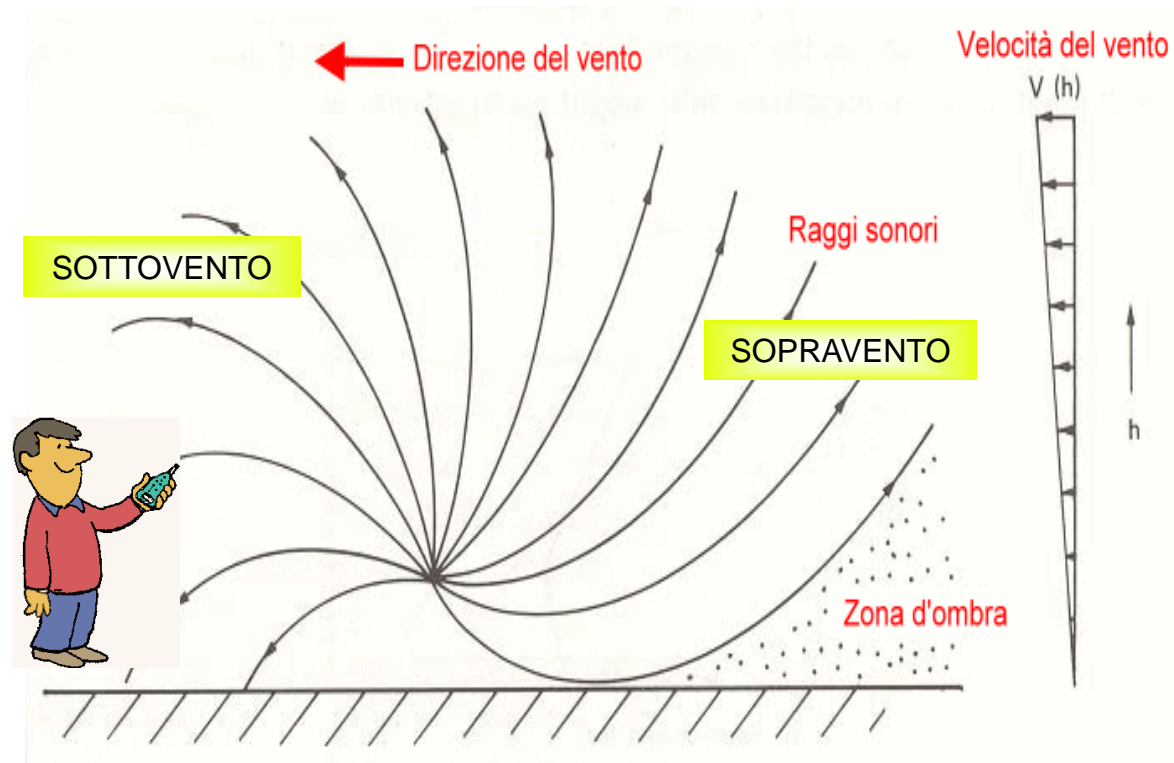
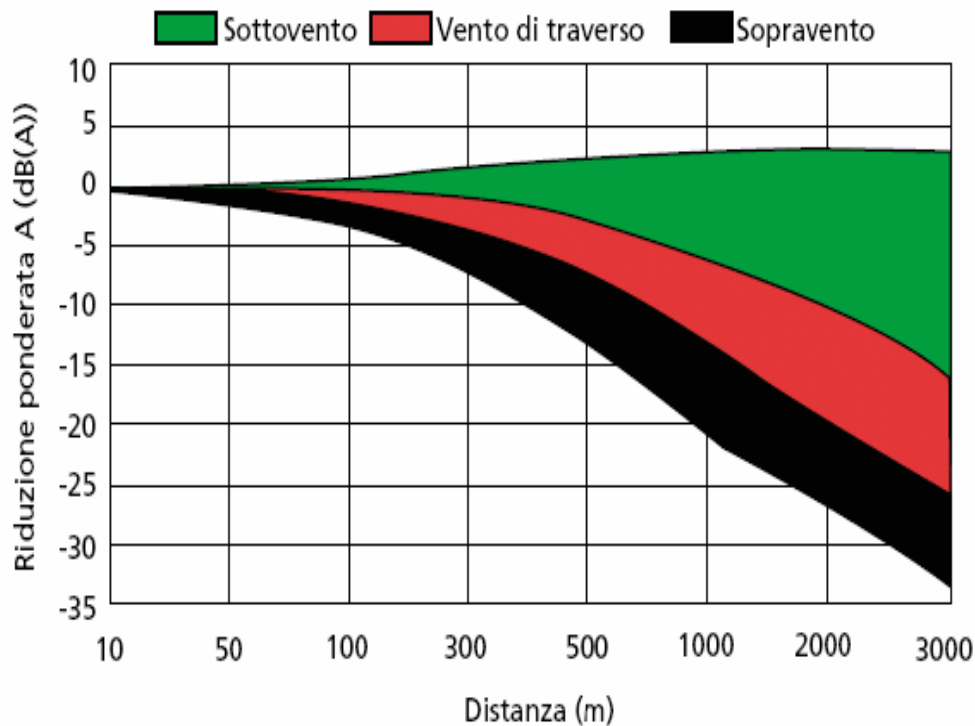
EFFETTO DEL VENTO

La velocità del vento si somma vettorialmente a quella del suono.



EFFETTO DEL VENTO

Se è presente un gradiente di velocità al variare della quota, si osserva una curvatura dei raggi sonori nel modo presentato in figura. In particolare, sopravvento si creano vere e proprie zone d'ombra. Per questo è raccomandato effettuare le misure sottovento, anche se questo può portare a una lieve sovrastima dei livelli sonori. La misura sopravvento porterebbe invece a una notevole sottostima a causa delle zone d'ombra.



ASSORBIMENTO DOVUTO ALLA VEGETAZIONE

La presenza di vegetazione contribuisce ad attenuare il suono, su grandi distanze. Esistono grafici che permettono di calcolare tale tipo di attenuazione, che comunque non superano i pochi dB. L'attenuazione in generale è presente alle alte frequenze a causa del fogliame, mentre se sono presenti alberi e piante di fusto consistente, si ha attenuazione anche in bassa frequenza.

ASSORBIMENTO DOVUTO AD ALTRE CAUSE

La presenza di fogliame, siti industriali o aree abitative può portare altre attenuazioni. Esistono tabelle e formule approssimate per valutare tali valori.

CORREZIONE METEO

Esistono formule correttive per il calcolo del Livello Equivalente da applicare quando la misura è effettuata sottovento. In generale questa correzione varia tra 0 e 5 dB.



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

Dispensa n. 6

ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO

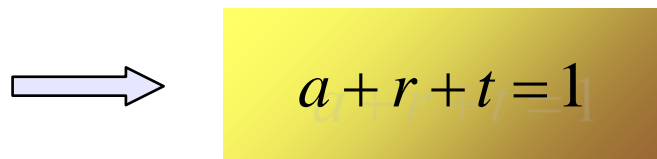
Docente: Paolo Guidorzi

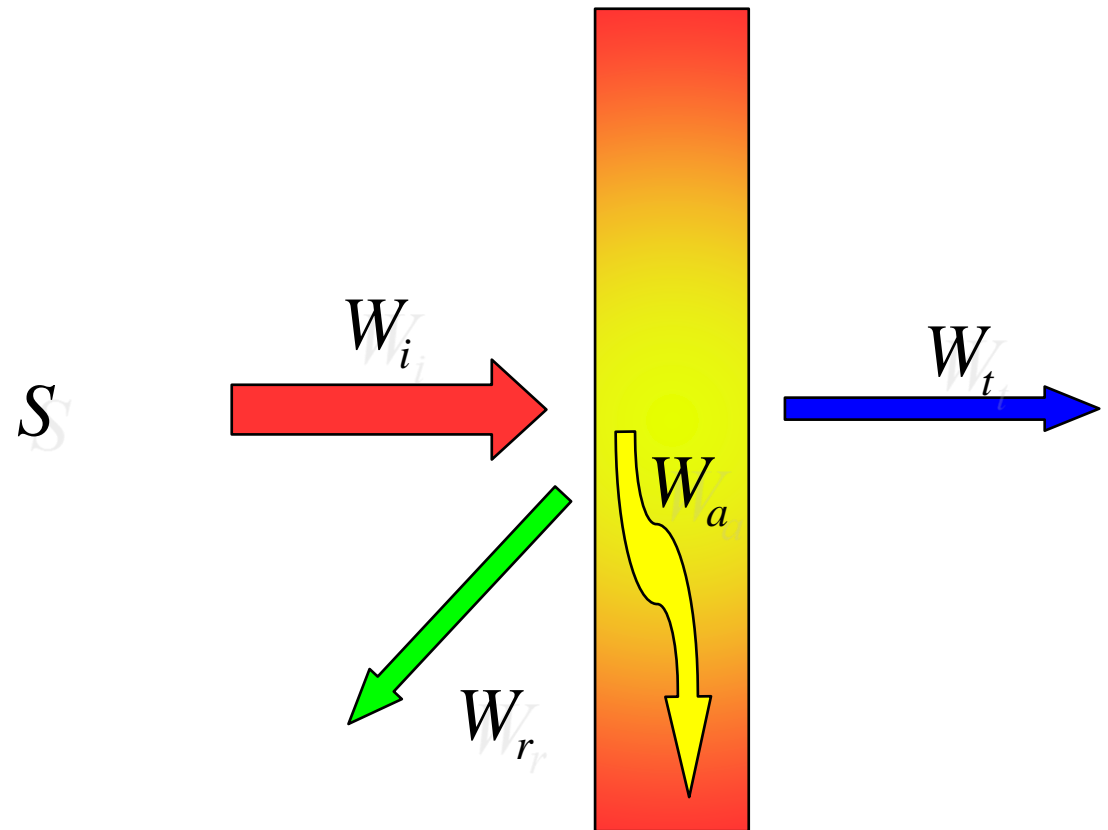
INTRODUZIONE

Studiamo ora cosa accade quando un'onda sonora quando incide su un materiale. Una parte dell'energia dell'onda incidente è riflessa, una parte è assorbita e una parte è trasmessa.

$$W_i = W_a + W_r + W_t$$

$$a = \frac{W_a}{W_i} \quad r = \frac{W_r}{W_i} \quad t = \frac{W_t}{W_i}$$


$$a + r + t = 1$$



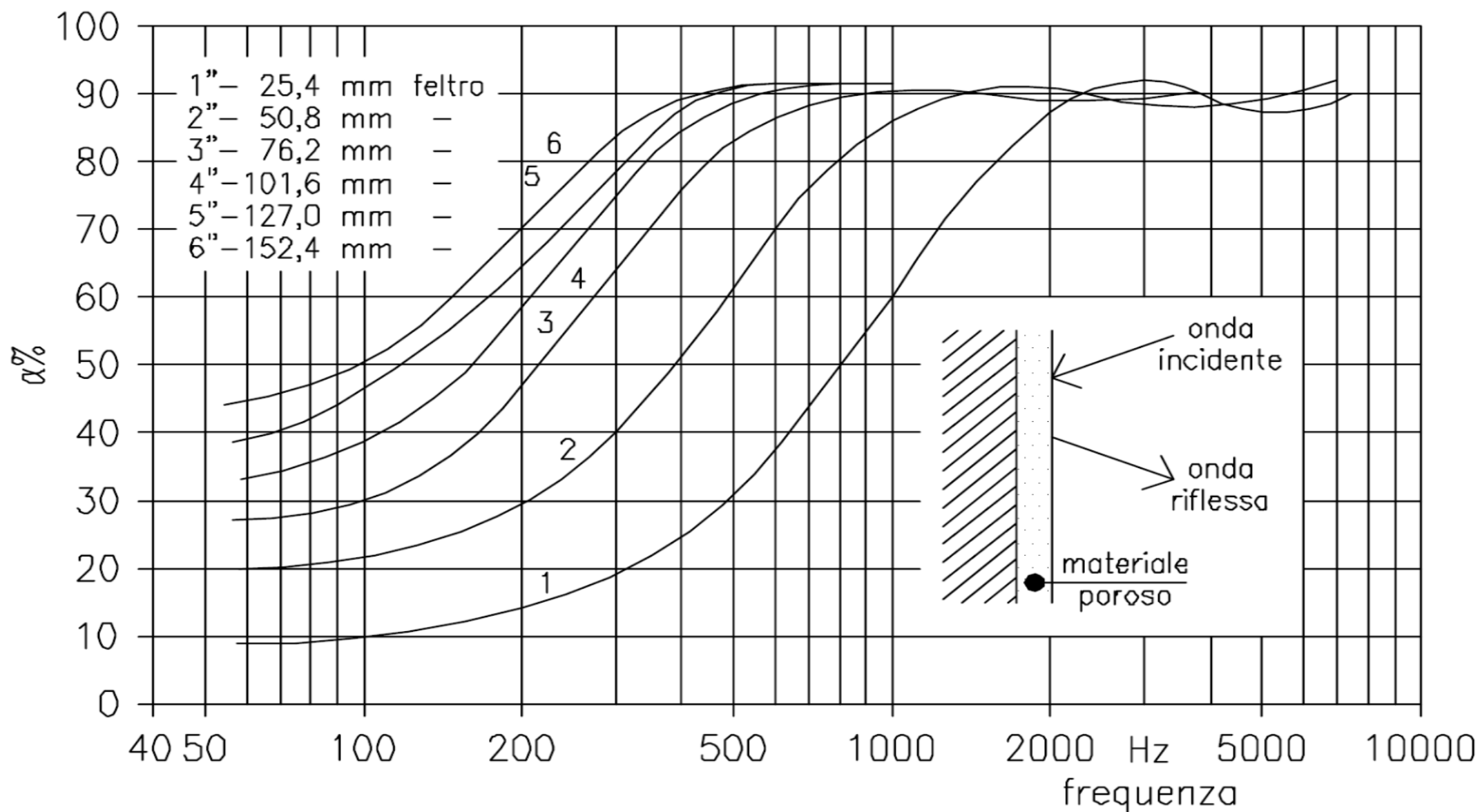
Si sono così definiti i coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione.

Le stesse definizioni potevano essere date in termini di intensità acustica incidente, riflessa e trasmessa



ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO

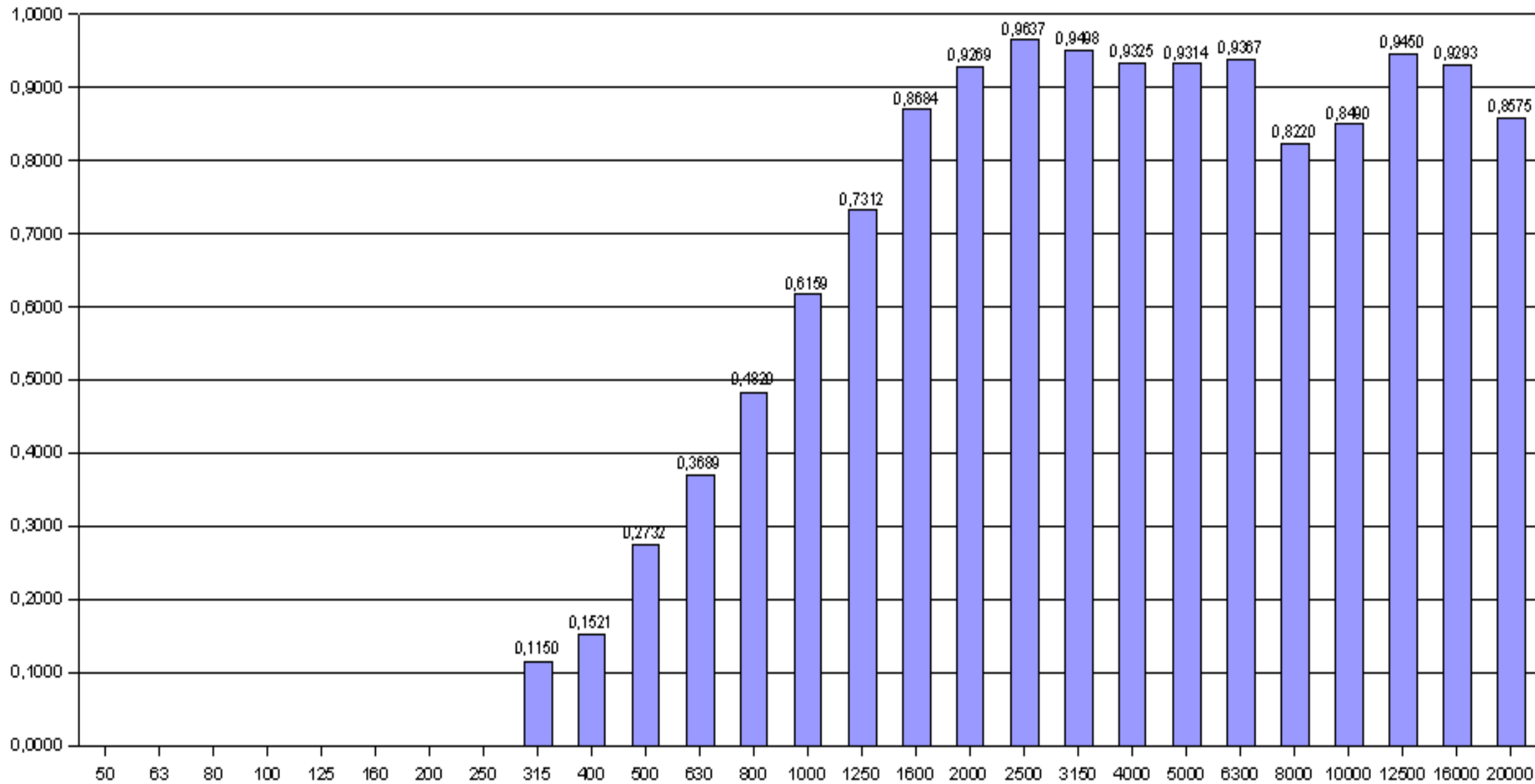
4 - Materiali fonoassorbenti porosi



Andamento del coefficiente di assorbimento α in funzione della frequenza e dello spessore del materiale



ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO
4 - Materiali fonoassorbenti porosi
Pag. 198



Esempio di andamento del coefficiente di assorbimento α di un materiale poroso (bande di 1/3 d'ottava)

Descrizione	Frequenza (Hz)				
	250	500	1000	2000	4000
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 25 mm applicato a contatto con la parete	0.10	0.30	0.70	0.50	0.50
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 35 mm applicato a contatto con la parete	0.15	0.25	0.50	0.90	0.65
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 50 mm applicato a contatto con la parete	0.25	0.65	0.60	0.55	0.90
Pannello rigido in gesso rivestito, spessore 13 mm, con il 18% della superficie perforata, montato a 200 mm dal soffitto	0.75	0.78	0.64	0.60	0.58
Pannello rigido in gesso rivestito, spessore 13 mm, con il 18% della superficie perforata, montato a 58 mm dal soffitto	0.40	0.63	0.82	0.64	0.43
Linoleum	0.10	0.10	0.09	0.10	0.12
Moquette	0.05	0.10	0.20	0.40	0.81
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ spessore 13 mm	0.11	0.40	0.90	0.90	0.82
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ spessore 60 mm	0.30	0.62	0.90	0.99	0.98
Sedia di metallo	0.015	0.030	0.035	0.025	0.035
Sedia imbottita	0.23	0.37	0.27	0.25	0.25
Sughero	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
Tappeto pesante	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30
Tappeto sottile	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20

 Valori del coefficiente di assorbimento α per alcuni materiali

COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO APPARENTE

Si definisce il **coefficiente di assorbimento acustico apparente**:

$$\alpha = a + t = 1 - r$$

“Alfa” fisicamente include sia il contributo di energia assorbita dal materiale che il contributo di energia trasmessa, ovvero comprende tutto ciò che non è riflesso ($1-r$), da cui “apparente”.

Alcuni esempi:

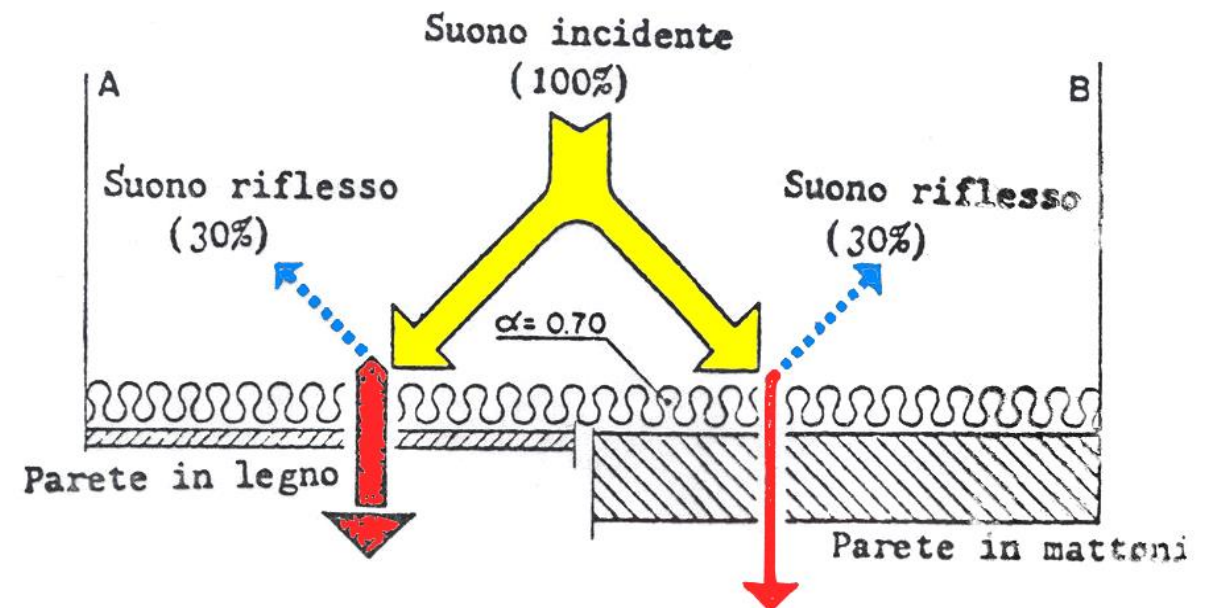
$$r = 0; \quad \alpha = 1;$$

materiale perfettamente assorbente
Es: finestra aperta (assorbitore ideale).

Materiali con alto α : materiali porosi,
lana di roccia, lana di vetro, poliuretano
espanso

$$r = 1; \quad \alpha = 0;$$

materiale perfettamente riflettente
Es: parete liscia di materiale duro.



AI FINI DELLA VALUTAZIONE DELL'ASSORBIMENTO ACUSTICO NON INTERESSA SAPERE SE L'ENERGIA E' STATA TRATTENUTA DALLA PARETE O TRASMESSA, MA SOLTANTO QUANTA ENERGIA NON VIENE RIFLESSA!

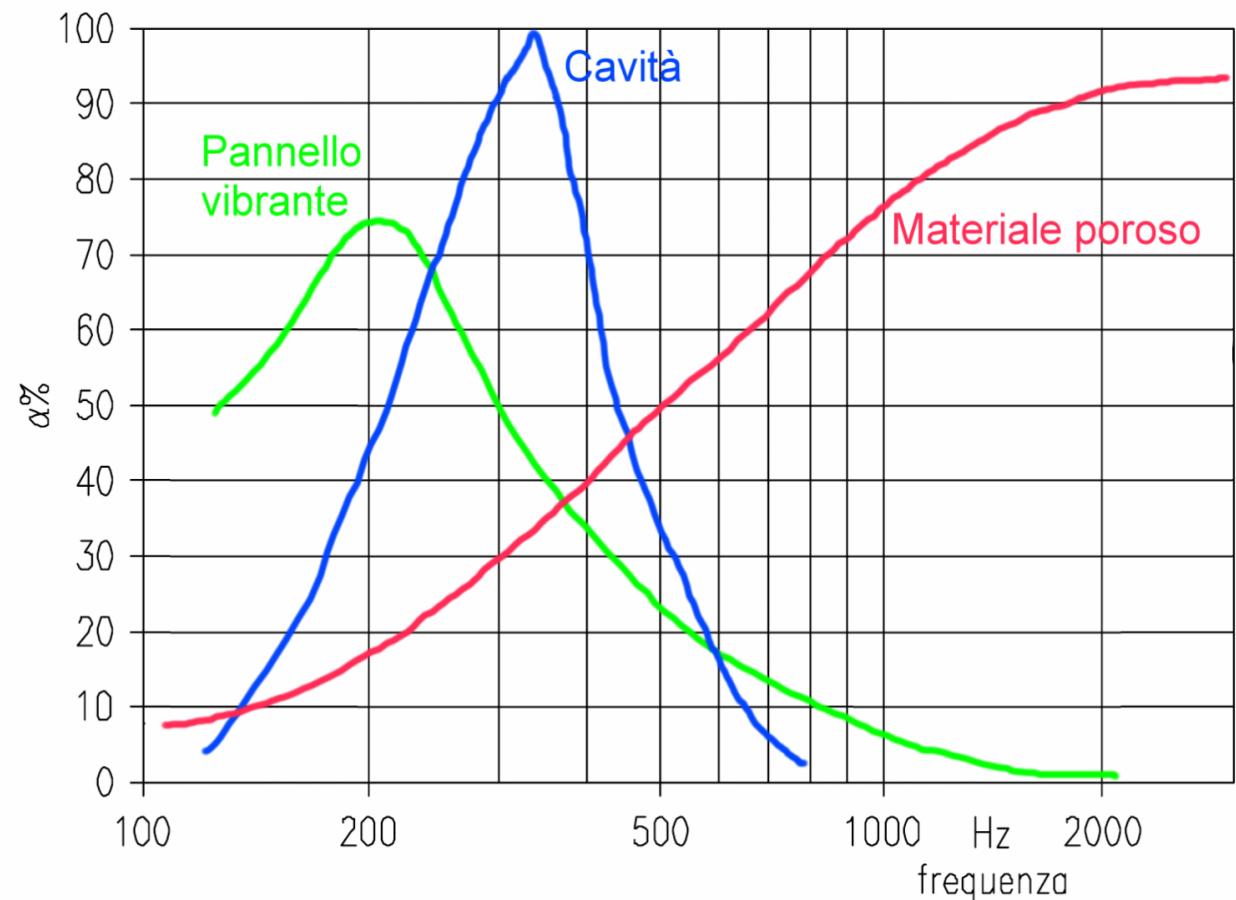
MATERIALI FONOASSORBENTI

I materiali assorbenti sono utilizzati nei trattamenti acustici degli ambienti chiusi, per ridurre il tempo di riverberazione ed eliminare riflessioni indesiderate, all'interno di pareti divisorie come smorzatori e per ridurre le risonanze.

Si possono dividere in alcune categorie:

- materiali porosi
- risuonatori di Helmholtz o cavità
- pannelli vibranti

Essendo diversi i principi fisici alla base di ognuno di questi tipi di materiali fonoassorbenti, si ha un'efficienza maggiore in diversi ambiti di frequenze per ogni diversa tipologia.



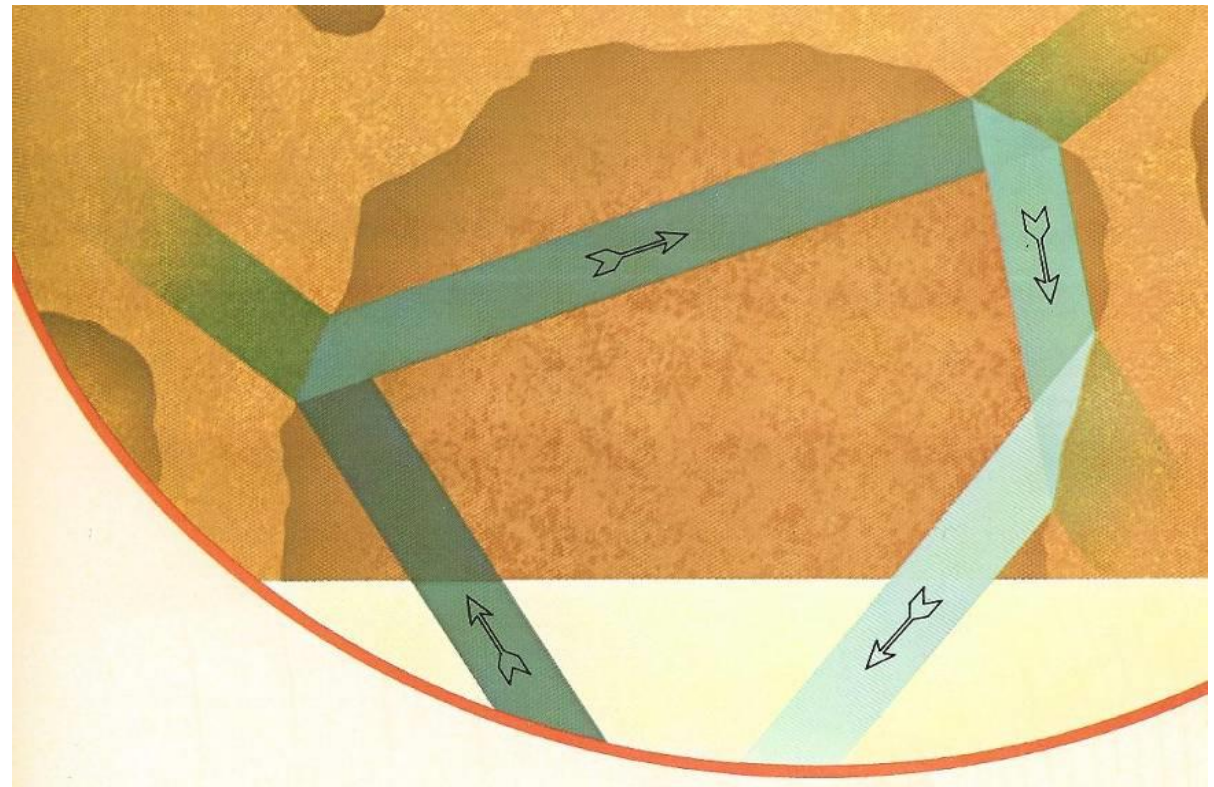
MATERIALI FONOASSORBENTI POROSI

Il meccanismo di assorbimento del suono dei materiali porosi consiste nella trasformazione di energia sonora in calore. Esso dipende da:

- dissipazione viscosa nelle cavità d'aria
- attrito tra le fibre in vibrazione

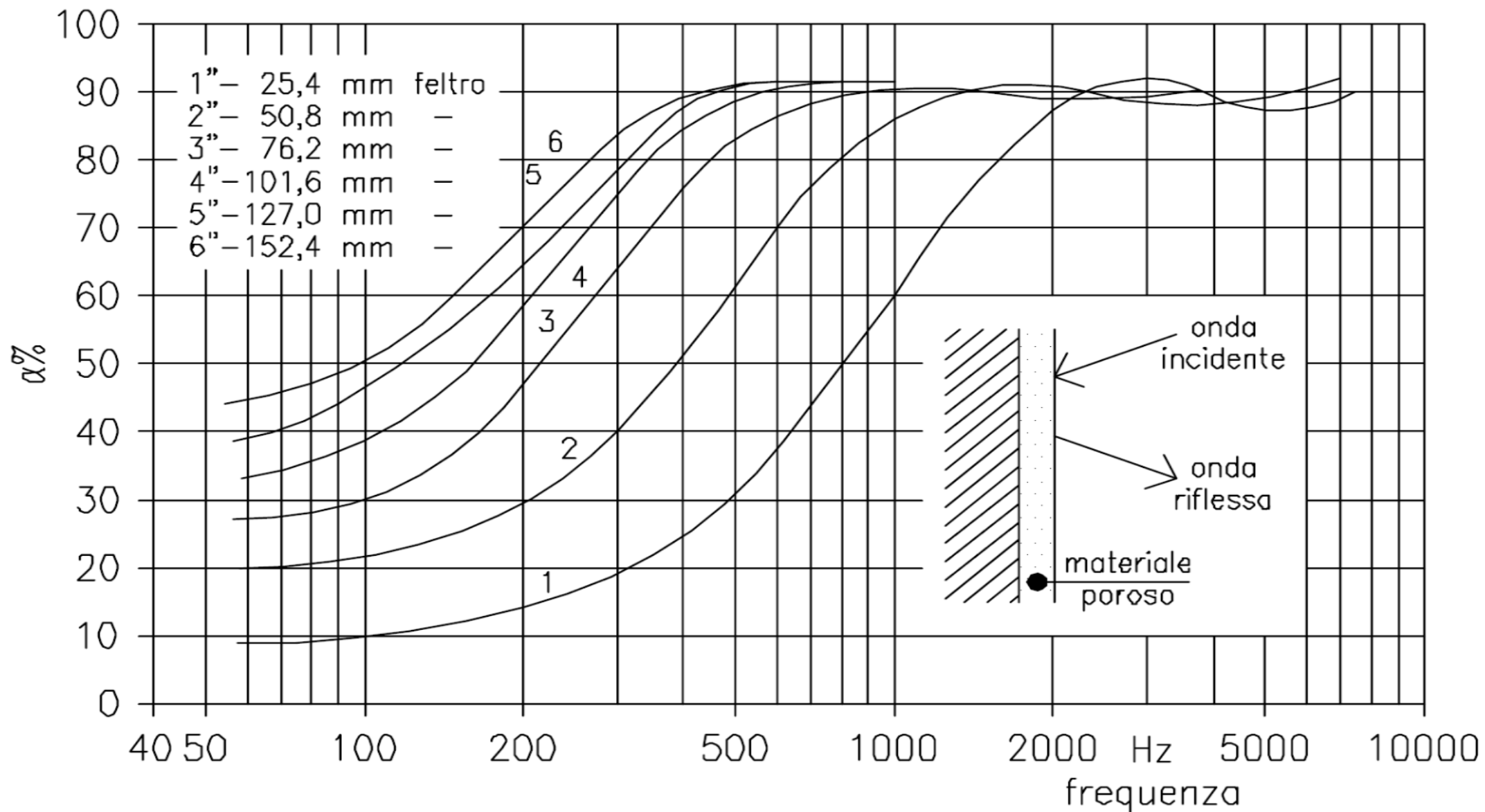
Le particelle di aria vibrano nei pori e canali di collegamento, perdendo energia per effetto dell'attrito contro le superfici esterne delle fibre.

In generale pori paralleli alla direzione di flusso implicano minore assorbimento



ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO

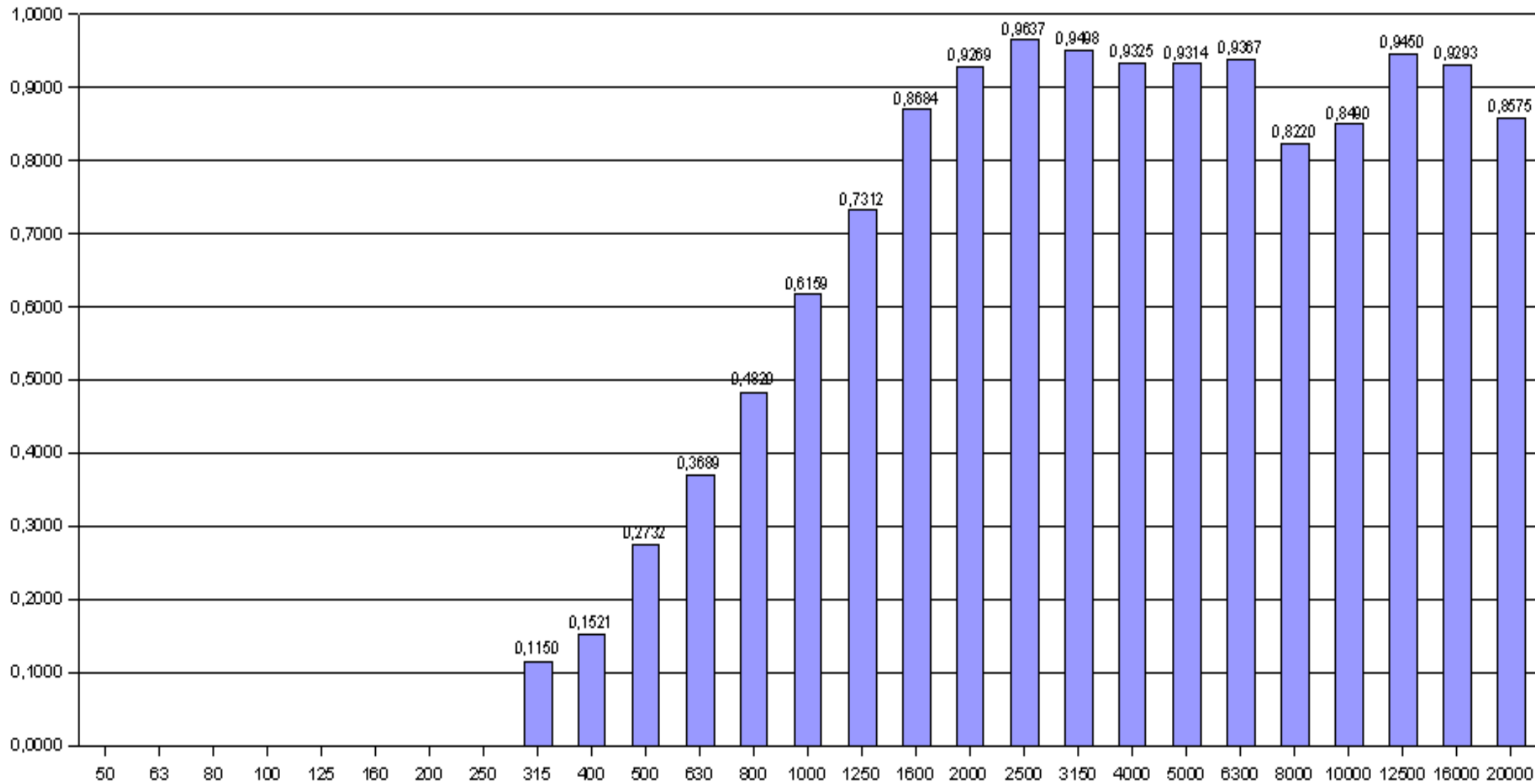
4 - Materiali fonoassorbenti porosi



Andamento del coefficiente di assorbimento α in funzione della frequenza e dello spessore del materiale



ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO
4 - Materiali fonoassorbenti porosi
Pag .204



Esempio di andamento del coefficiente di assorbimento α di un materiale poroso (bande di 1/3 d'ottava)



Descrizione	Frequenza (Hz)				
	250	500	1000	2000	4000
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 25 mm applicato a contatto con la parete	0.10	0.30	0.70	0.50	0.50
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 35 mm applicato a contatto con la parete	0.15	0.25	0.50	0.90	0.65
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 50 mm applicato a contatto con la parete	0.25	0.65	0.60	0.55	0.90
Pannello rigido in gesso rivestito, spessore 13 mm, con il 18% della superficie perforata, montato a 200 mm dal soffitto	0.75	0.78	0.64	0.60	0.58
Pannello rigido in gesso rivestito, spessore 13 mm, con il 18% della superficie perforata, montato a 58 mm dal soffitto	0.40	0.63	0.82	0.64	0.43
Linoleum	0.10	0.10	0.09	0.10	0.12
Moquette	0.05	0.10	0.20	0.40	0.81
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ spessore 13 mm	0.11	0.40	0.90	0.90	0.82
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ spessore 60 mm	0.30	0.62	0.90	0.99	0.98
Sedia di metallo	0.015	0.030	0.035	0.025	0.035
Sedia imbottita	0.23	0.37	0.27	0.25	0.25
Sughero	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
Tappeto pesante	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30
Tappeto sottile	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20

Valori del coefficiente di assorbimento α per alcuni materiali

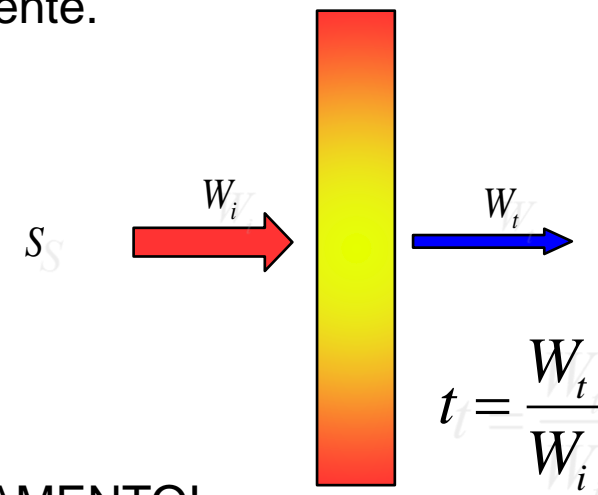
POTERE FONOISOLANTE

 $\alpha \rightarrow 1$ Materiale fonoassorbente $t \rightarrow 0$ Materiale fonoisolante

$$\alpha = a + t = 1 - r$$

In acustica edilizia, oltre al cosiddetto coefficiente di assorbimento acustico apparente α , che rappresenta la parte di energia non riflessa, è in uso il **potere fonoisolante R**, che indica la capacità di isolamento di un ambiente ricevente da un ambiente sorgente.

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad (\text{dB})$$



Attenzione a non confondere FONOASSORBIMENTO e FONOISOLAMENTO!

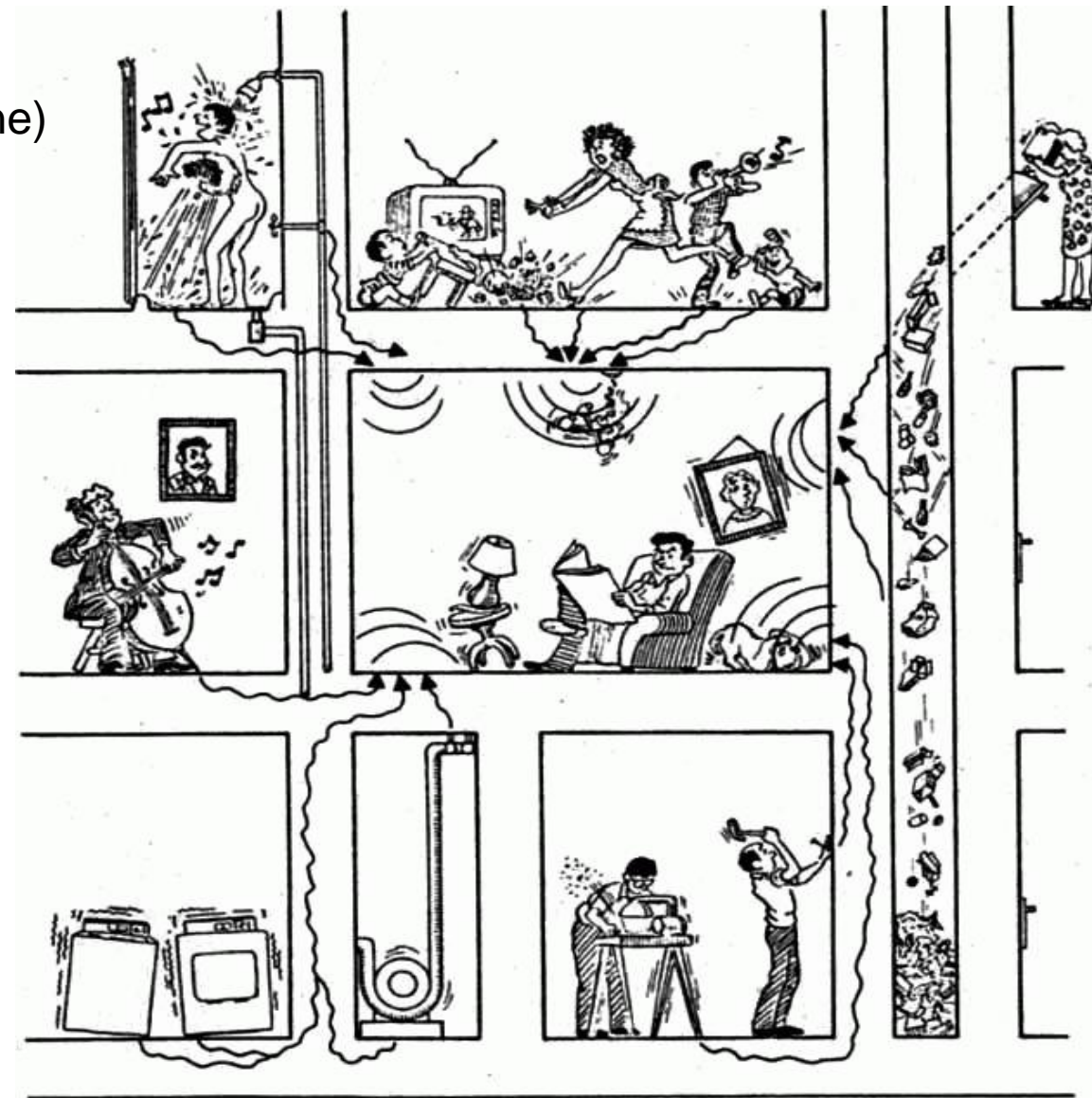
Materiali con migliore fonoassorbimento: bassa massa, alta porosità (es: pannello di lana di roccia)

Materiali con migliore fonoisolamento: massa elevata, non porosi e rigidi (es. muro di calcestruzzo)

In un edificio il rumore si propaga:

- per via aerea (l'aria è il mezzo di trasmissione) e si attenua nella propagazione per divergenza geometrica e per altre cause secondarie.
- per via strutturale (gli elementi strutturali dell'edificio, ovvero le pareti e i solai, sono il mezzo di trasmissione).
Questi elementi vibrando diventano sorgenti e fanno sì che il disturbo si propaghi anche a grandi distanze.

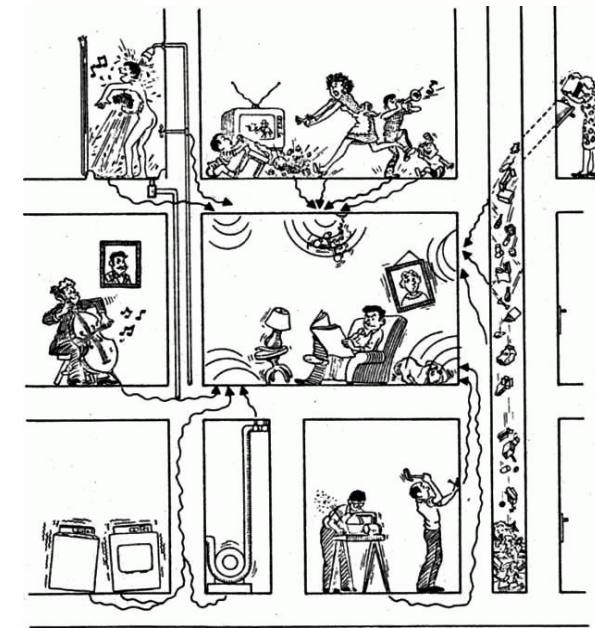
Anche gli impianti (es. tubi del riscaldamento) sono un mezzo di trasmissione del rumore a grandi distanze negli edifici.



Il **potere fonoisolante** dipende:

- dalla frequenza del suono incidente
- dalle proprietà fisiche del materiale (massa, rigidità, smorzamento)
- dalle proprietà geometriche della parete

Considerando un caso reale, il parametro **potere fonoisolante R** non tiene conto di una serie di problematiche: la parete che separa due ambienti non è l'unica via di passaggio del suono e l'ambiente ricevente ha una sua reazione acustica che modifica il livello sonoro percepito. R quindi, nella definizione fornita, è un indicatore del grado di isolamento tra due ambienti, ma l'isolamento acustico in un caso reale andrà studiato e affrontato tenendo conto anche di altre problematiche.



Considerando che una parete costituita di materiale omogeneo e isotropo, priva di incastri al bordo e priva di reazione alle sollecitazioni, il campo sonoro costituito solo da onde piane, si giunge ad una relazione, nota come **legge di massa**:

$$R = 10 \log \left[\left(\frac{m \cdot f \cdot \pi \cdot \cos \theta}{\rho_0 c} \right)^2 \right] \quad (\text{dB})$$

dove m è la massa superficiale (kg/m^2), f la frequenza (Hz), θ l'angolo di incidenza e $\rho_0 c$ l'impedenza acustica caratteristica dell'aria.



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

***49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)***

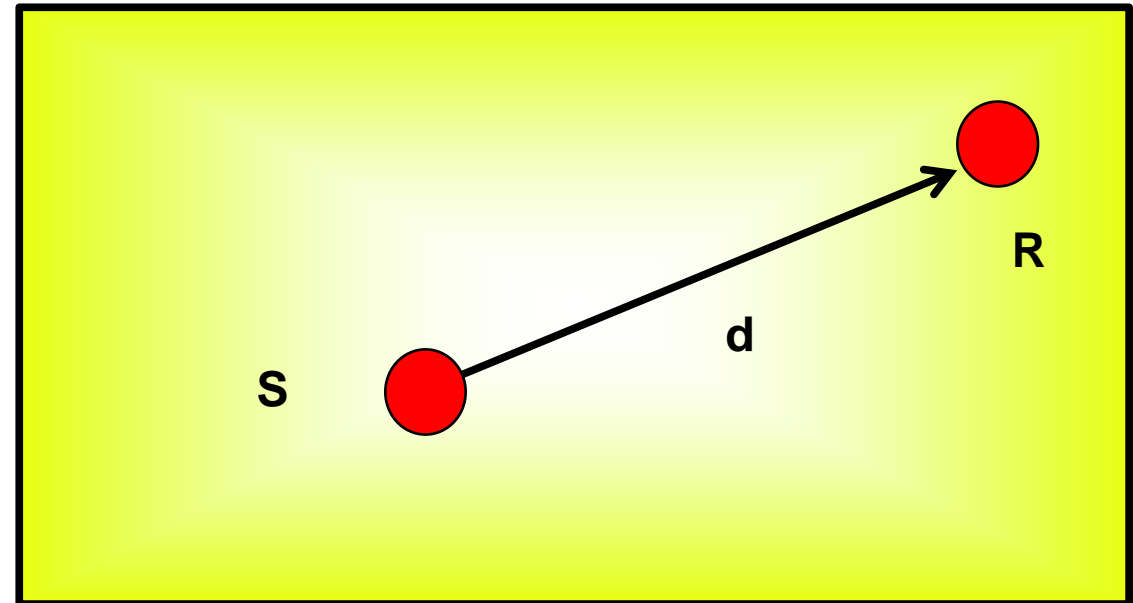
Dispensa n. 7

ACUSTICA DEGLI AMBIENTI CHIUSI

Docente: Paolo Guidorzi

IL CAMPO ACUSTICO RIVERBERANTE

Studiamo ora come si forma il campo sonoro in un ambiente chiuso. Supponiamo che in un ambiente chiuso dall'istante t_0 una sorgente sonora S cominci ad emettere un suono con potenza sonora costante W_0 . Nello stesso ambiente sia presente un ricevitore R posto a una distanza d dalla sorgente.

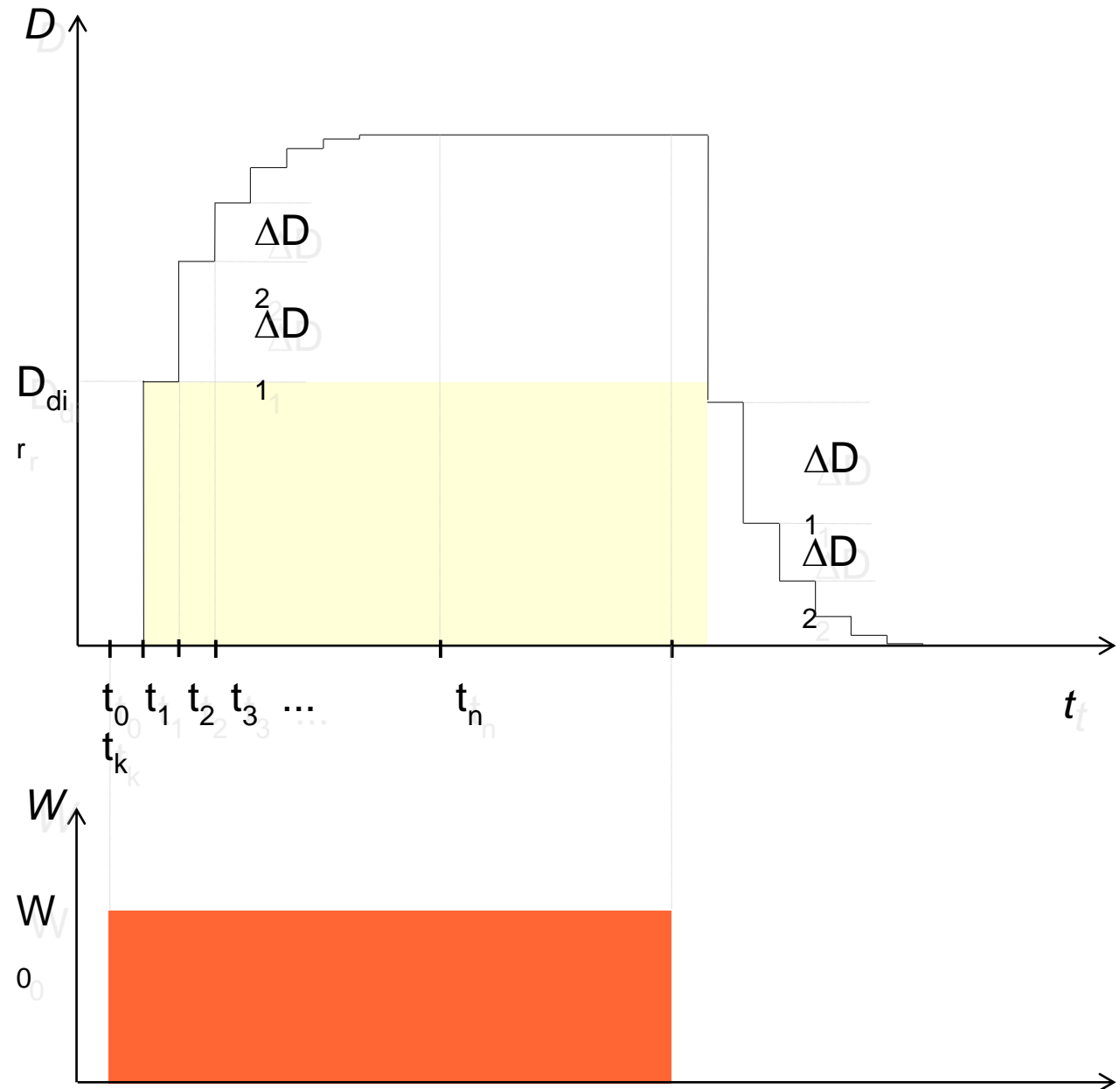


All'istante t_0 al ricevitore ancora non è giunto alcun suono. Il primo istante di arrivo corrisponde al tempo $t_1 = t_0 + \frac{d}{c}$

dove c è la velocità del suono e d la distanza sorgente-ricevitore. All'istante t_1 al ricevitore sarà presente una densità di energia sonora D_{dir} dovuta al solo campo acustico diretto. Successivamente al ricevitore arriveranno anche i **contributi dovuti alle riflessioni** del suono sulle pareti. Esse arriveranno in istanti successivi a causa del più lungo cammino percorso e più attenuate a causa della divergenza geometrica e dell'assorbimento delle pareti.

Nel grafico qui a fianco si può vedere uno schema dell'andamento della densità di energia acustica e l'incremento dovuto alle riflessioni successive.

Si supponga ora di spegnere la sorgente S al tempo t_k . Si avrà il fenomeno inverso: la densità sonora rimarrà costante ancora per un tempo d/c poi si comincerà ad avere un decremento prima delle onde che hanno subito 1 riflessione, poi 2, 3.. n fino al valore zero della densità sonora.



Il fenomeno appena descritto nella realtà è molto più complesso, a causa delle seguenti ragioni:

- le pareti non sono riflettori perfetti, si hanno **fenomeni diffusivi**
- si hanno **fenomeni di risonanza** coi modi propri di vibrazione della stanza

In ogni caso, si può dire che:

- la **densità di energia sonora** in un ambiente chiuso è **maggiore** di quella che si avrebbe in campo libero per la stessa sorgente
- all'accensione della sorgente la densità di energia sonora in un ambiente chiuso non raggiunge istantaneamente il valore massimo, ma raggiunge il valore di regime impiegando un certo tempo, detto **transitorio iniziale**
- allo spegnimento della sorgente la densità di energia sonora in un ambiente chiuso non si annulla istantaneamente, ma impiega un certo tempo, detto **transitorio di estinzione**, o **coda sonora**.

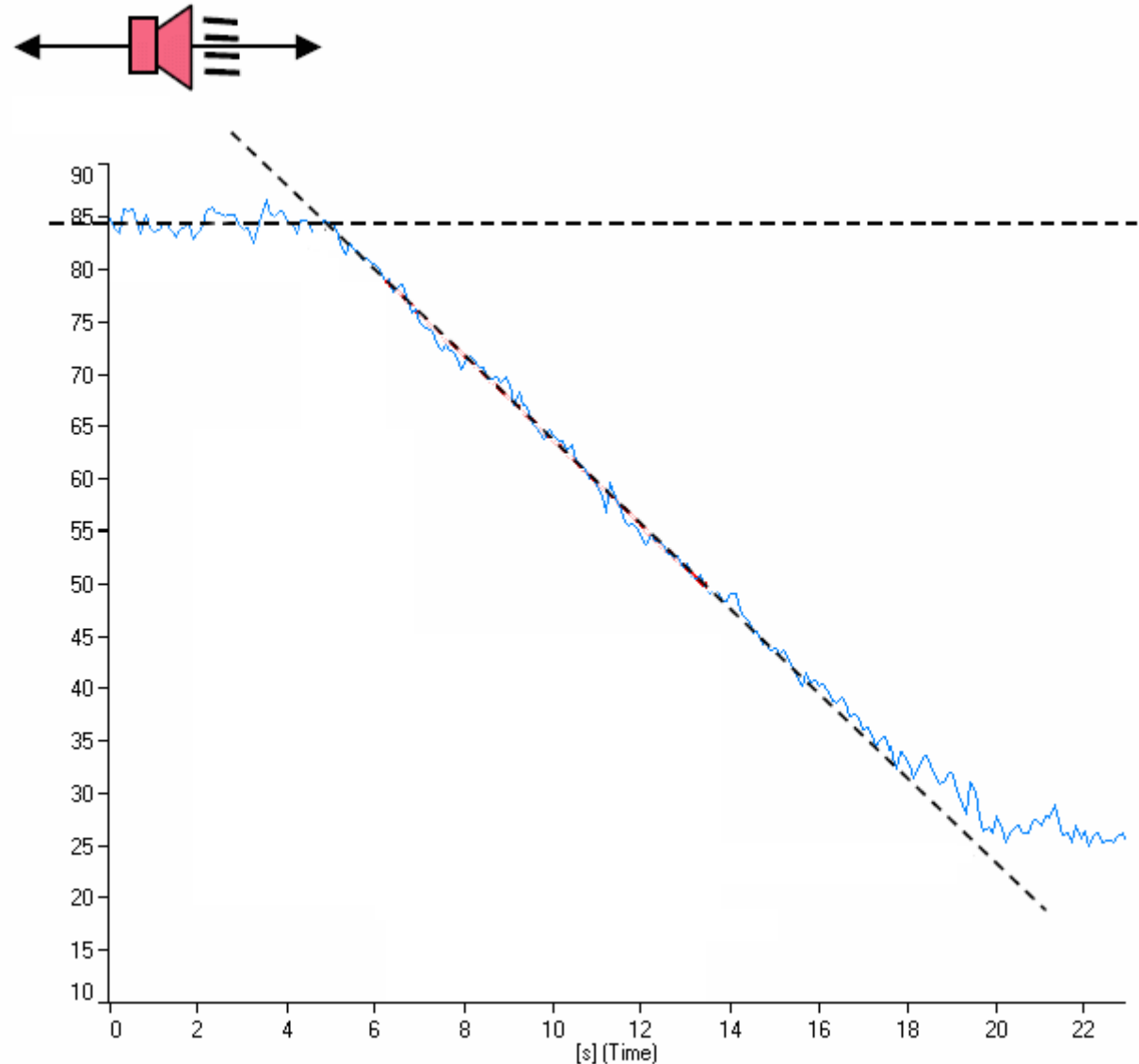
LA CODA SONORA

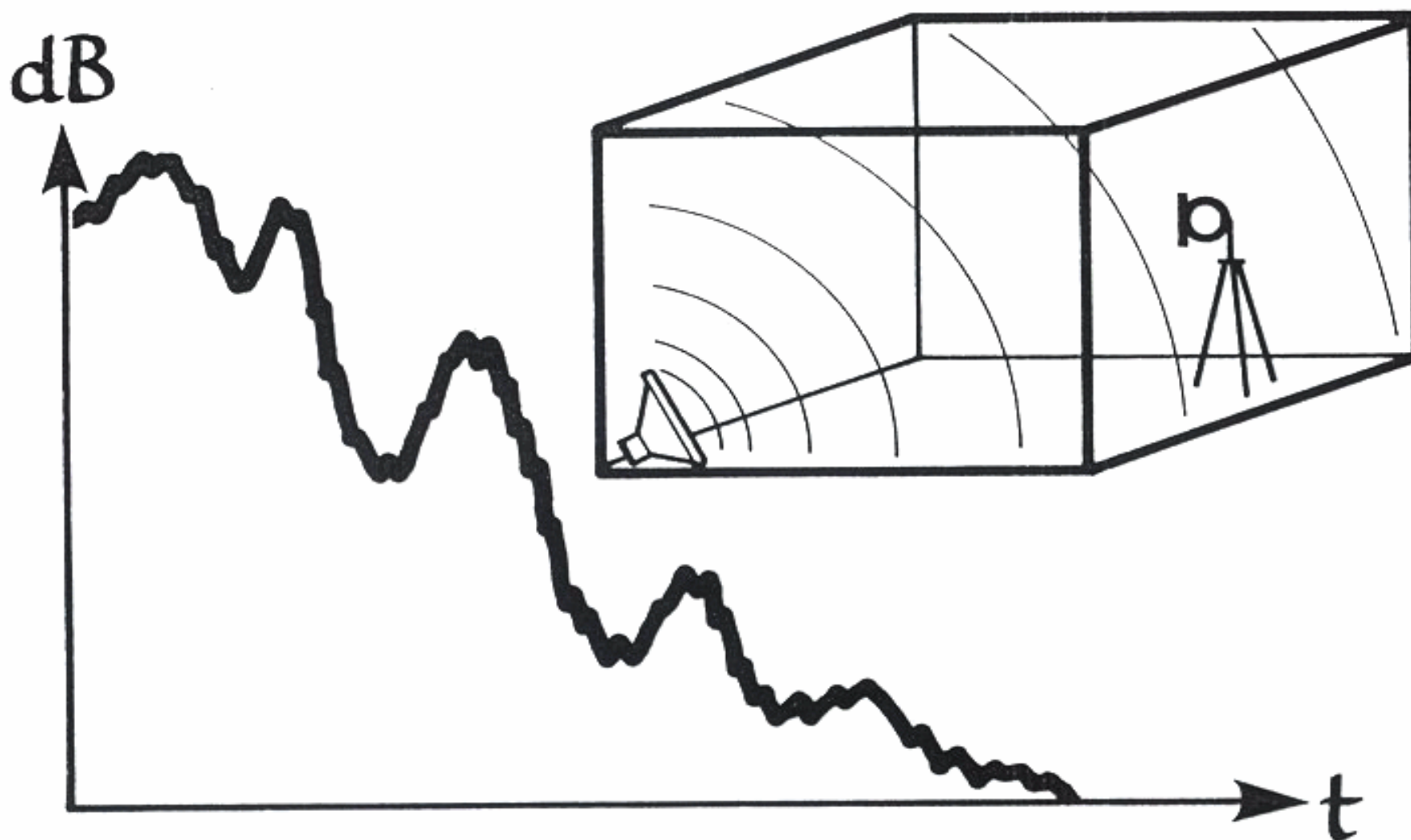
Il fenomeno del **decadimento**, riportando in un grafico semi-logaritmico il **livello sonoro** all'interno dell'ambiente, appare quasi lineare, come si può vedere nel grafico a fianco.

Questo andamento lineare però si ottiene solo in condizioni ideali, quando cioè una serie di condizioni (che saranno spiegate meglio in seguito) sono rispettate.

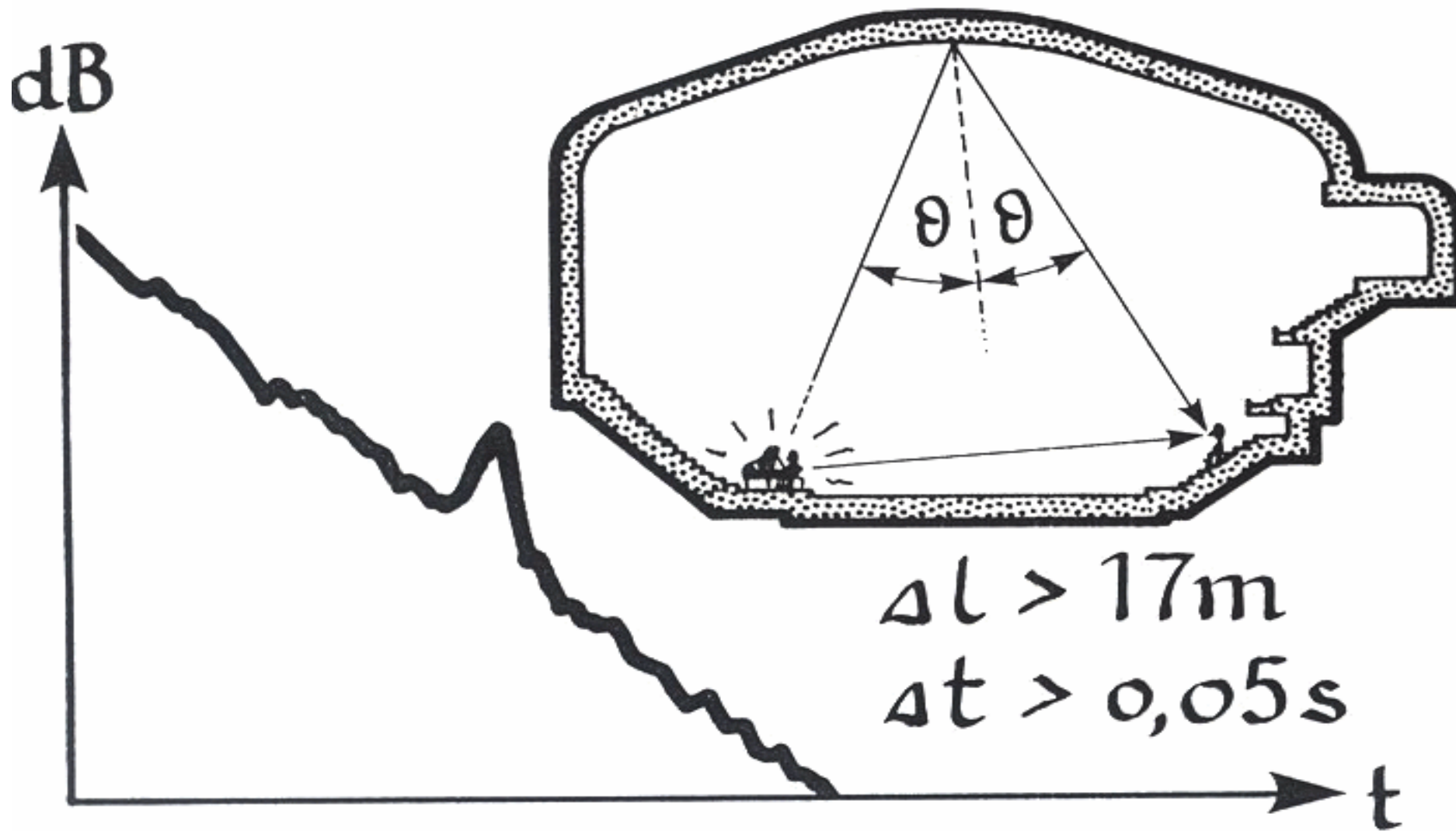
Un allontanamento dal decadimento lineare indica una disuniformità del campo sonoro, dovuta perlopiù alla forma geometrica dell'ambiente.

Tra breve andremo ad analizzare analiticamente il fenomeno della coda sonora.

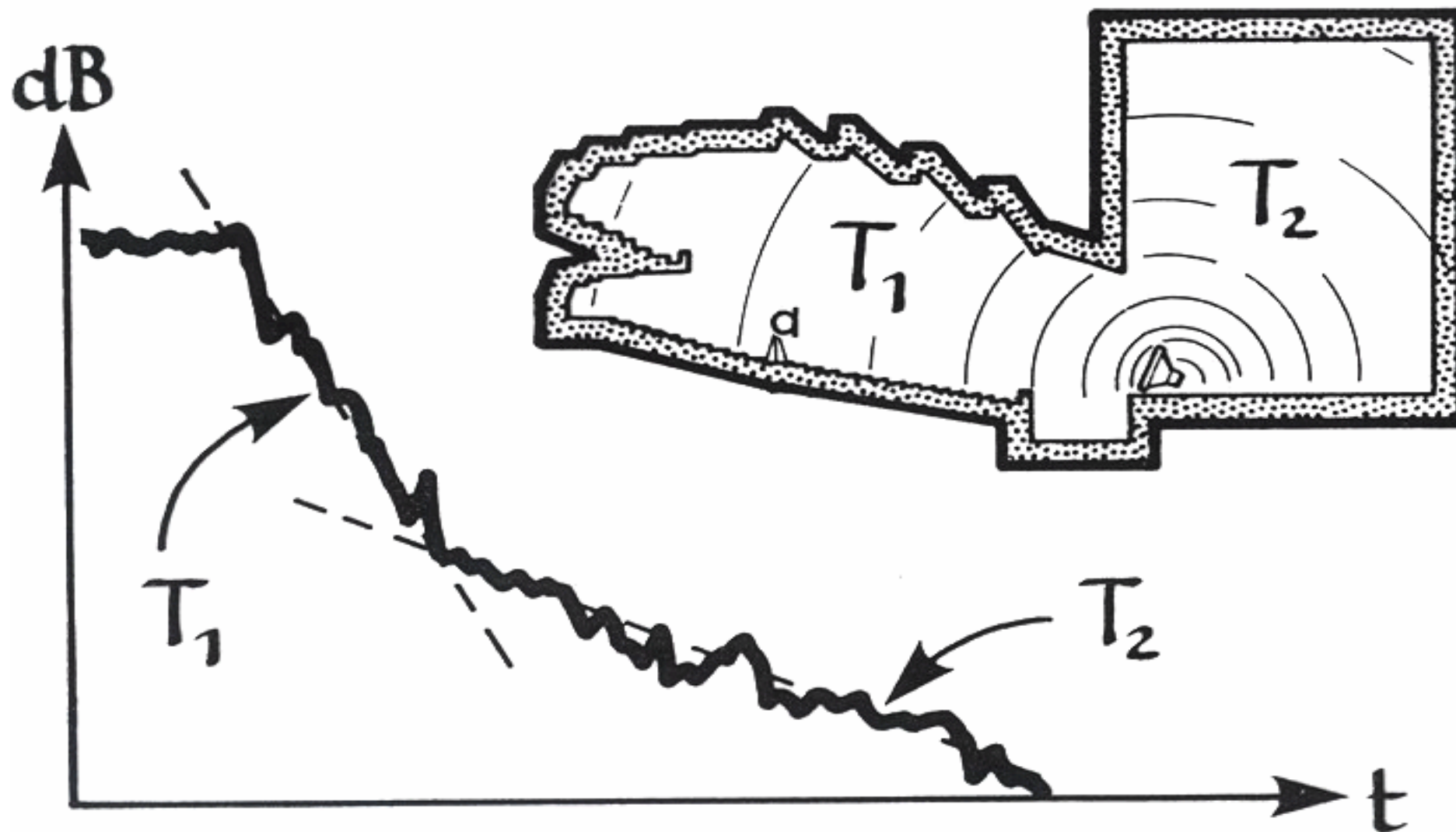




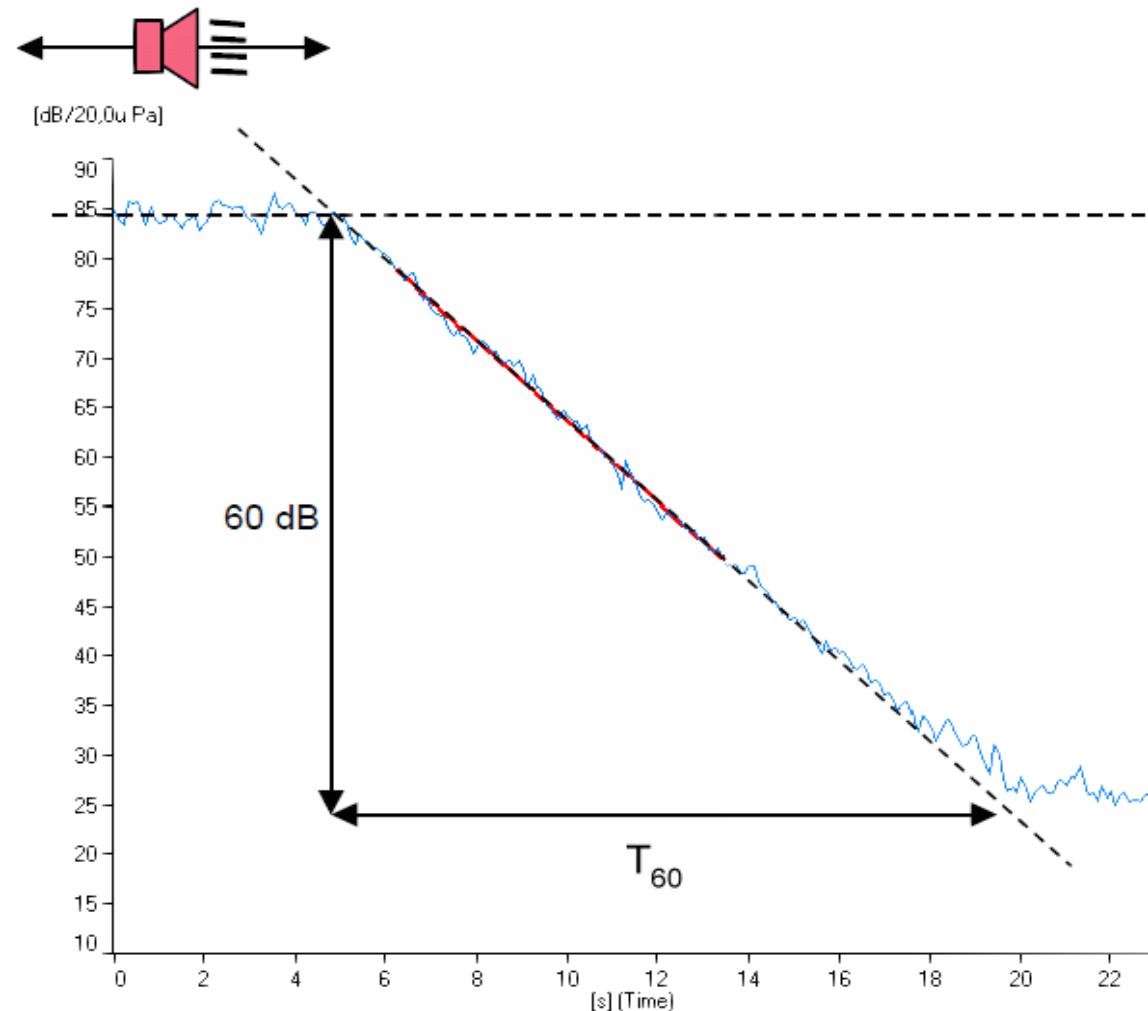
In questo esempio si ha un decadimento non lineare dovuto alla presenza di onde stazionarie, le quali si creano a causa delle pareti piane e parallele dell'ambiente.



In questo esempio si hanno fenomeni di focalizzazione.



In questo esempio si hanno due ambienti separati, parzialmente accoppiati, e di conseguenza due diversi tratti di decadimento, a diverse pendenze.



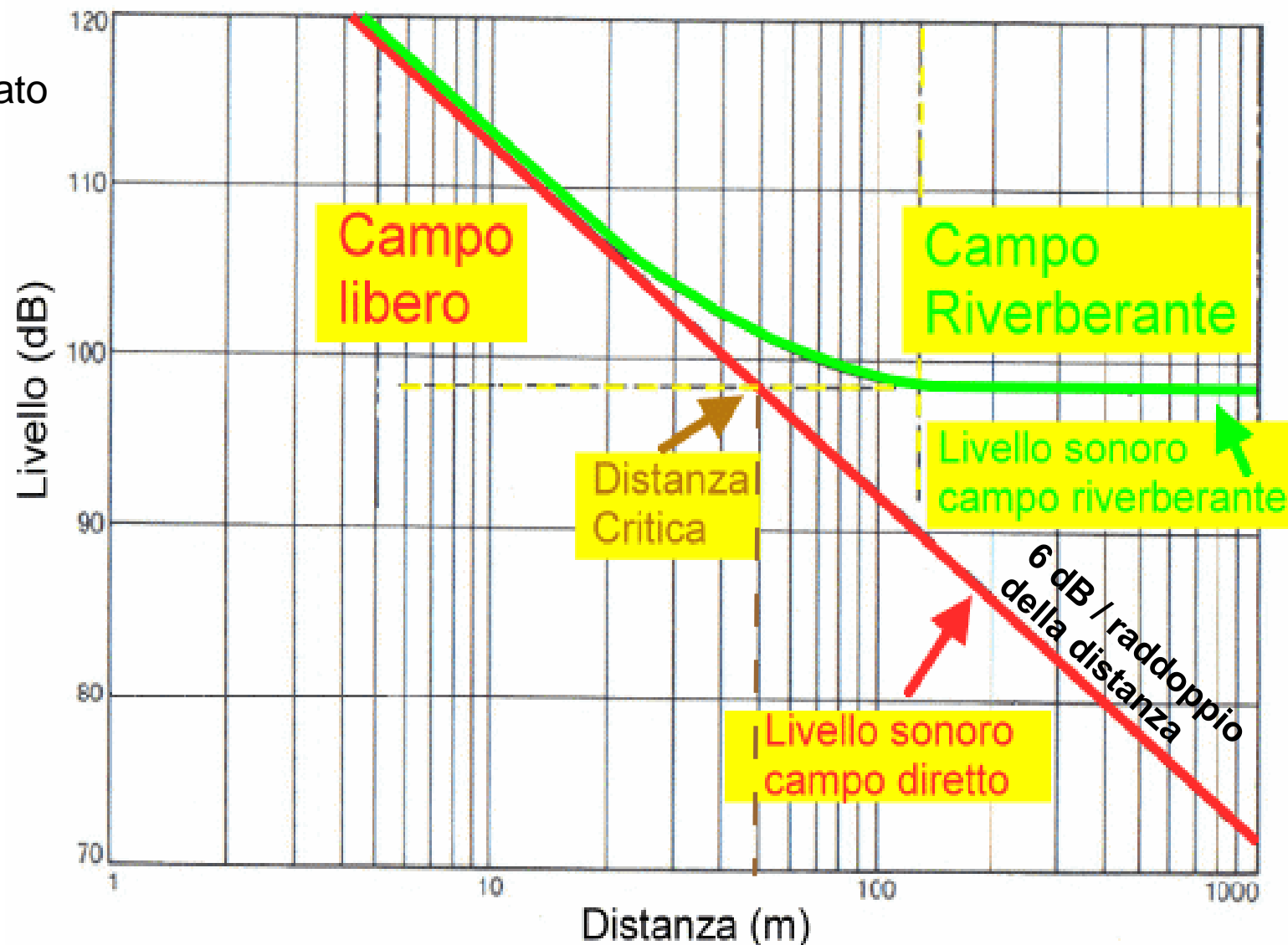
Con le precedenti ipotesi possiamo ora quantificare il tempo che impiega la coda sonora a decadere. Si definisce il **tempo di riverberazione** T_{60} come il tempo che impiega la densità acustica a diminuire di 10^6 volte, oppure, in modo analogo, il tempo che il livello sonoro all'interno dell'ambiente impiega a decadere di 60 dB, dopo che la sorgente viene spenta.

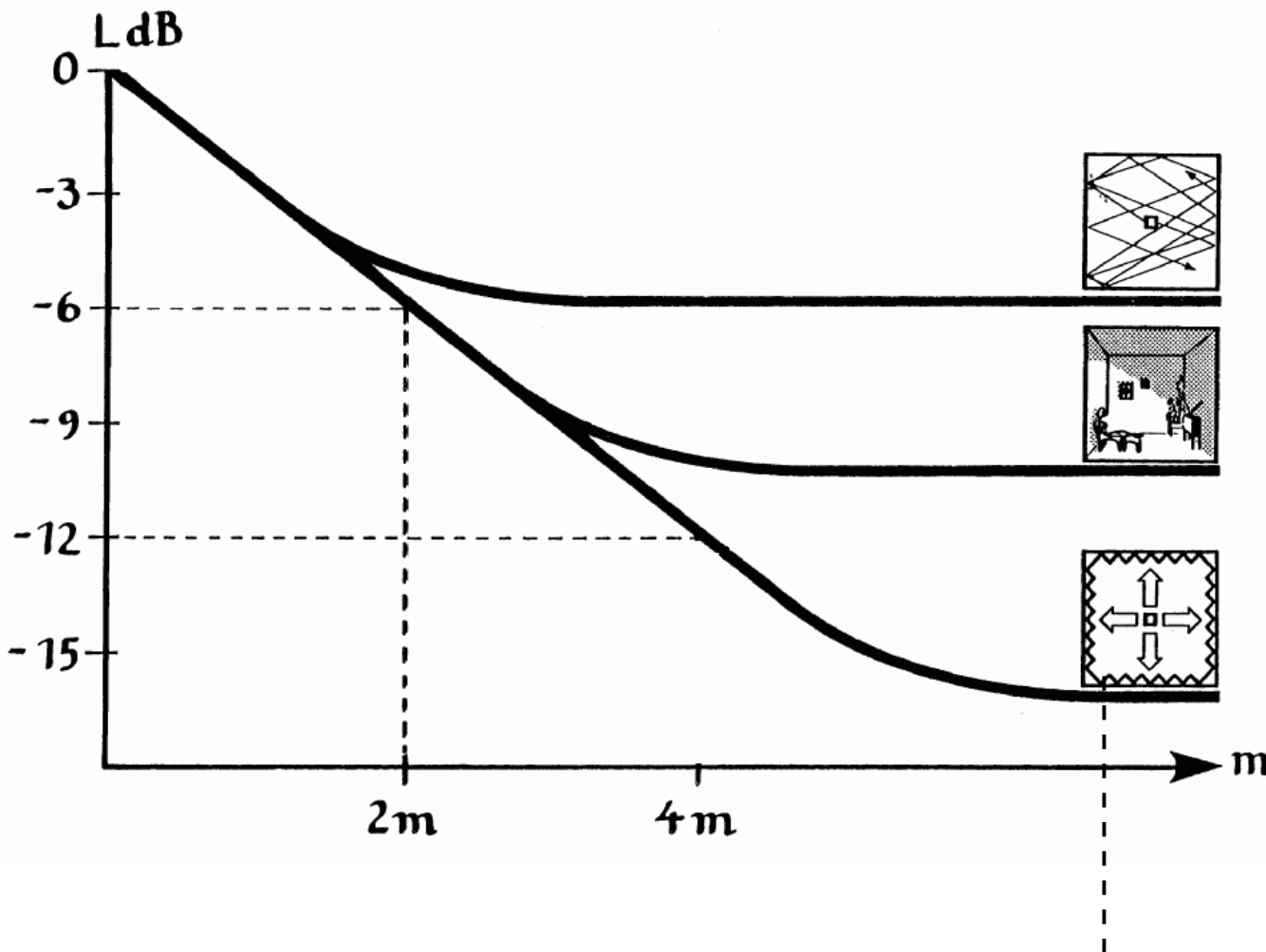
Questo grafico (linea verde) mostra il **livello del campo semi-riverberante L_D** , generato per valori fissati di volume, superficie e assorbimento di un certo ambiente.

La **linea rossa** rappresenta il caso limite di **campo libero** (cioè se non si avesse alcuna riverberazione, oppure se si considera il solo primo termine della formula).

La **linea verde**, nel tratto orizzontale, mostra il livello che si ha quando è presente solo **campo riverberante**, cioè quando si è a una distanza dalla sorgente tale che il livello del campo diretto diventi trascurabile rispetto a quello riverberante.

E' evidenziato un punto, posto alla cosiddetta **distanza critica**, tale che i livelli del campo diretto e di quello riverberante assumono lo stesso valore.





FORMULA DI SABINE

la costante 0,163 non è adimensionale!

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A}$$

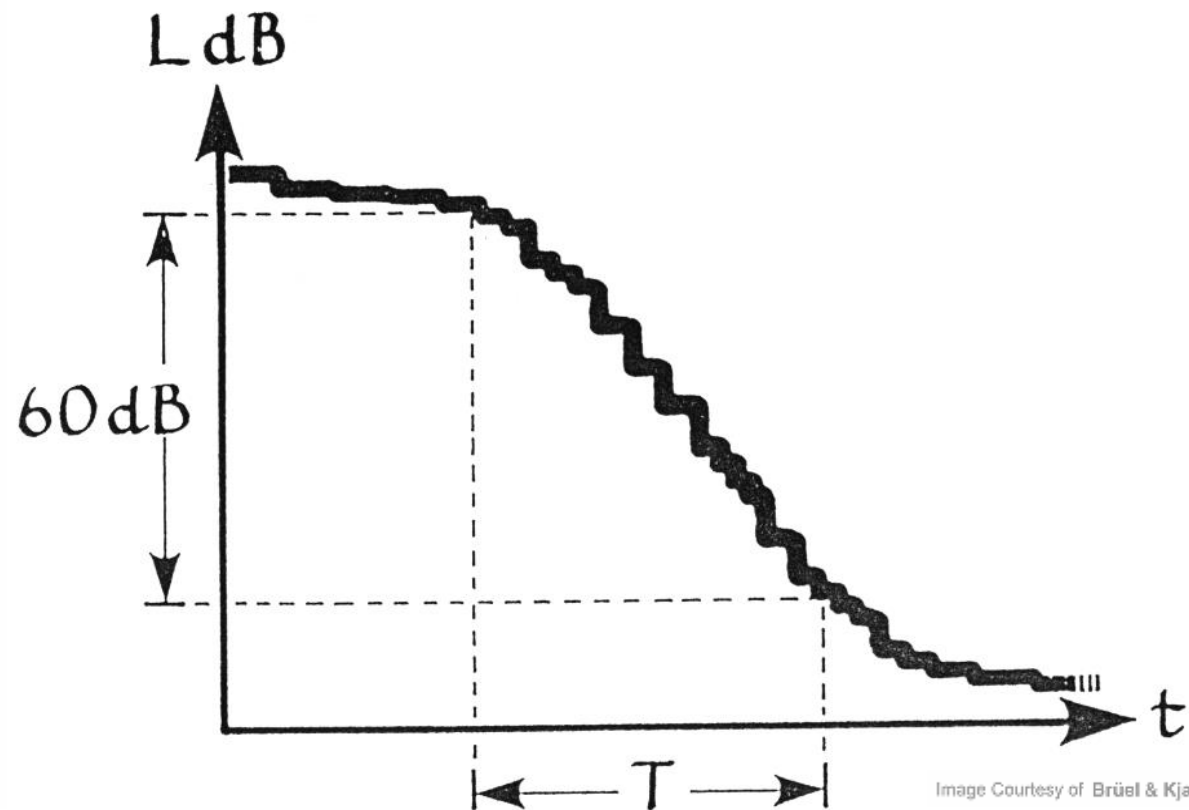
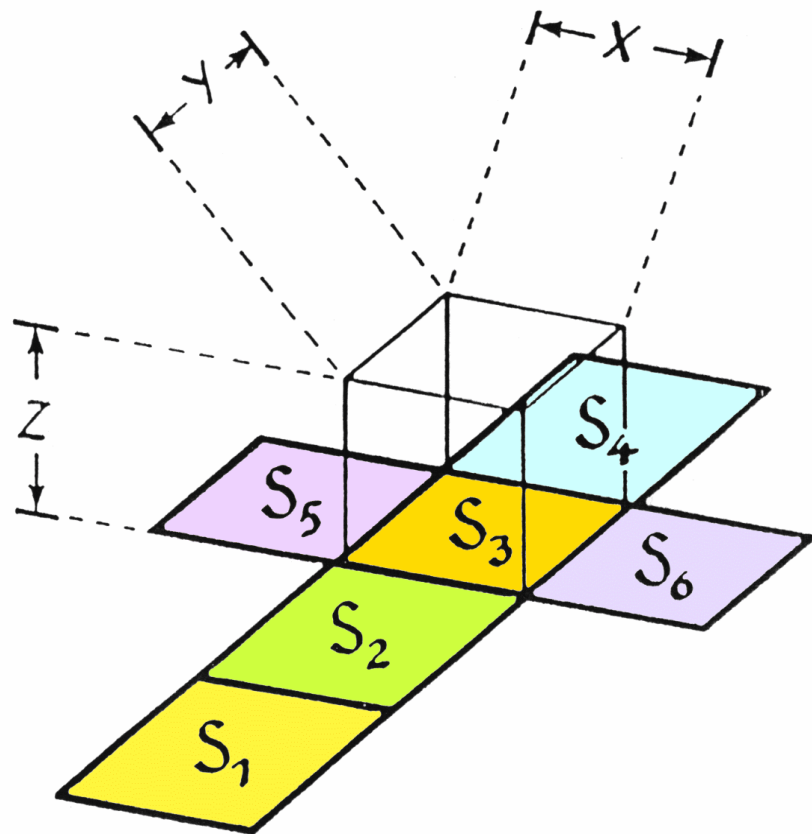
In questo grafico si può vedere l'andamento del livello sonoro misurato **in funzione della distanza dalla sorgente** per un **campo perfettamente riverberante**, un **campo semi-riverberante** e un **campo anecoico**.

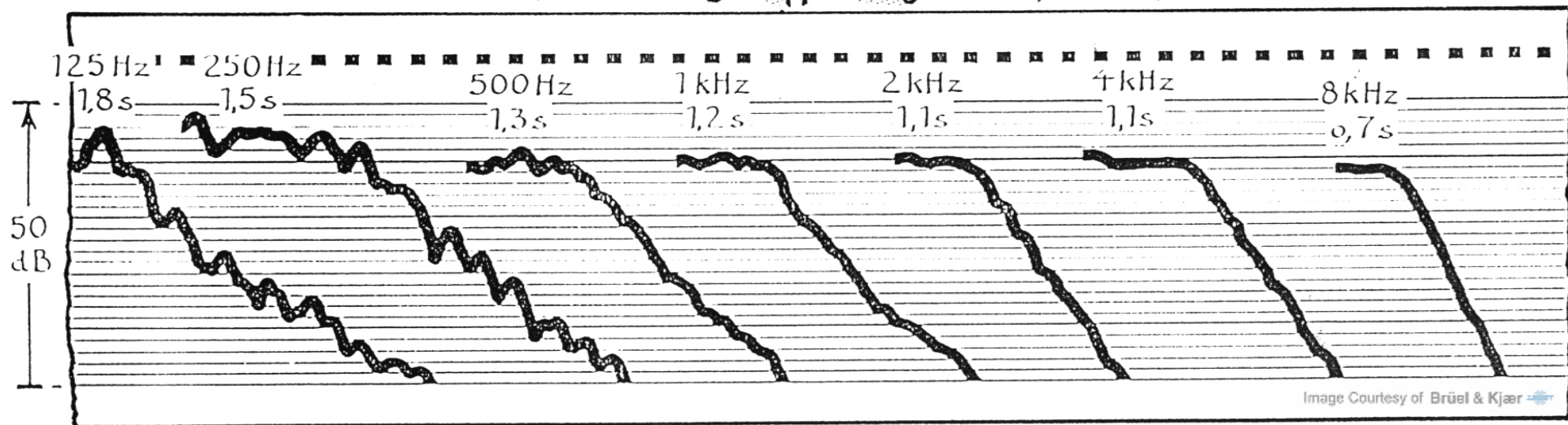
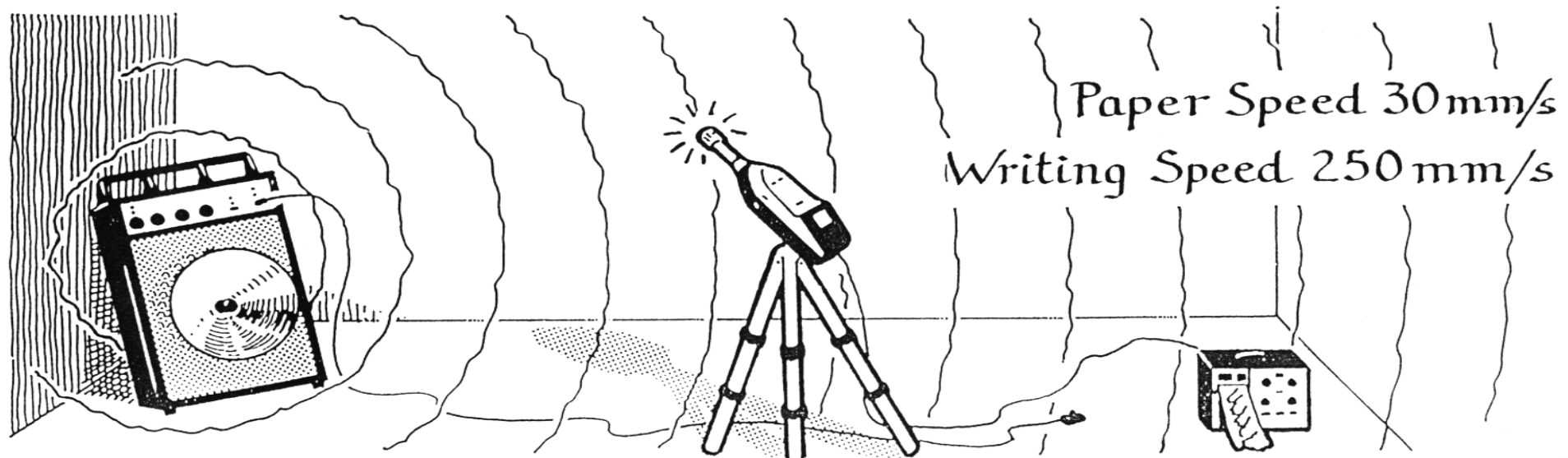
$$V = X \cdot Y \cdot Z$$

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_6 S_6$$

Sabine

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{A}$$





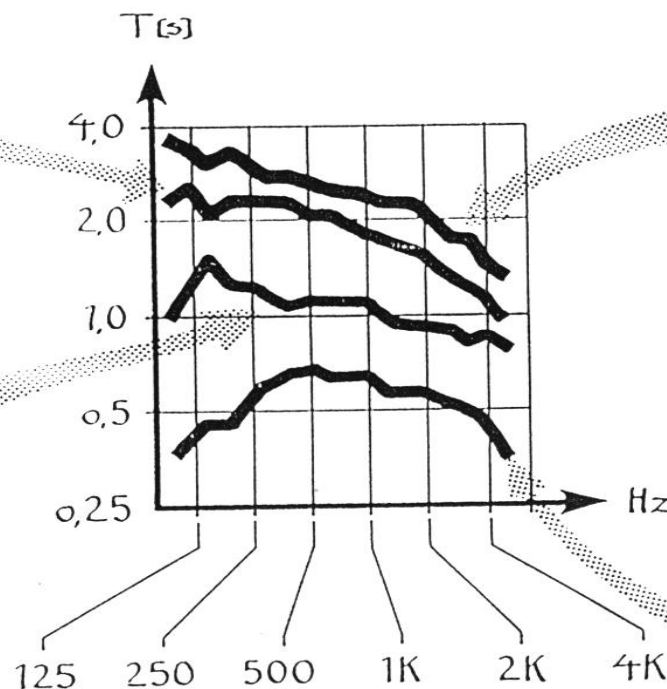
Il tempo di riverberazione varia **frequenza per frequenza**. In figura è mostrato l'andamento della coda sonora filtrato in bande d'ottava. La figura si riferisce agli *antichi* strumenti di misura che misuravano il tempo di decadimento per via analogica mentre oggi questa misura è effettuata per via digitale.

1290 m³

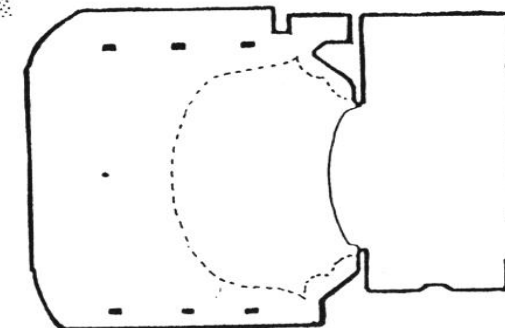
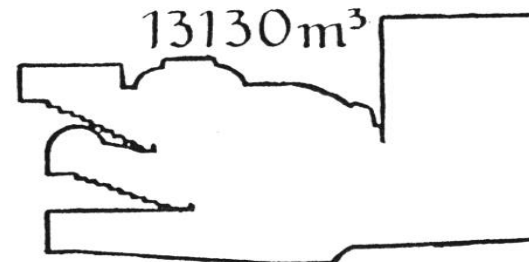


230 m³

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A}$$



13130 m³



60 m³

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Esempi di valore del tempo di riverberazione, per vari ambienti, in bande di ottava.

La misura di T_{60} filtrata in bande di ottava o 1/3 di ottava si può ottenere o filtrando la coda di decadimento misurata in banda larga (che cioè contiene le informazioni su tutto lo spettro di interesse) oppure effettuando le misure con una sorgente contenente solo le frequenze della banda di interesse.

LA QUALITA' DELLE SALE

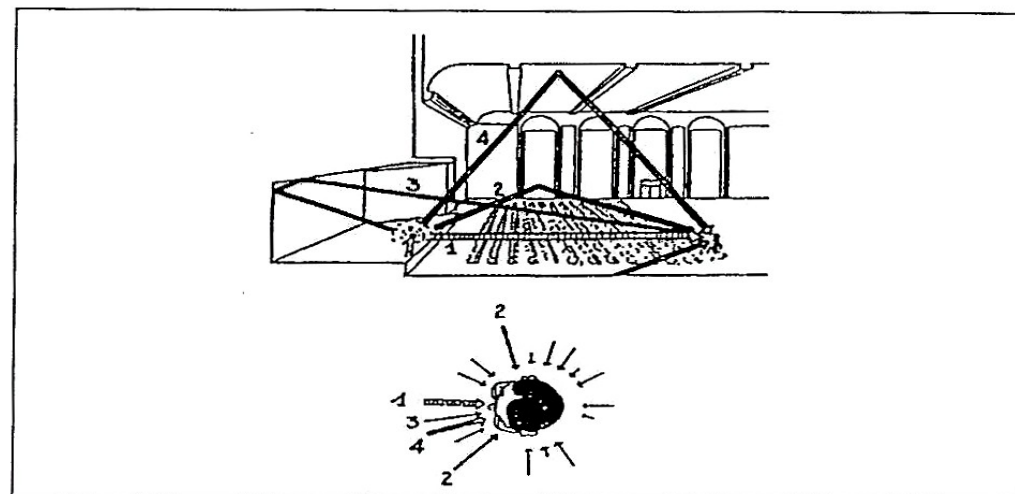
- La risposta impulsiva di un ambiente chiuso fornisce tutte le informazioni necessarie allo studio della qualità dell'ambiente stesso

- Prima dell'avvento dei computer e degli analizzatori digitali, la misura della risposta impulsiva si effettuava in modo "analogico", ma era difficile se non impossibile una sua successiva analisi

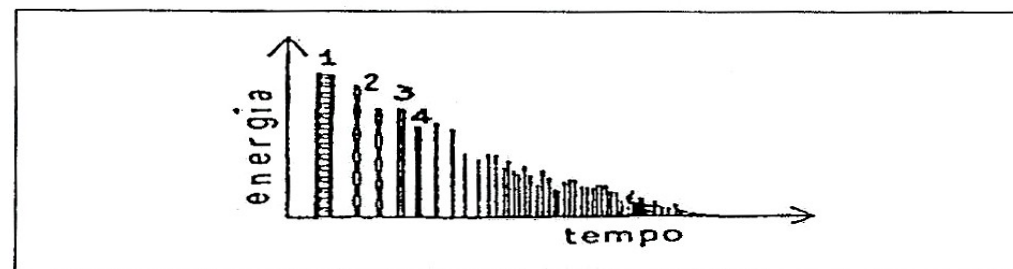
- La misura consiste nell'eccitazione dell'intero ambiente chiuso con un opportuno segnale, e la sua registrazione in una determinata posizione. L'ambiente agisce quindi come filtro del segnale emesso.

- Nell'era analogica come mezzo di eccitazione si usava una fonte impulsiva come lo scoppio di un pallone o un colpo di pistola (a salve!). Tali sorgenti sono però poco ripetibili.

- Dall'era digitale in poi, per la misura si utilizza una sorgente di rumore bianco o rosa, o più recentemente mezzi ancora più sofisticati come il segnale MLS o lo sweep. Con opportune elaborazioni si ricava quindi la risposta impulsiva, che, in via teorica, ci dice come l'ambiente risponde a un impulso di lunghezza infinitesima.



Raggi sonori in una sala e distribuzione direzionale dell'energia.



Ecogramma energetico nella posizione dell'ascoltatore.

