



*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

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

## ***Programma del corso***

Pag. 2

### **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.

### **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  $L_{eq}$  e il SEL.

### **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.

(continua →)

## *Programma del corso*

Pag. 3

### **4. Microfoni e fonometri. Misura dell'intensità sonora**

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

### **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.

### **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.

(continua →)

## *Programma del corso*

Pag. 4

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.

### **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.

### **8. Cenni di illuminotecnica**

La propagazione della luce. Le grandezze fotometriche. Il flusso luminoso. L'intensità luminosa. La luminanza. L'illuminamento. La radianza. Superfici isotrope e lambertiane.

## Course content

### 1. *Physical acoustics*

The sound phenomenon. Main acoustics quantities. Speed of sound through an elastic medium. Plane, spherical, cylindrical, stationary waves.

### 2. *Sound levels, decibel*

Decibel scale. Sum and subtraction of dB levels. Power, intensity and sound density levels. Sound power measurement. Leq, SEL.

### 3. *Frequency analysis. The human hearing system*

Frequency analysis. 1/1, 1/3 octave filters. IEC1260 bands. The human hearing system. Equal loudness contour curves. A weighting.

### 4. *Microphones e Sound Level Meters. Sound Intensity Measurement*

The Sound Level Meter. The condenser microphone. Sound Intensity Measurement. The Fourier transform. Convolution. The delta of Dirac. Linear Stationary Systems. Impulse response and Frequency Response.

(continue →)

## Course content

### 5. *Sound in free space*

Sound propagation in free space. Sound sources. Source directivity. Air absorption. Acoustic barriers. Maekawa method.

### 6. *Sound absorption and transmission*

Absorption coefficient. Sound absorbing materials. Porous materials. Helmholtz resonator. Perforated planes. Sound absorption measurement: standing wave tube, reverberant chamber, reflection method. Sound insulation index. Mass law.

### 7. *Building acoustics.*

Room acoustics theory. Sabine, Norris-Eyring and Millington-Sette reverberation time formulas. ISO 3382 acoustical parameters.

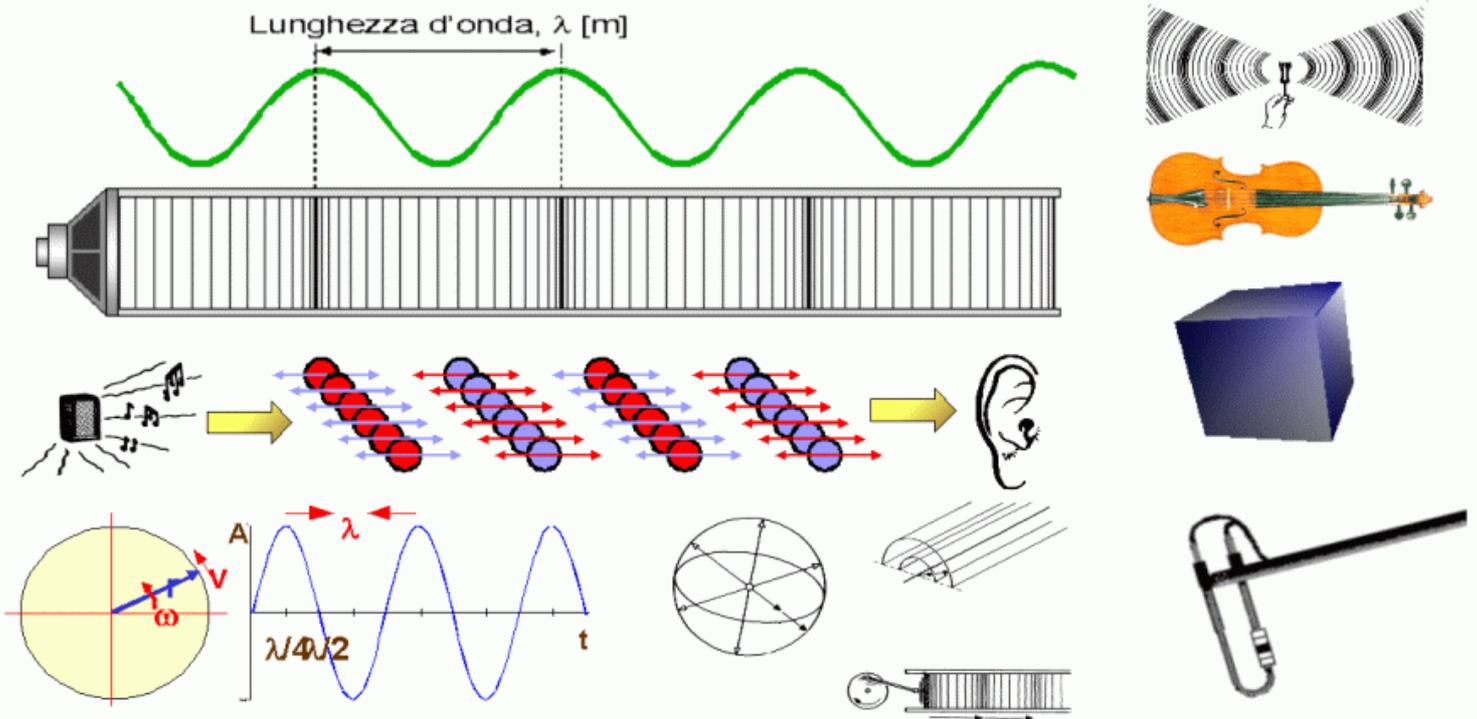
### 8. *Lighting technique traces*

Photometry and the human eye. Luminous flux. Luminous intensity. Luminance. Illuminance. Luminous emittance.

# Obiettivi del corso

## 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.

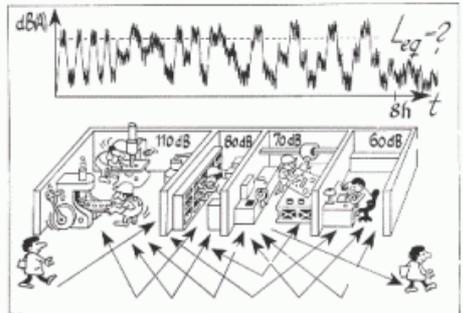
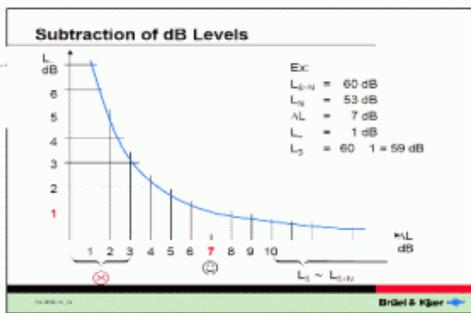
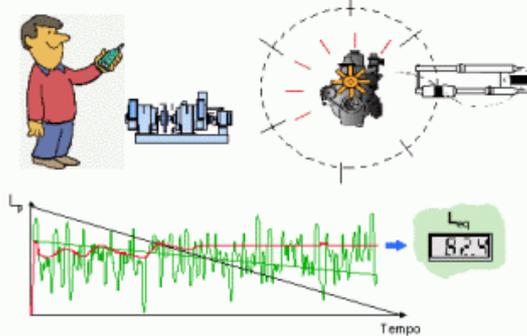
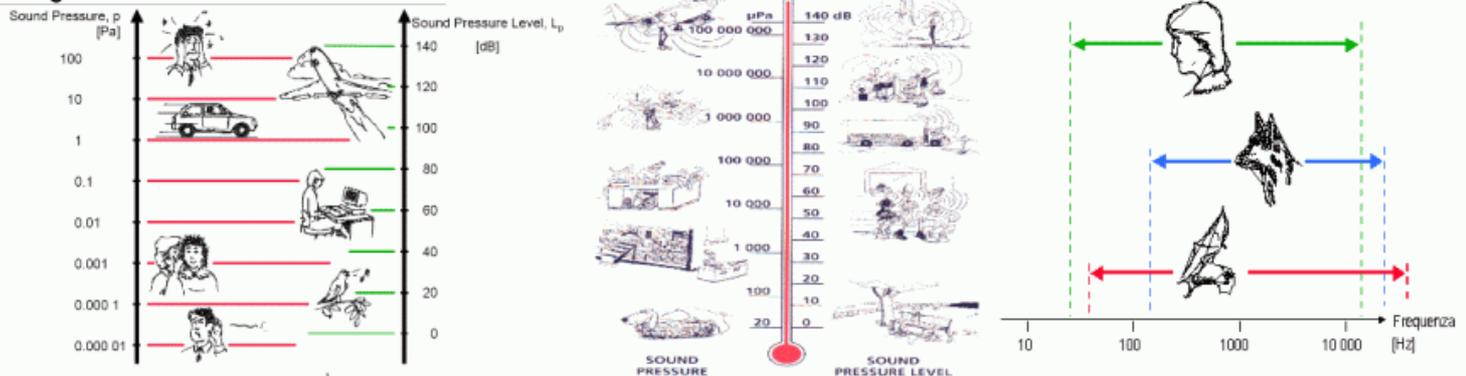


# Obiettivi del corso

## 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.

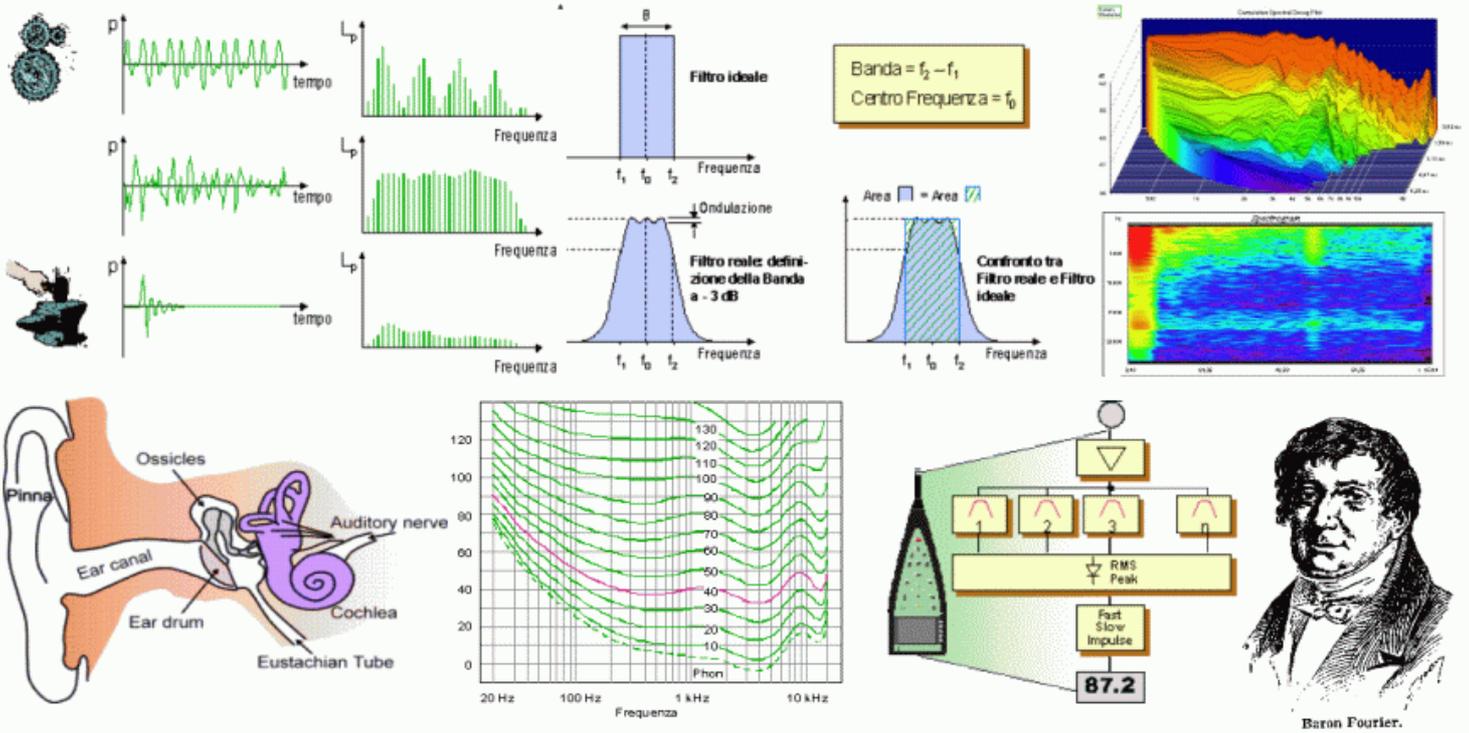
### Range of Sound Pressure Levels



# Obiettivi del corso

## 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.

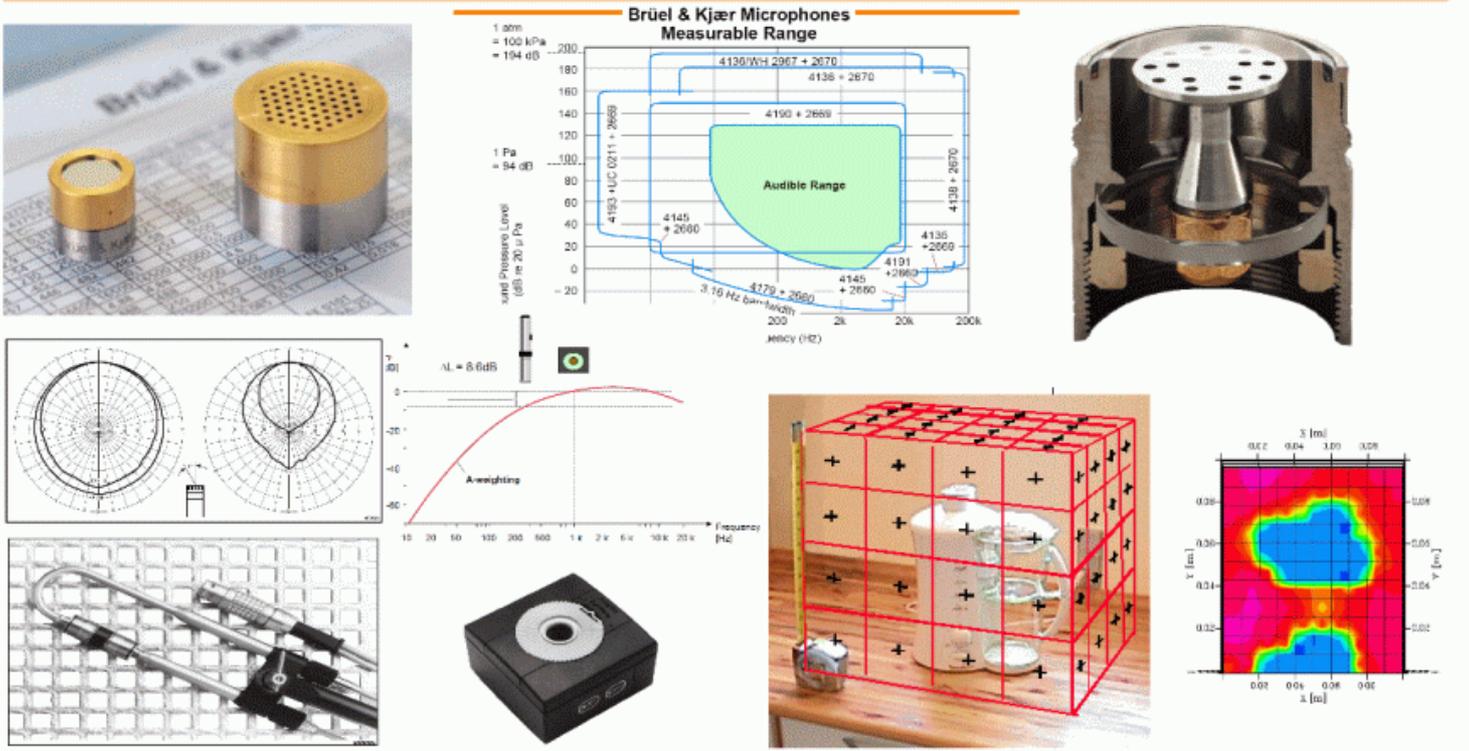


Baron Fourier.

# Obiettivi del corso

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

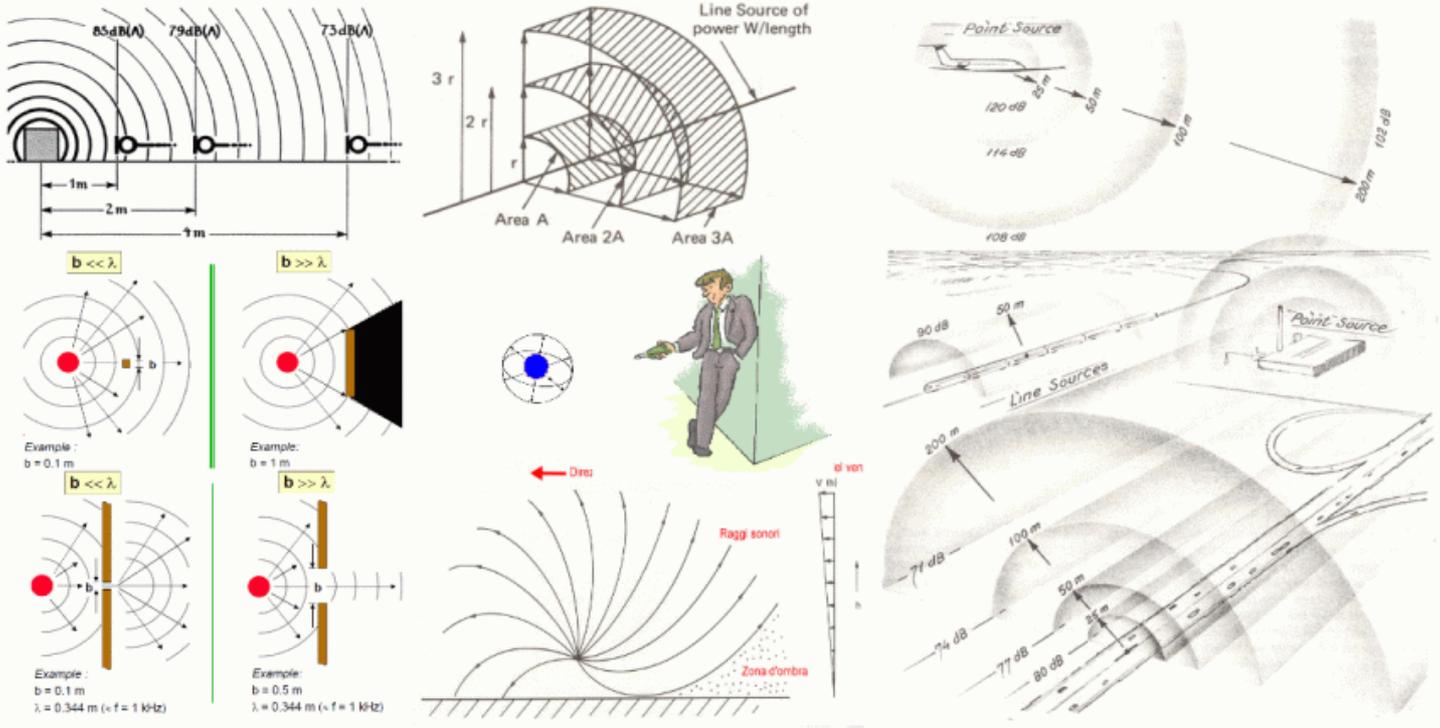
Il fonometro. Il microfono a condensatore. Misura dell'intensita' acustica. La trasformata di Fourier. Il prodotto di convoluzione. Delta di Dirac. Sistemi lineari-stazionari. Risposta all'impulso e risposta in frequenza.



# Obiettivi del corso

## 5. Rumore in ambiente esterno

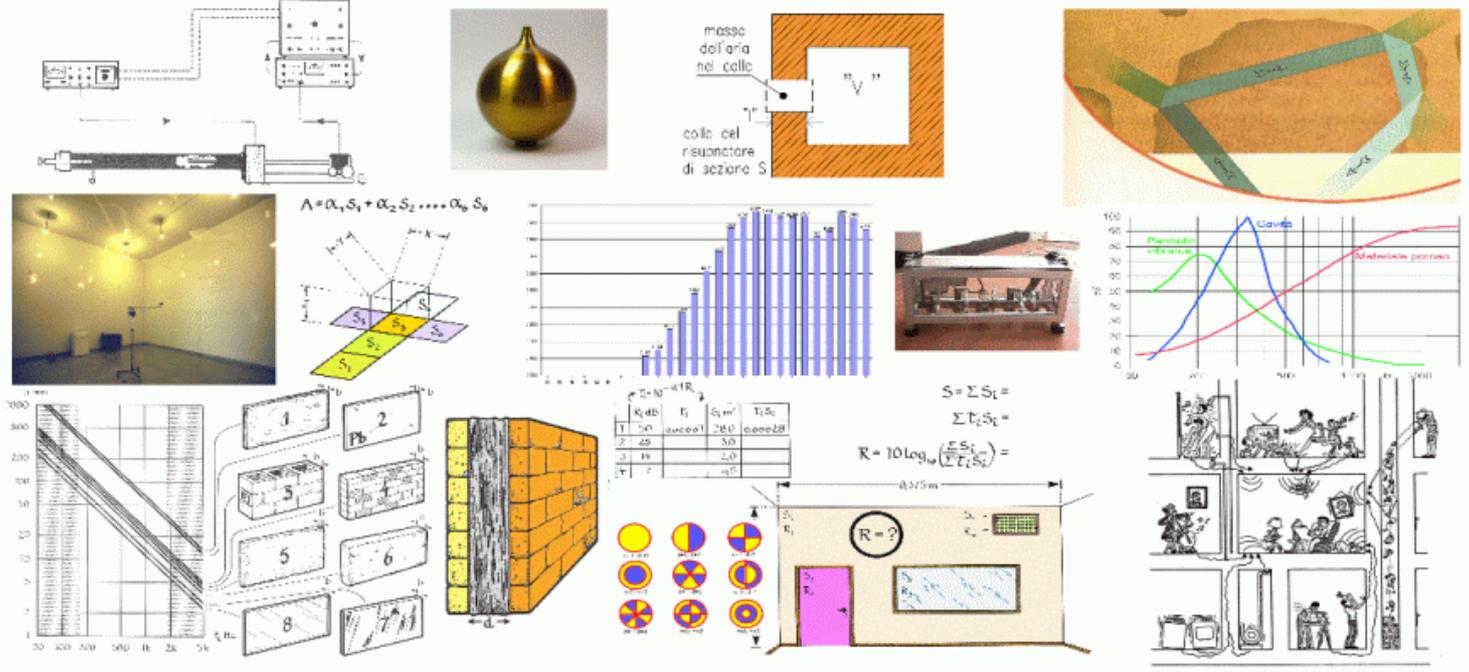
La propagazione in campo aperto. Sorgente puntiforme, lineare e piana. La direttività della sorgente. Attenuazioni aggiuntive. Assorbimento dovuto all'aria. Effetto del suolo. La diffrazione. Relazione di Maekawa. Gradiente di temperatura e vento.



# Obiettivi del corso

## 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.

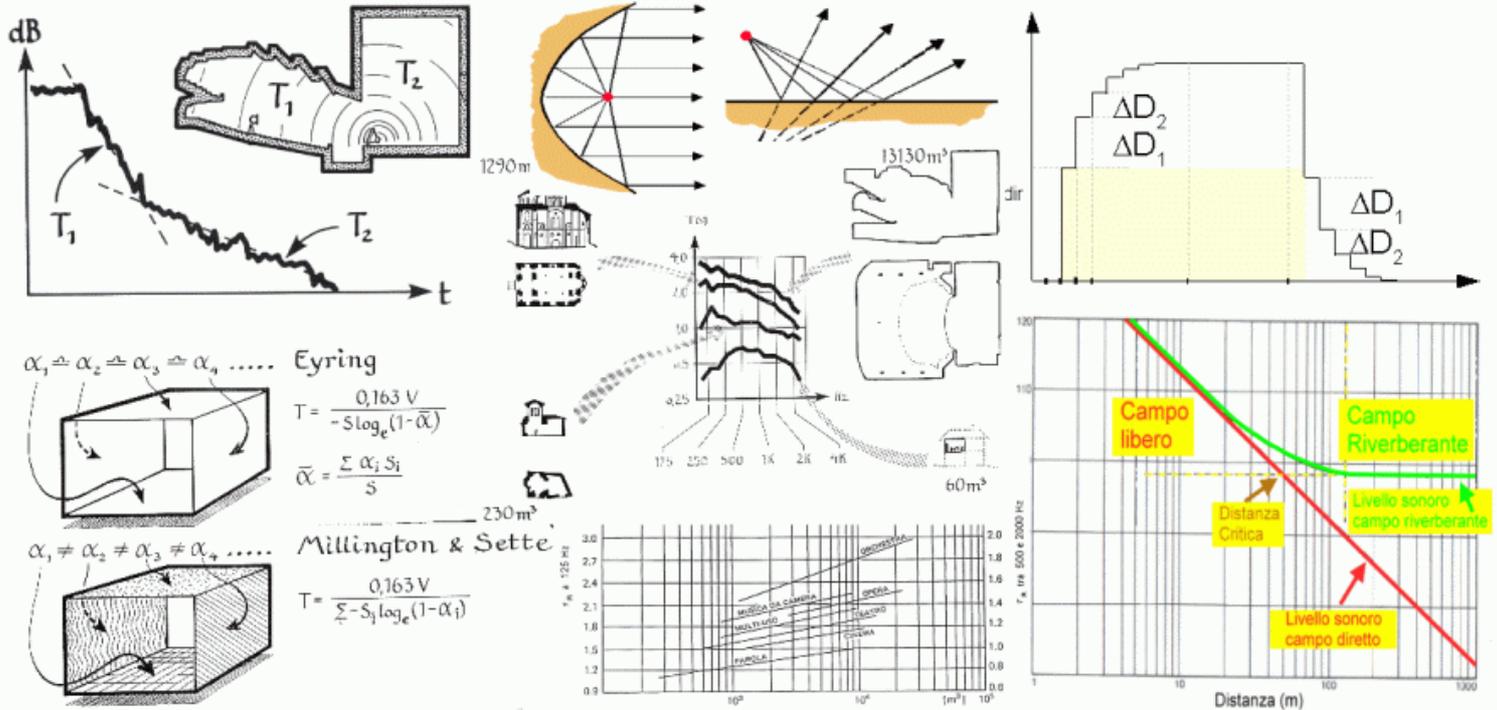


# Obiettivi del corso

Pag. 13

## 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.

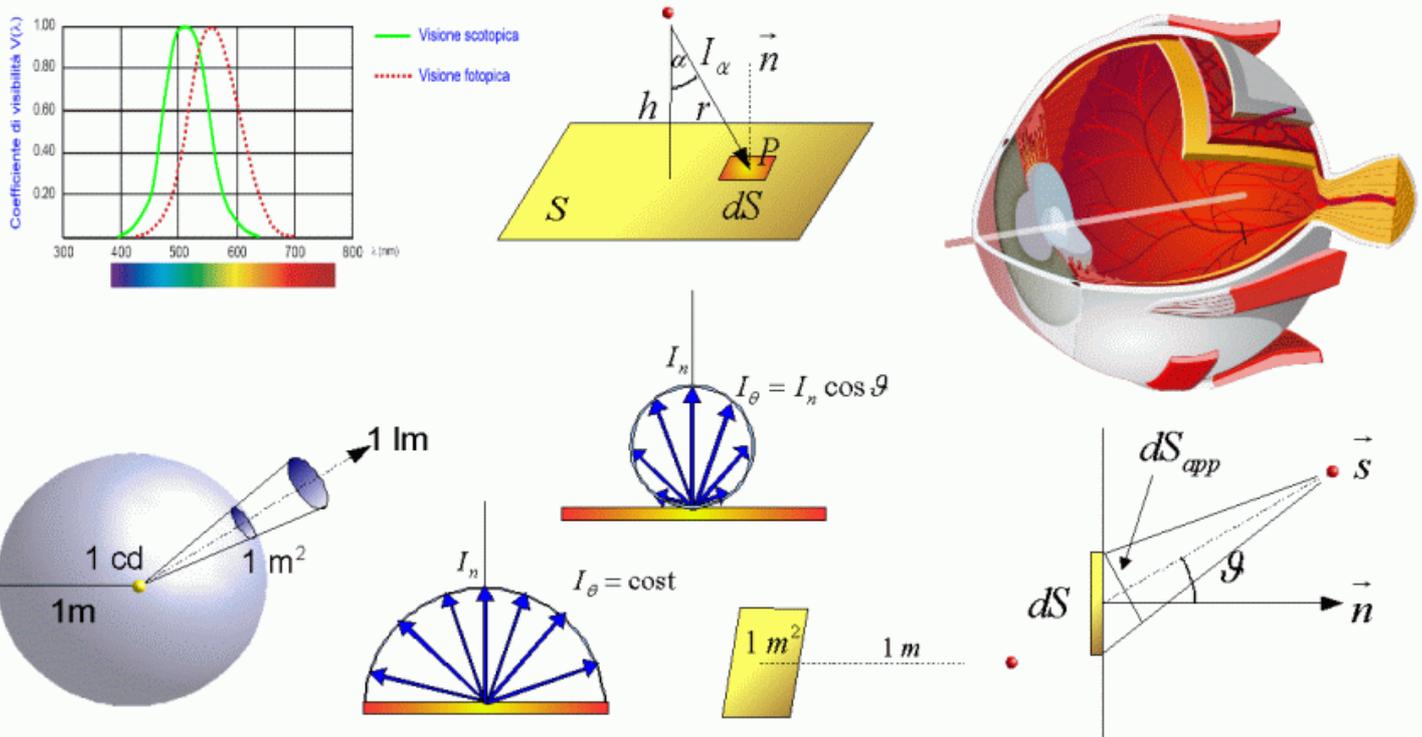


# Obiettivi del corso

Pag. 14

## 8. Cenni di illuminotecnica

La propagazione della luce. Le grandezze fotometriche. Il flusso luminoso. L'intensità luminosa. La luminanza. L'illuminamento. La radianza. Superfici isotrope e lambertiane.



# Introduzione

Pag. 15

## 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

Pag. 18

## ANALISI



SPINACI

CAROTA

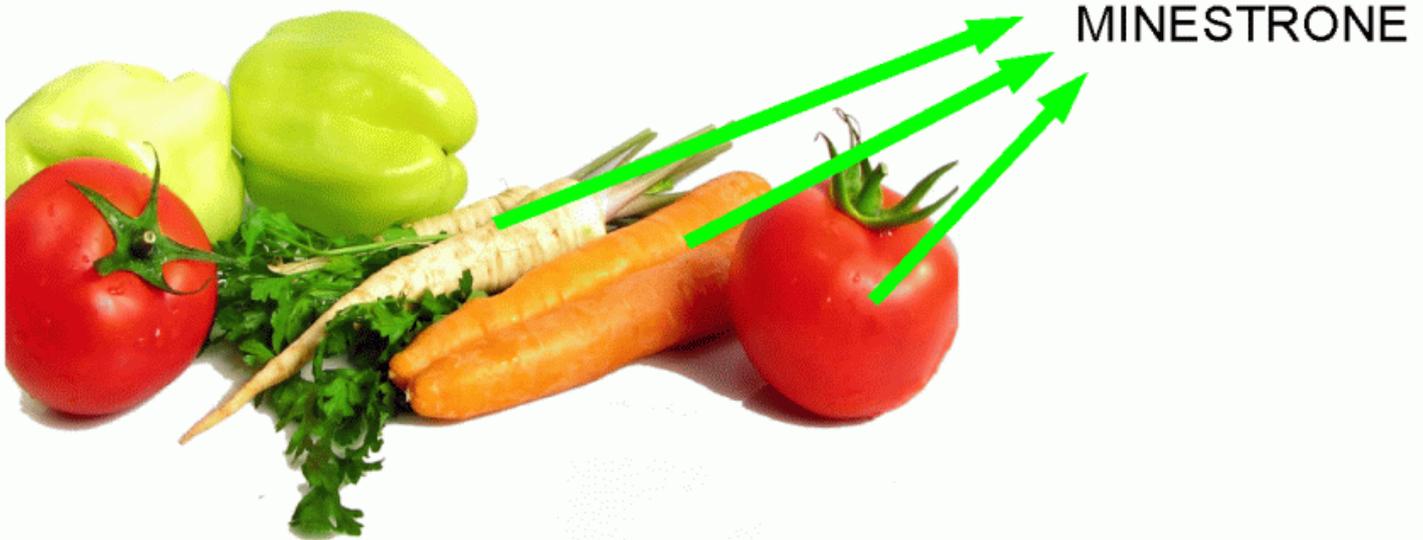
POMODORO

SEDANO

# Introduzione

Pag. 17

## SINTESI



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

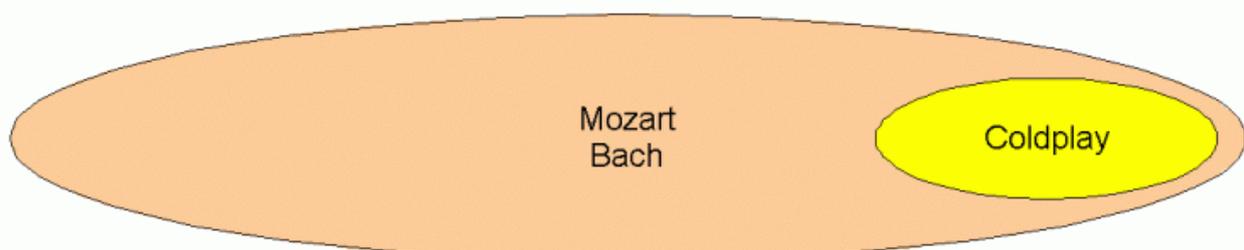
Pag. 18

## 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

Pag. 19

## 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

Pag. 20

Si può scrivere

$$I = I(C, Th)$$

per indicare che la quantità di informazioni ricevute **I** dipende dalla comunicazione **C** e dal thesaurus **Th**.

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

- quando **Th** è troppo povero e non permette di capire **C**
- quando **Th** è troppo ricco e **C** era già conosciuto

Per esempio se **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

Pag. 21

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

Pag. 22

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.

# SISTEMA INTERNAZIONALE

## Grandezze fondamentali del Sistema Internazionale

Grandezza	Unità di misura	Simbolo
Intervallo di tempo	secondo	s
Lunghezza	metro	m
Massa	chilogrammo	kg
Temperatura	kelvin	K
Quantità di materia	mole	mol
Intensità di corrente elettrica	ampere	A
Intensità luminosa	candela	cd

- il **secondo** è l'intervallo di tempo che corrisponde a 9192631770 cicli della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'isotopo 133 del cesio
- il **metro** corrisponde alla distanza percorsa nel vuoto dalla luce in  $1 / 299792458$  secondi
- il **kilogrammo** è la massa uguale a quella del campione primario, cilindro di platino-iridio, conservato a Sévres presso il B.I.P.M. (Bureau Internationale Poids et mesures)
- il **Kelvin** è la frazione  $1 / 273,16$  della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua
- la **mole**, è la quantità di materia di un sistema che contiene tante unità elementari quanti sono esattamente gli atomi contenuti in 0,012 kg di carbonio 12
- l'**Ampere** è l'intensità di corrente che, se mantenuta in due conduttori paralleli, rettilinei, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile rispetto alla lunghezza e alla distanza di un metro l'uno dall'altro nel vuoto, produce tra i conduttori una forza eguale a  $2 \times 10^{-7}$  N per metro di lunghezza
- la **candela** è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  Hz e la cui intensità energetica in tale direzione è di  $1 / 683$  W/sr

Le notazioni Kg, KW, Kcal, KPa sono errate! Il prefisso *kilo* deve essere scritto con "k" minuscolo

# SISTEMA INTERNAZIONALE

## Alcune grandezze derivate

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione
Frequenza	hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = \frac{1}{s}$
Forza	newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg } 1 \frac{m}{s^2}$
Pressione	pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2}$
Lavoro, calore, energia	joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N } 1 \text{ m}$
Potenza	watt	W	$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$
Temperatura Celsius	grado Celsius	°C	$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$

L'**energia** è definita come la capacità di un sistema di compiere lavoro.

Se  $s = s_0 \cos(\omega t)$ , la **frequenza**  $f$  del fenomeno periodico è l'inverso del suo periodo  $T$ :  $f = 1/T$  (Hz).  
 $\omega$  è la velocità angolare (rad/s). Vale la relazione  $f = \omega / 2\pi$  (Hz).

La **forza** unitaria di 1 N è la forza che imprime alla massa di 1 kg un'accelerazione di  $1 \frac{m}{s^2}$

La **pressione** unitaria di 1 Pa è la pressione esercitata su una superficie di  $1 \text{ m}^2$  dalla forza di 1 N, perpendicolare alla superficie. Pressione atmosferica a livello del mare: 100 kPa.

Un **joule** è il lavoro richiesto per esercitare una forza di 1 N per una distanza di 1 m. Es: lavoro richiesto per sollevare una massa di 102 g (una piccola mela) per un metro, opponendosi alla forza di gravità terrestre.  
Nota: una massa di 1 kg, in prossimità della superficie terrestre ha una *forza peso* di circa 9,81 N

La **potenza** di 1 W corrisponde al lavoro di 1 J svolto nell'intervallo di tempo di 1 s. Un wattora = 3600 joule

# Prefissi

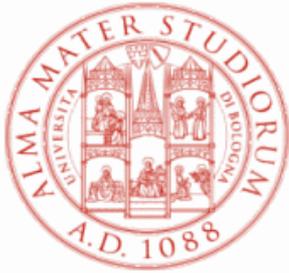
<b>kilo</b>	1.000	<b>k</b>	Mille	$10^3$
<b>mega</b>	1.000.000	<b>M</b>	Un milione	$10^6$
<b>giga</b>	1.000.000.000	<b>G</b>	Un miliardo	$10^9$
<b>tera</b>	1.000.000.000.000	<b>T</b>	Mille miliardi	$10^{12}$
<b>peta</b>	1.000.000.000.000.000	<b>P</b>	Un milione di miliardi	$10^{15}$
<b>exa</b>	1.000.000.000.000.000.000	<b>E</b>	Un miliardo di miliardi	$10^{18}$
<b>zetta</b>	1.000.000.000.000.000.000.000	<b>Z</b>		$10^{21}$
<b>yotta</b>	1.000.000.000.000.000.000.000.000	<b>Y</b>		$10^{24}$

<b>milli</b>	1/1.000	<b>m</b>	Un millesimo	$10^{-3}$
<b>micro</b>	1/1.000.000	<b>μ</b>	Un milionesimo	$10^{-6}$
<b>nano</b>	1/1.000.000.000	<b>n</b>	Un miliardesimo	$10^{-9}$
<b>pico</b>	1/1.000.000.000.000	<b>p</b>	Un millimiliardesimo	$10^{-12}$
<b>femto</b>	1/1.000.000.000.000.000	<b>f</b>		$10^{-15}$
<b>atto</b>	1/1.000.000.000.000.000.000	<b>a</b>		$10^{-18}$
<b>zepto</b>	1/1.000.000.000.000.000.000.000	<b>z</b>		$10^{-21}$
<b>yocto</b>	1/1.000.000.000.000.000.000.000.000	<b>y</b>		$10^{-24}$

# Lettere greche

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>	<b>h</b>	<b>i</b>	<b>k</b>	<b>l</b>	<b>m</b>
α	β	χ	δ	ε	φ	γ	η	ι	κ	λ	μ
alfa	beta	chi	delta	epsilon	phi	gamma	eta	iota	kappa	lambda	mu
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>M</b>
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>X</b>	<b>Δ</b>	<b>E</b>	<b>Φ</b>	<b>Γ</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>K</b>	<b>Λ</b>	<b>M</b>

<b>n</b>	<b>o</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>r</b>	<b>s</b>	<b>t</b>	<b>u</b>	<b>w</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
ν	ο	π	θ	ρ	σ	τ	υ	ω	ξ	ψ	ζ
nu	omikron	pi	theta	rho	sigma	tau	upsilon	omega	xi	psi	zeta
<b>N</b>	<b>O</b>	<b>P</b>	<b>Q</b>	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>	<b>U</b>	<b>W</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>N</b>	<b>O</b>	<b>Π</b>	<b>Θ</b>	<b>P</b>	<b>Σ</b>	<b>T</b>	<b>Υ</b>	<b>Ω</b>	<b>Ξ</b>	<b>Ψ</b>	<b>Z</b>



*Università degli studi di Bologna*  
*Facoltà di Ingegneria*

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

Dispensa n. 1

**ACUSTICA FISICA**

Docente: Paolo Guidorzi

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

ACUSTICA FISICA

## *Indice*

Pag. 2

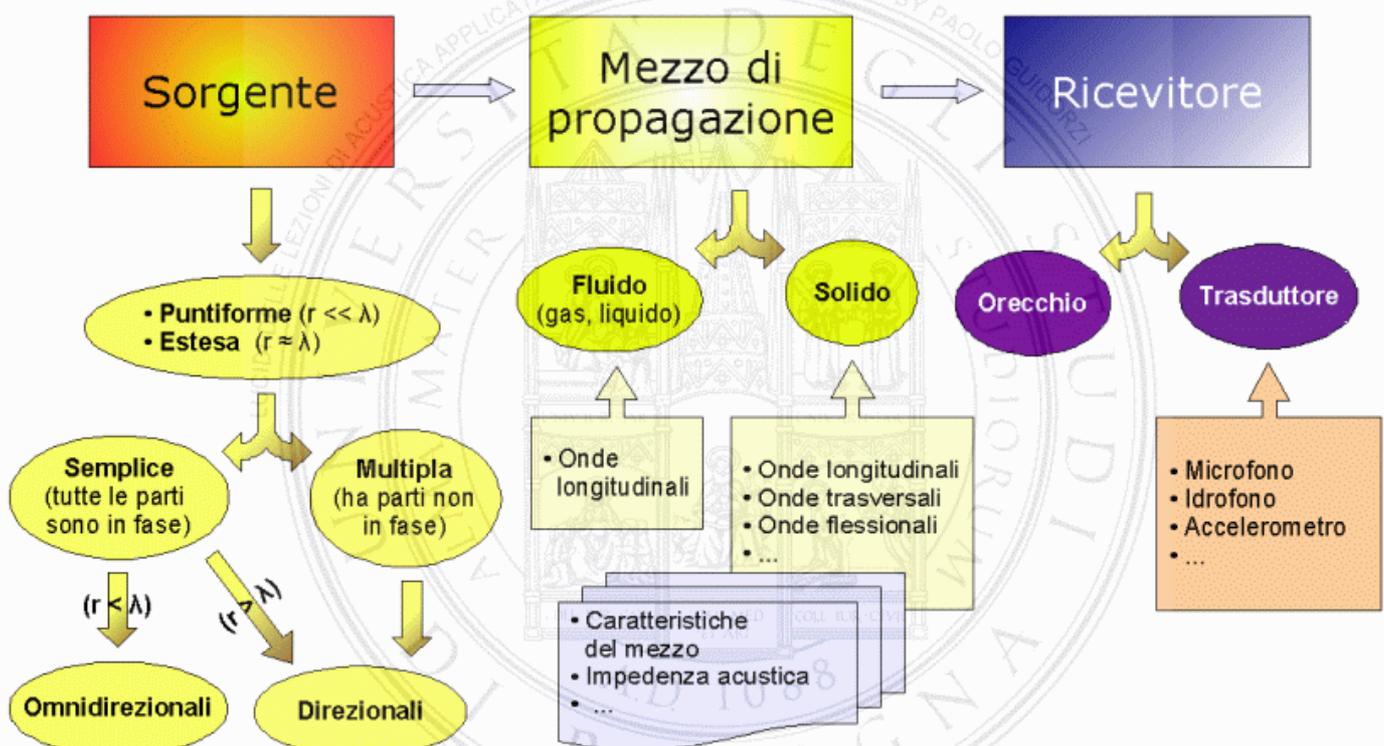
- 1 - Introduzione
- 2 - La pressione acustica
- 3 - Onde acustiche nei mezzi elastici
- 4 - Cenni sull'equazione delle onde
- 5 - La velocità del suono
- 6 - Generazione dell'onda sonora
- 7 - La lunghezza d'onda
- 8 - Tipi di onde acustiche
- 9 - Pressione efficace
- 10 - Potenza, Intensità e Impedenza

- 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



- 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  $20 \mu\text{Pa}$



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

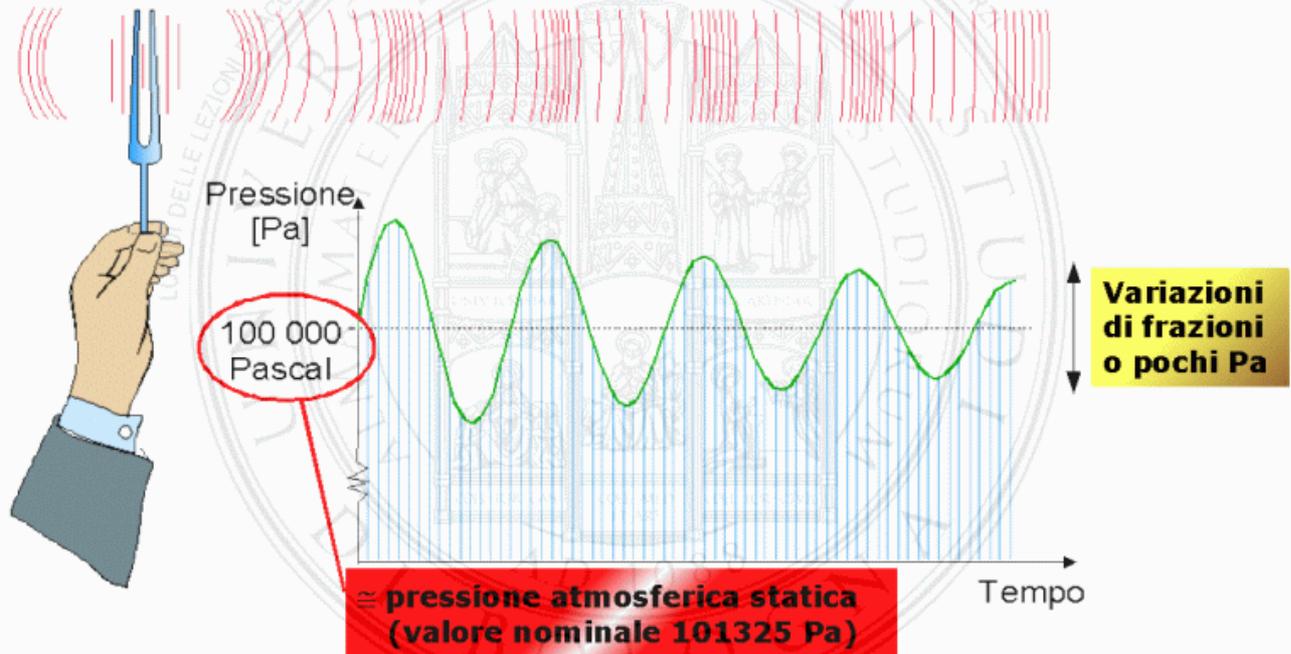


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

- La pressione acustica si sovrappone alla pressione atmosferica

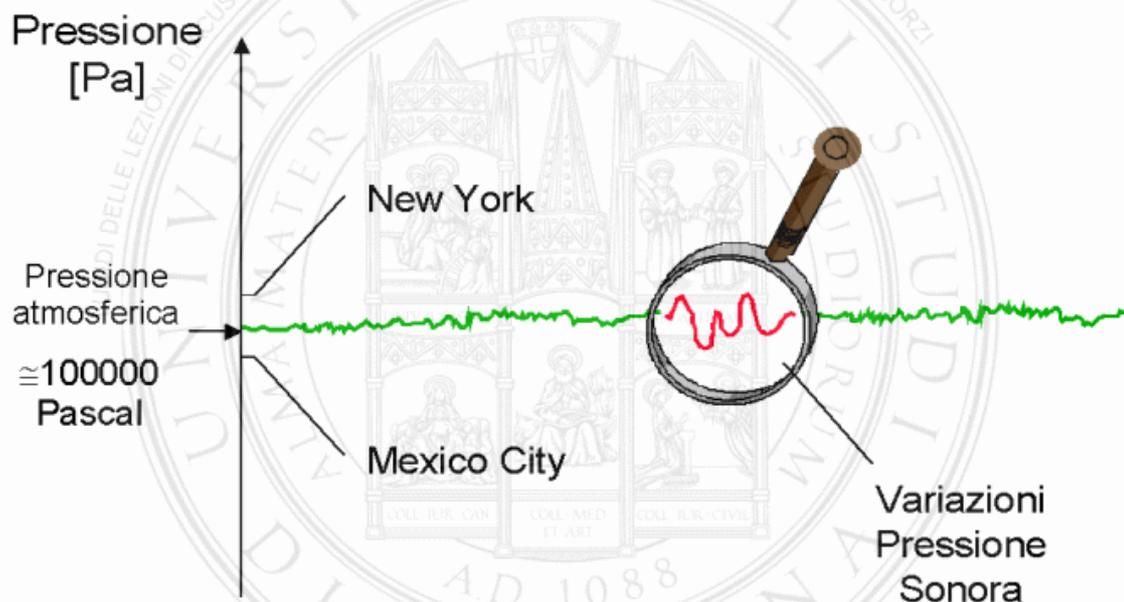


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

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

### Range of Sound Pressure Levels

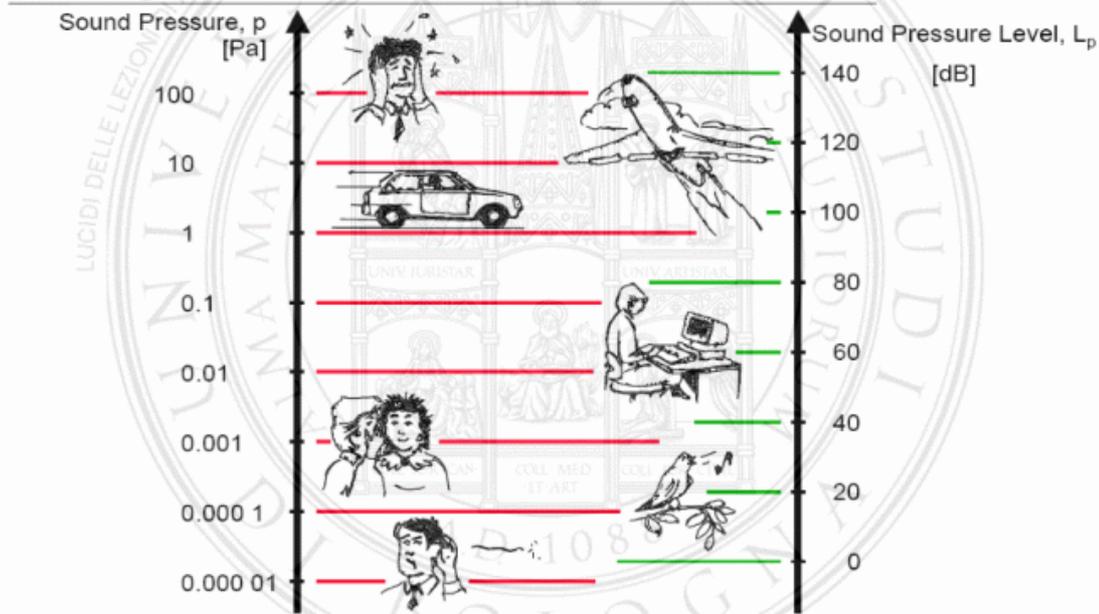


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Pressione atmosferica:  
circa 100000 Pa

Variazioni di pressione  
dovuta alle  
onde sonore

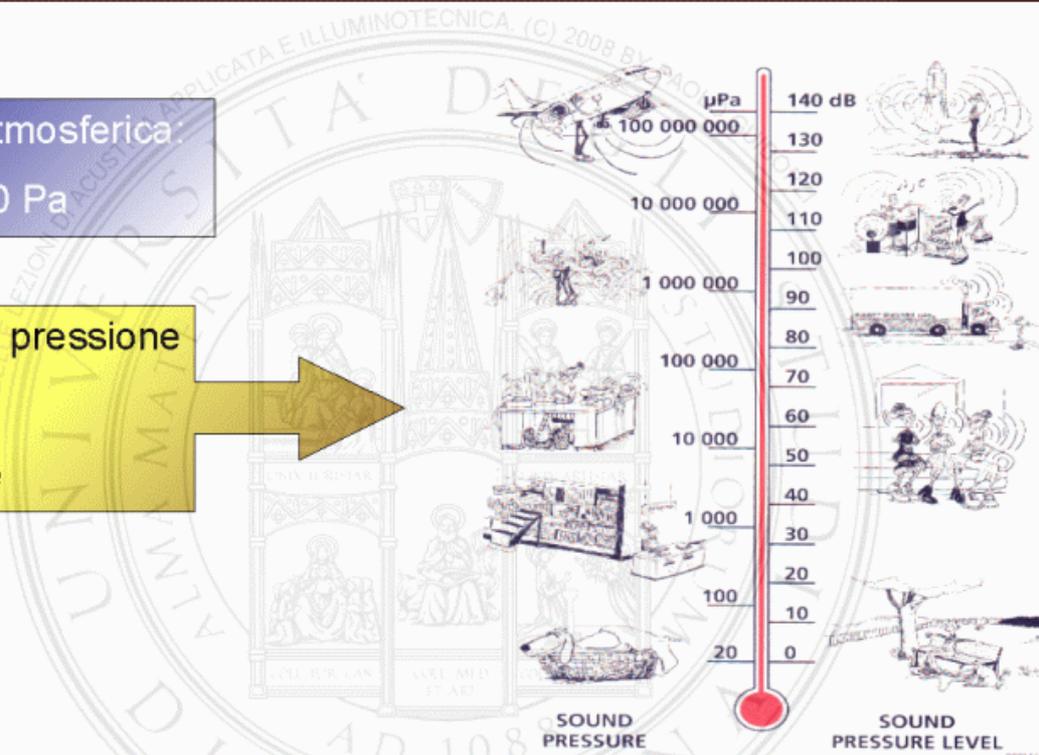


Image Courtesy of Brüel & Kjær

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

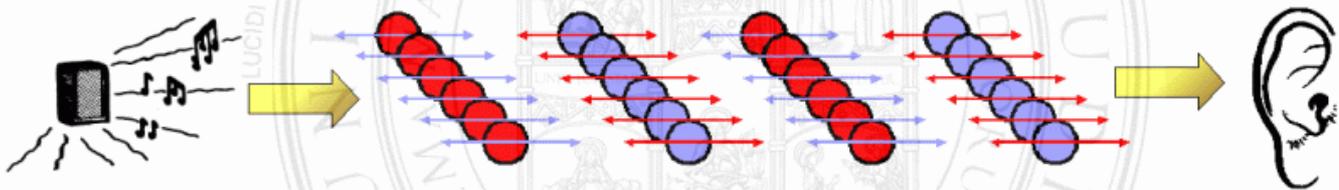


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

- L'onda acustica non trasporta massa

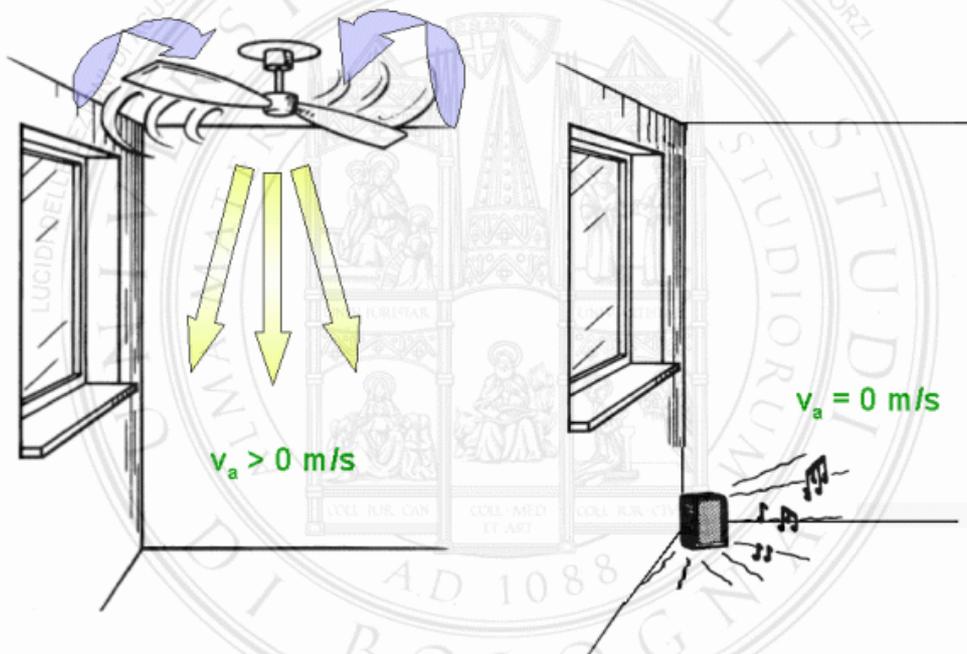
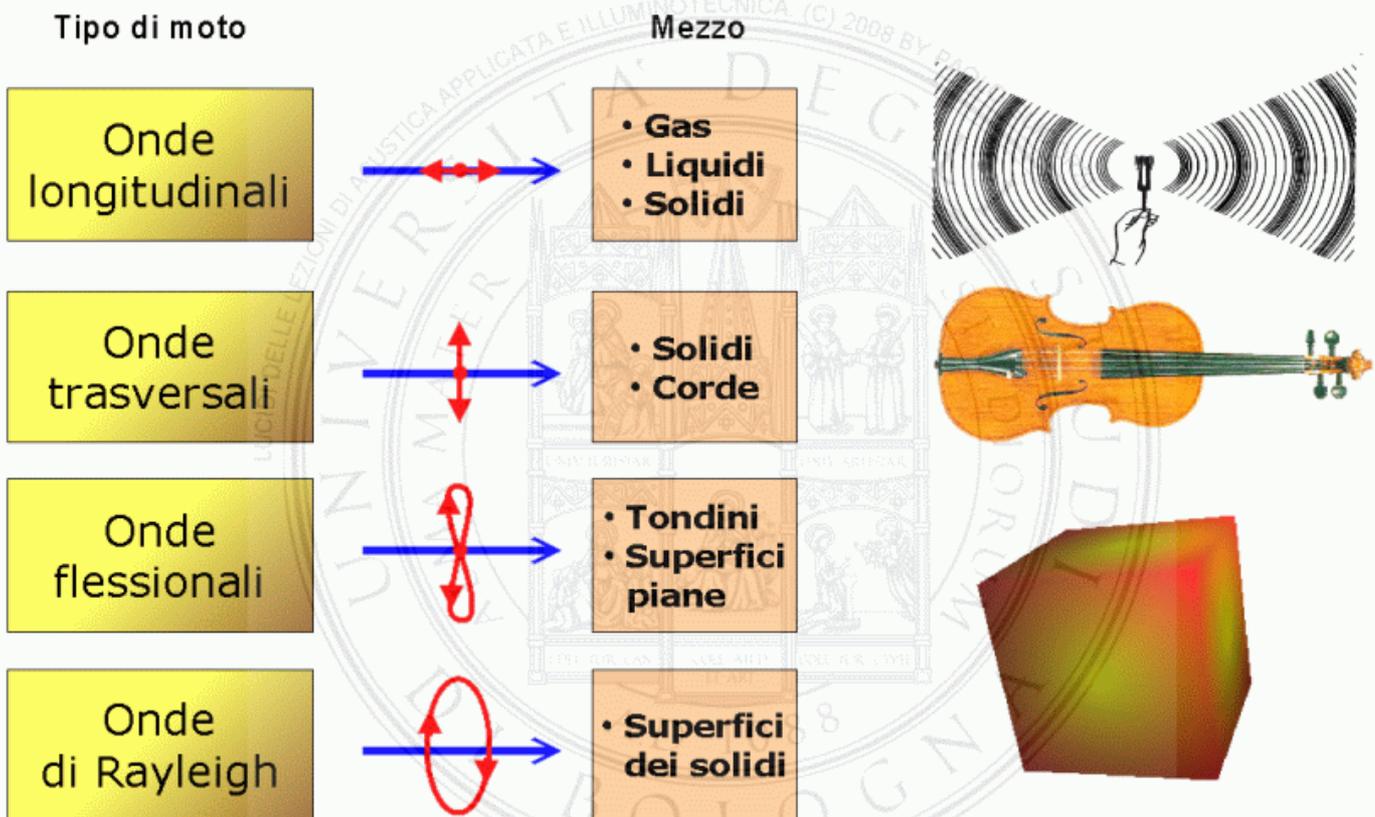


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



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
- Variabili di perturbazione

Pressione  $p_0$   
Densità  $\rho_0$   
Temperatura  $T_0$

Pressione  $p$   
Densità  $\rho$   
Temperatura  $T$   
Spostamento  $\xi$   
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

$p = p_0 + p'$ ;  $p' \ll p_0$   
 $\rho = \rho_0 + \rho'$ ;  $\rho' \ll \rho_0$   
 $u = u_0 + u'$ ;  $u_0 = 0$

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**

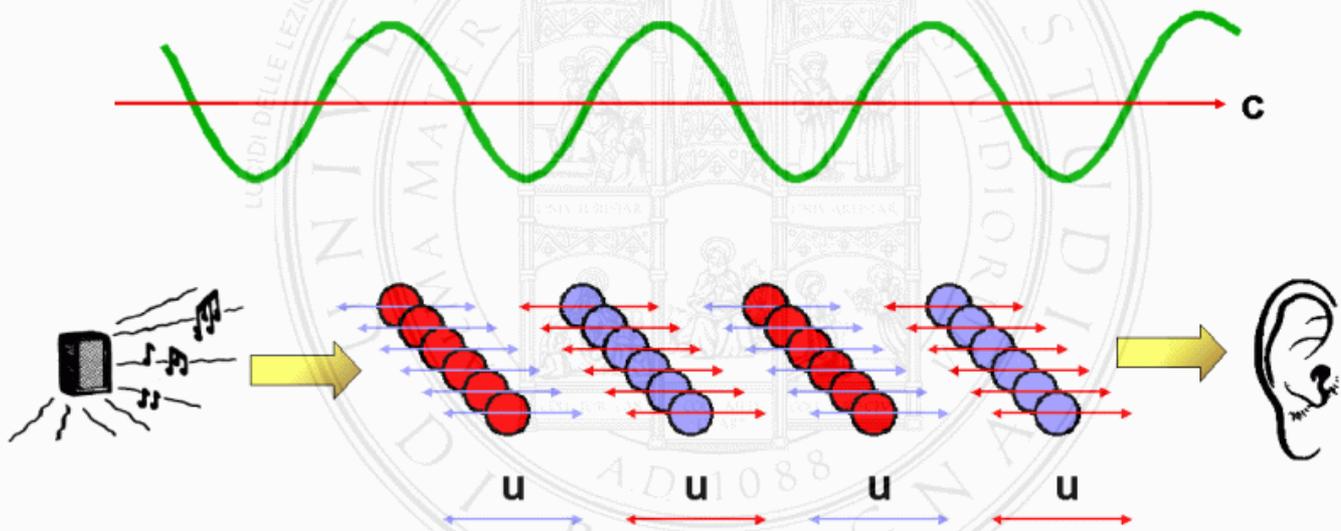


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**c** è la velocità di fase del suono

**u** è la velocità delle particelle del mezzo

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

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

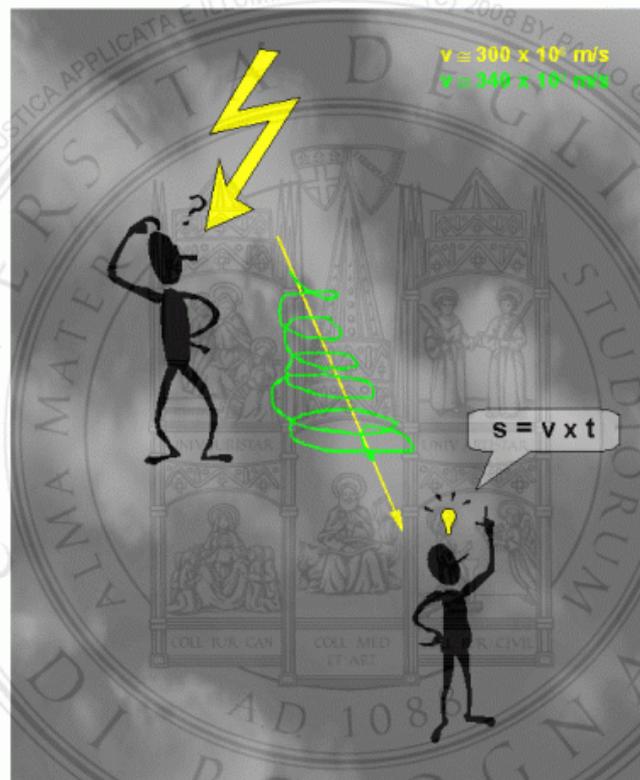
La propagazione del suono in aria è una trasformazione termodinamica

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

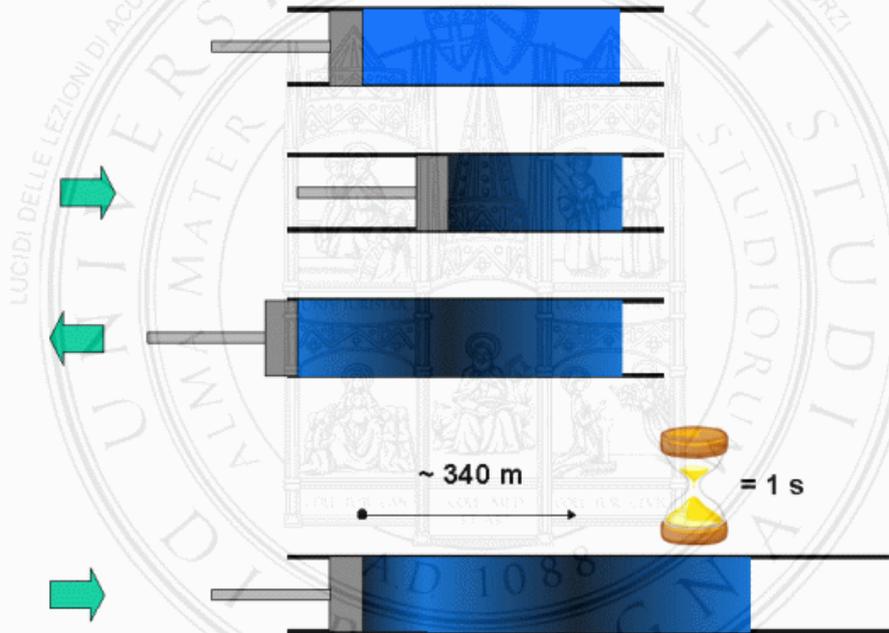
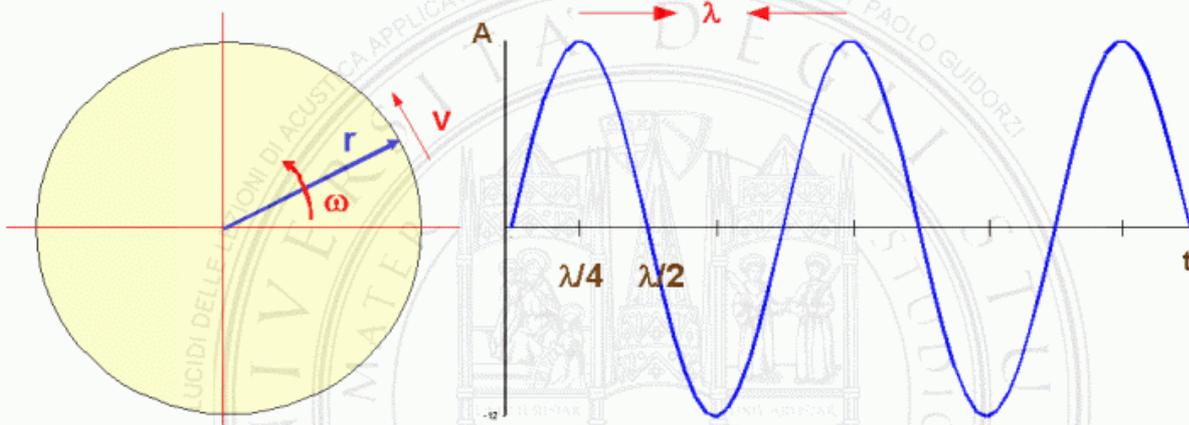


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



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

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

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

$v$ : velocità lineare [m/s]  
 $\omega$ : velocità angolare [rad/s]=[s<sup>-1</sup>]  
 $T$ : periodo [s] (tempo per percorrere un angolo giro)  
 $f$ : frequenza [s<sup>-1</sup>]=[Hz] (giri per unità di tempo)  
 $\lambda$ : lunghezza d'onda [m]

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

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

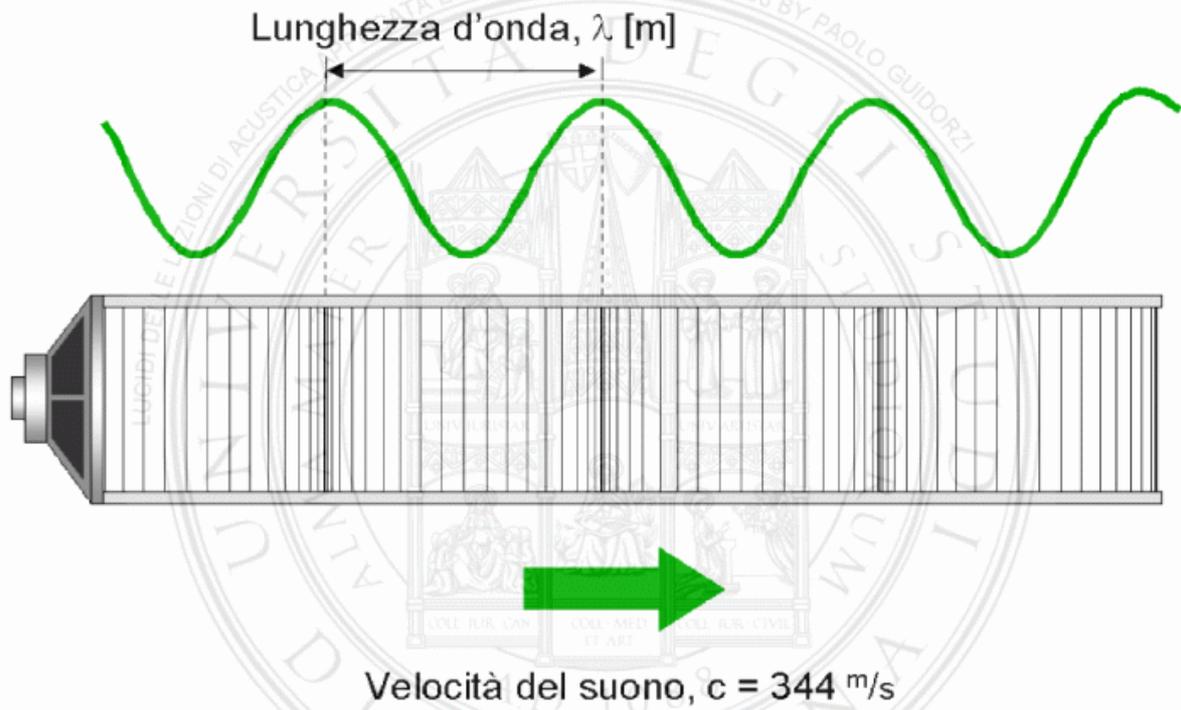


Image Courtesy of Brüel & Kjaer

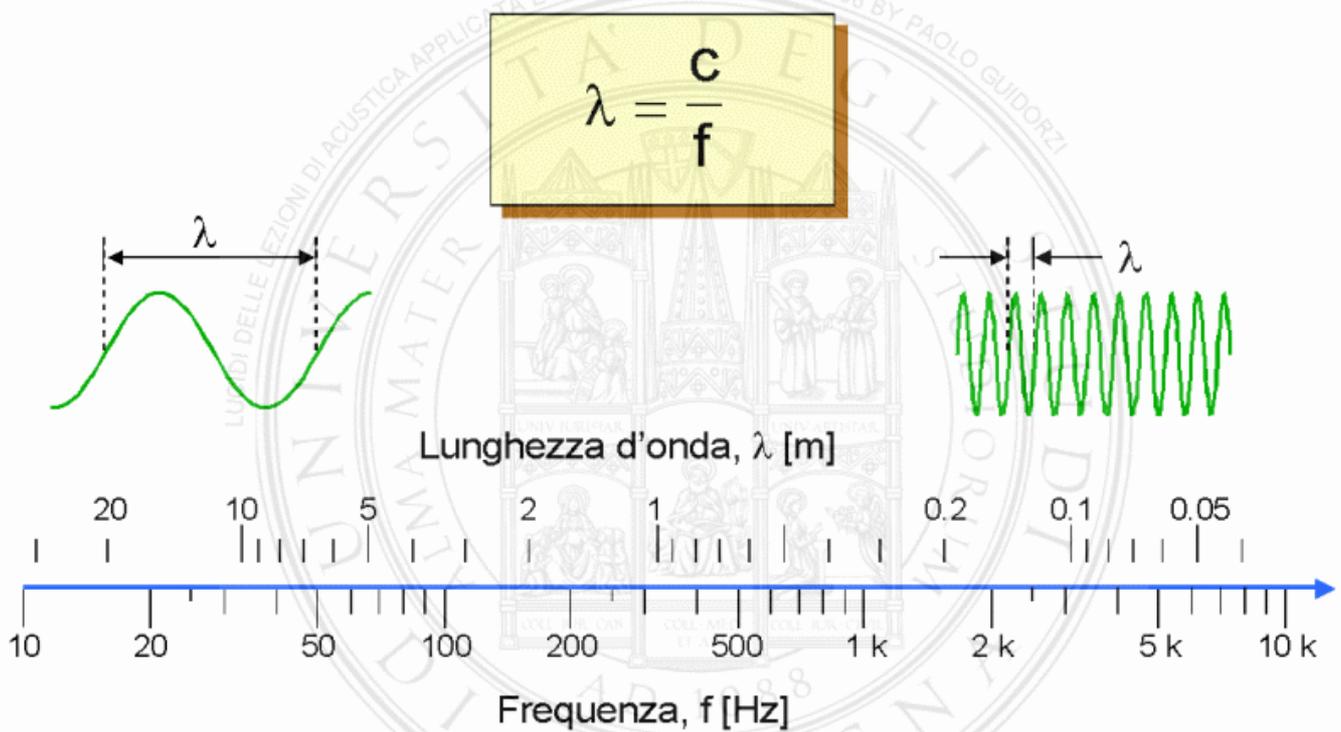
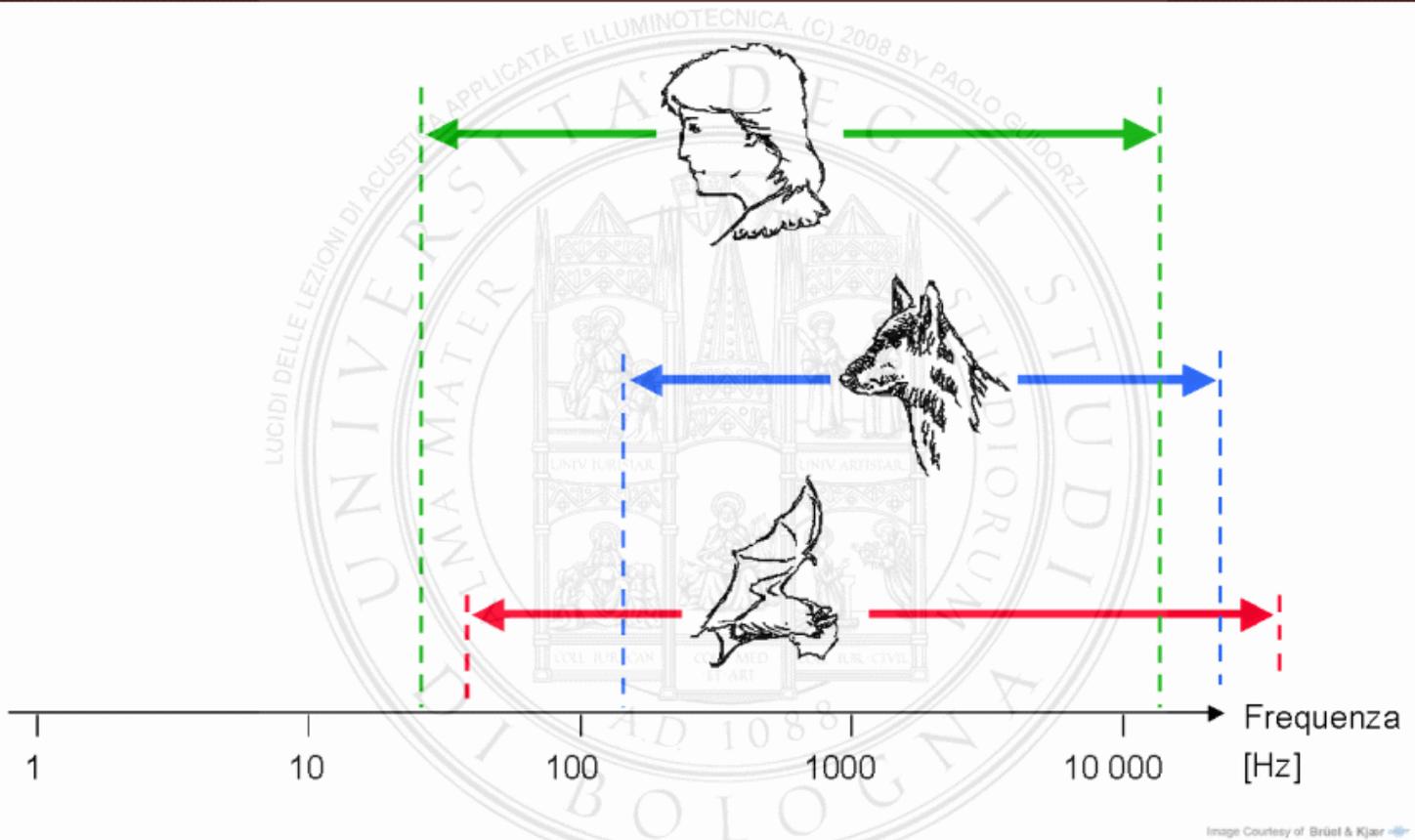
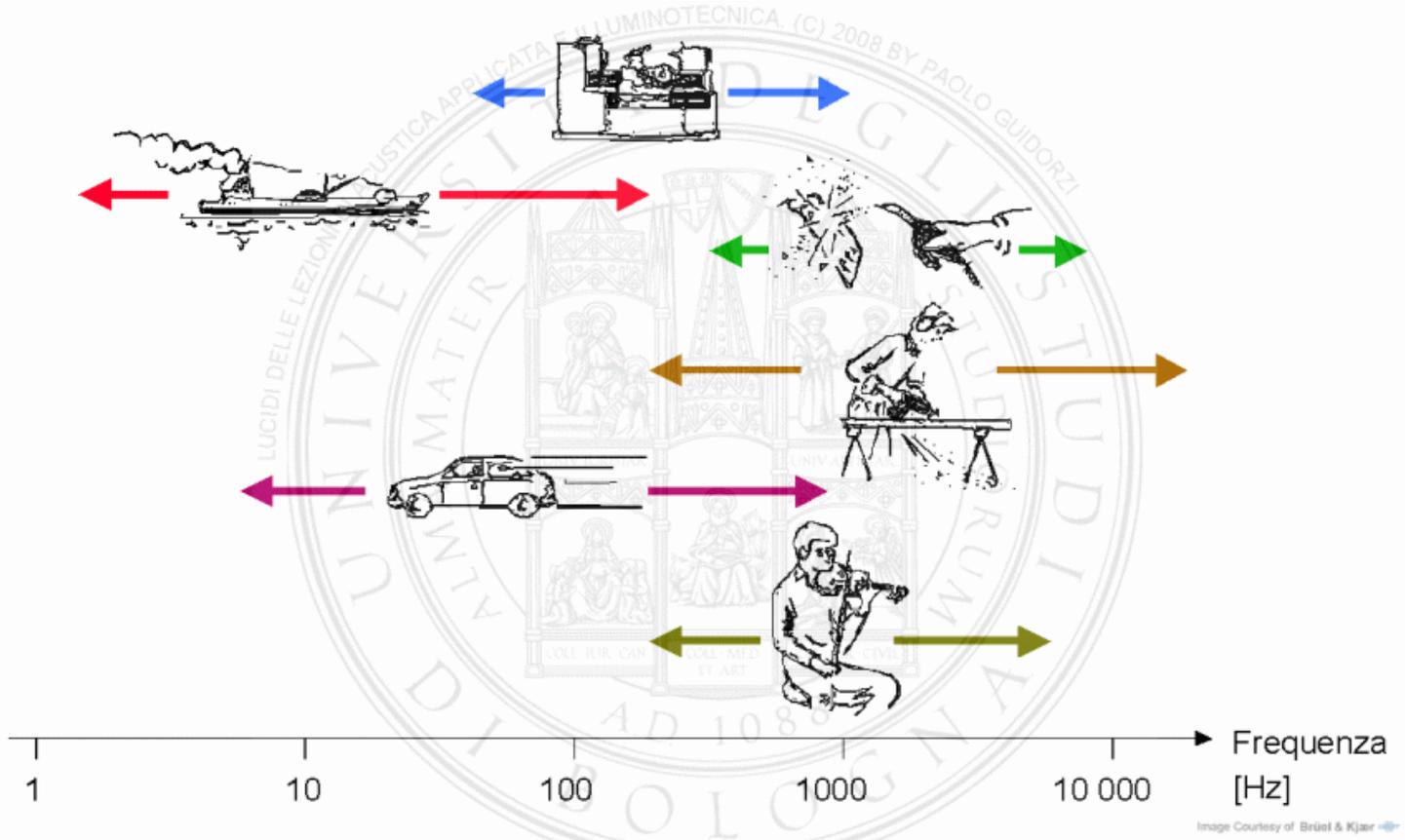
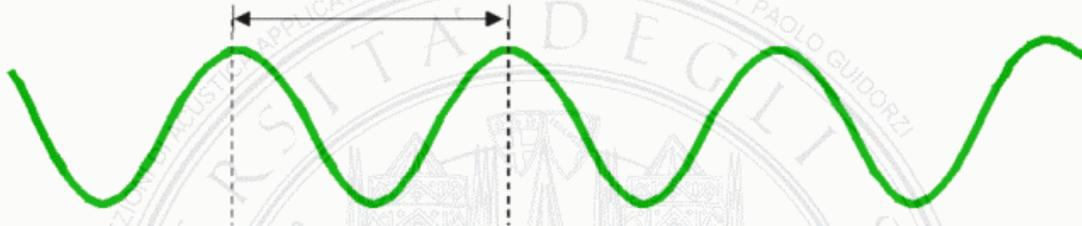


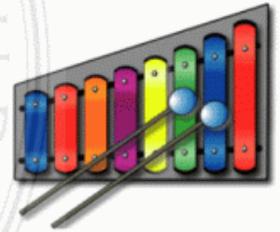
Image Courtesy of Brüel & Kjaer



Lunghezza d'onda,  $\lambda$  [m]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

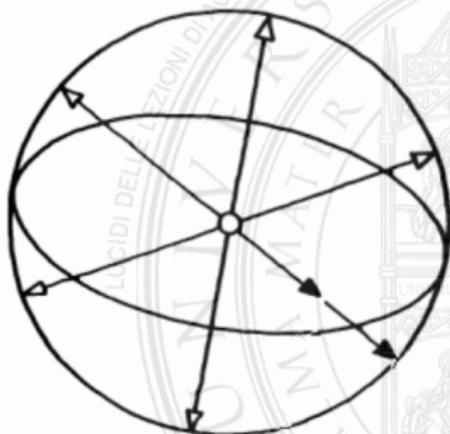
$$\lambda = \frac{c}{f}$$



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

Tipi di onde acustiche:

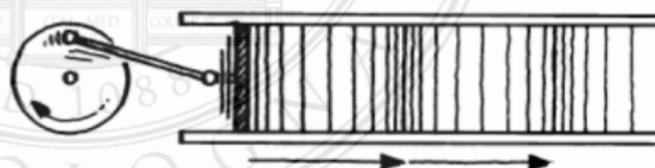
Onde sferiche



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:

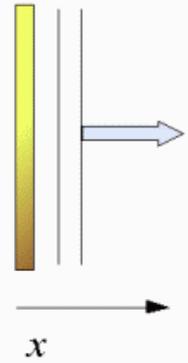
$$p(x,t) = P_0 \cos(\omega t - kx) + P_0 \cos(\omega t + kx) = p_+ + p_-$$

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

$$c = \lambda f$$

$$\omega = 2\pi f$$

$P_0$ : ampiezza dell'onda [Pa]  
 $\omega$ : velocità angolare [rad/s]=[s<sup>-1</sup>]  
 $x$ : posizione nello spazio [m]  
 $\lambda$ : lunghezza d'onda [m]  
 $k$ : numero d'onda [rad/m]



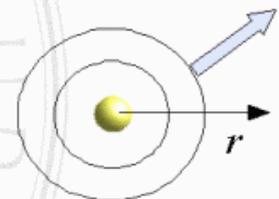
Soluzioni dell'equazione delle onde

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

**ONDE SFERICHE**

La soluzione dell'equazione diventa:

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

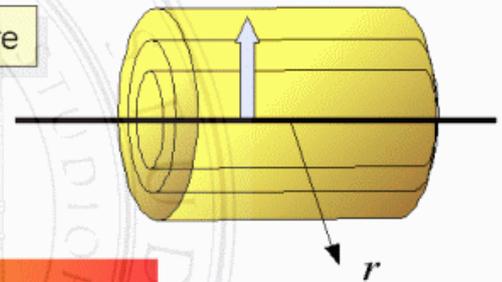
Onde sferiche da  $r = 0$  a  $r = \infty$ Sorgente sferica  
puntiforme

Soluzioni dell'equazione delle onde

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

**ONDE CILINDRICHE**

Sorgente lineare



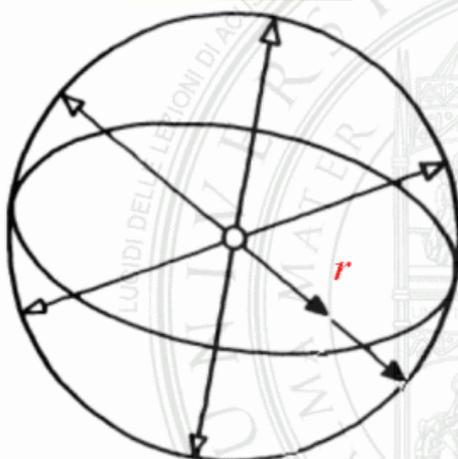
La soluzione dell'equazione diventa:

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

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

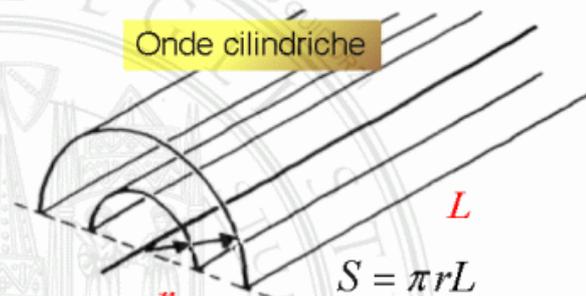
Divergenza geometrica dei differenti tipi di onde acustiche:

Onde sferiche



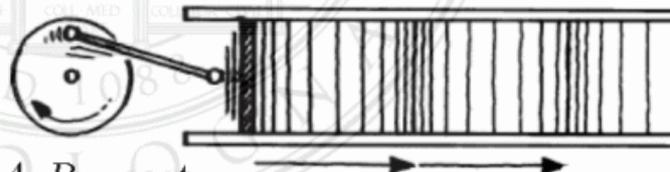
$$S = 4\pi r^2$$

Onde cilindriche



$$S = \pi rL$$

Onde piane



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

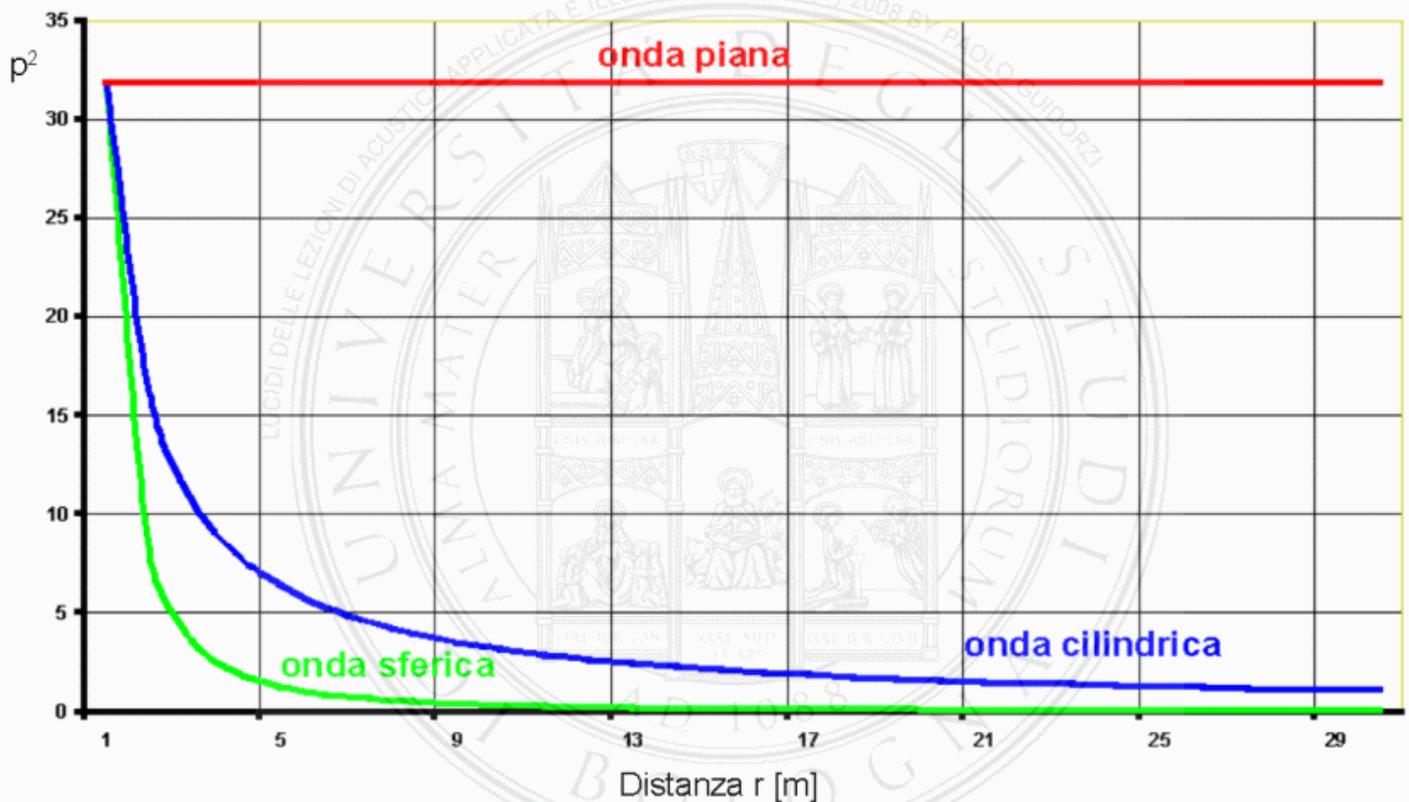


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

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  $p$

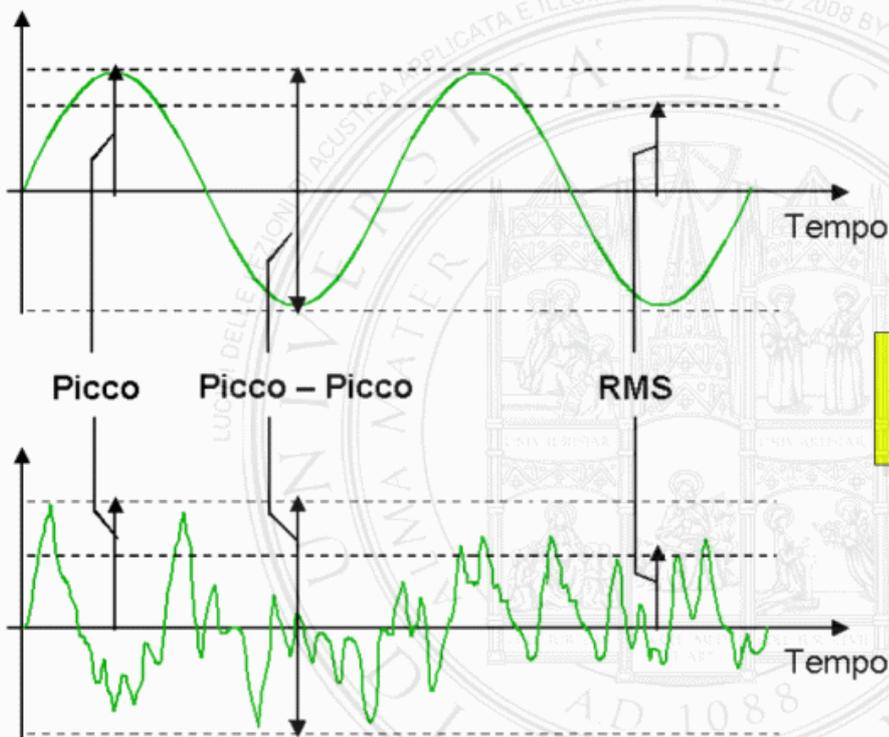
Dalle misure si ottiene direttamente il valore della pressione acustica.

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.

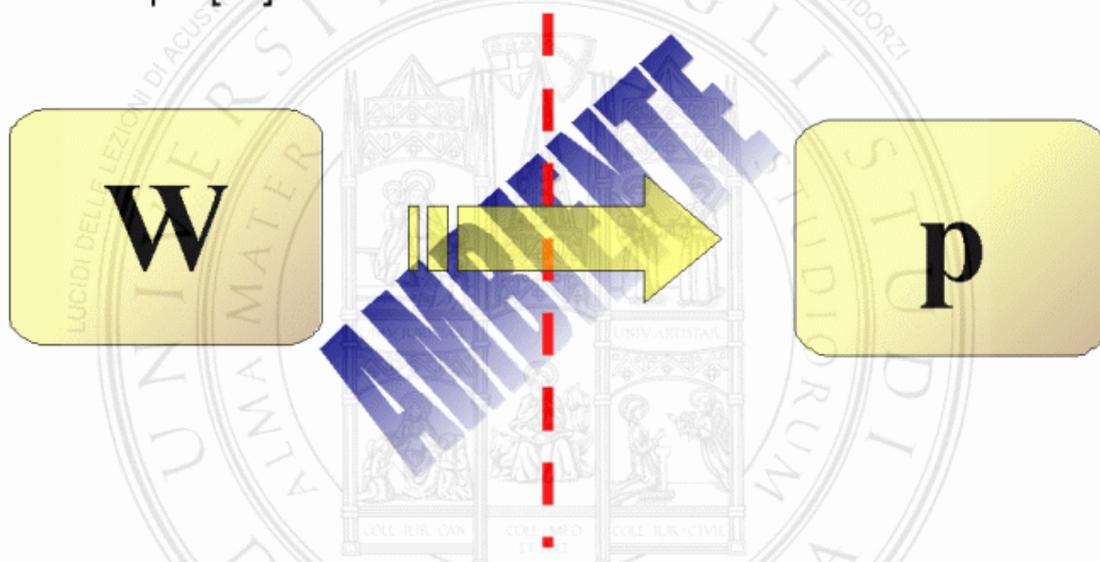
Se la funzione è sinusoidale:  $P_{eff} = P_{max} / \sqrt{2}$



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

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

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

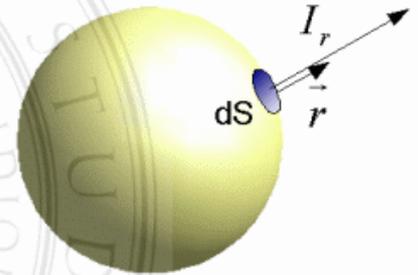
Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

L'intensità acustica, o flusso di potenza, è una grandezza vettoriale, al contrario della pressione acustica e della potenza che sono grandezze scalari, ed esprime il valore e la direzione del flusso netto di potenza acustica in una certa direzione dello spazio [W / m<sup>2</sup>].

Sia dE l'energia che attraversa l'area infinitesima dS perpendicolare alla direzione r in un intervallo di tempo dt; il modulo dell'intensità

sonora in un certo istante vale:

$$I_r = \frac{dE}{dt \cdot dS}$$



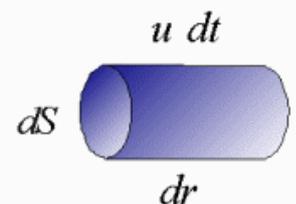
Se dF è la forza totale infinitesima che agisce nella direzione r e p<sub>t</sub> è la pressione totale che agisce sull'area dS, comprendente la pressione statica p<sub>0</sub> e la pressione acustica p, si ha:  $dE = dF \cdot dr = p_t \cdot dS \cdot dr$

$$I_r = \frac{dE}{dt \cdot dS}$$

$$dE = dF \cdot dr = p_t \cdot dS \cdot dr$$



$$I_r = p_t \frac{dr}{dt} = p_0 u + pu$$



essendo u la velocità delle particelle nella direzione r.  
Se si calcola il valore medio di I<sub>r</sub> in un certo intervallo di tempo, si ottiene che p<sub>0</sub>u = 0 e quindi I = pu

In termini vettoriali:

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

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

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



Si definisce anche la grandezza **Densità Acustica**, che rappresenta l'energia sonora contenuta nell'unità di volume, intorno a un punto considerato. E' espressa in  $[J / m^3]$ .

Considerando un volume elementare:

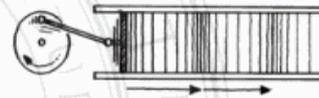
$$D = \frac{dE}{dV} = \frac{dE}{dr \cdot dS} = \frac{dE}{dr \cdot dS} \frac{dt}{dt} = \frac{dE}{dt} \frac{dt}{dS} \frac{dr}{dr} = \frac{I_r}{c}$$

### 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:

$$\vec{z} = \frac{p}{u} = \left| \vec{z} \right| e^{j\theta} = r_z + jx_z \quad \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] = [\text{rayl}]$$

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

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.  $\rho_0$  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)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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 $\times 10^{-3}$

## Legame tra intensità e pressione

Per un onda piana (considerando solo l'onda progressiva) valgono le relazioni:

$$p = P_0 \cos(\omega t - kx)$$

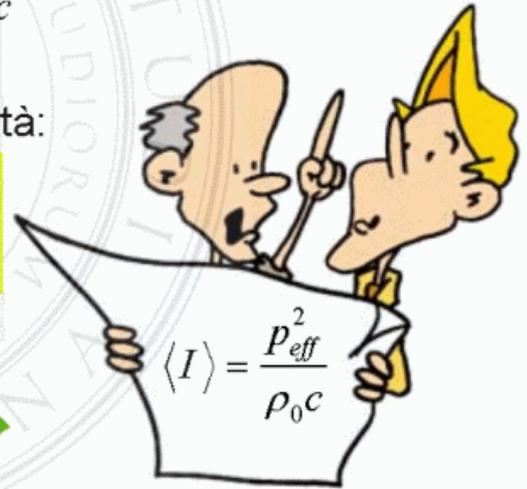
$$u = \frac{P_0}{\rho_0 c} \cos(\omega t - kx)$$

$$I = p \cdot u = \frac{P_0^2}{\rho_0 c} \cos^2(\omega t - kx)$$

Interessa conoscere il valore medio dell'intensità:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_0^2}{\rho_0 c} \cos^2(\omega t - kx) dt = \frac{1}{2} \frac{P_0^2}{\rho_0 c} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Inoltre per le grandezze sinusoidali si utilizza il valore efficace:  $P_{\text{eff}} = P_{\text{max}} / \sqrt{2}$



## Impedenza e onde sferiche

Per le onde sferiche, l'impedenza vale:

$$z = \frac{p}{u} = \rho_0 c \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{kr}} \right)$$

Termine di differenza rispetto alle onde piane. La velocità non è più in fase con la pressione

$$c = \lambda f$$

$$\omega = 2\pi f$$

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

$$kr \rightarrow \infty \Rightarrow z \rightarrow \rho_0 c$$

A grande distanza dalla sorgente le onde sferiche si comportano come onde piane

$$kr \rightarrow 0 \Rightarrow u \text{ e } p \text{ sono in quadratura: } z \rightarrow 0$$

Vicino alla sorgente per generare una piccola pressione devo avere alta velocità delle particelle

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

Ciò avviene ad esempio in una cassa acustica quando  $\lambda \gg r$  ovvero se si vuole generare una bassa frequenza con una cassa acustica piccola. Esempio: 100 Hz  $\rightarrow \lambda = c / f = 340 / 100 = 3,4$  m



*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

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

**Indice**

LIVELLI SONORI E DEFINIZIONE DI DECIBEL

Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - La scala dei decibel
- 3 - Somma di livelli in dB
- 4 - Sottrazione di livelli in dB
- 5 - Esercizi sui dB
- 6 - Livelli di potenza, intensità e densità
- 7 - Misura della potenza sonora
- 8 - Integrazione esponenziale e lineare: Leq
- 9 - Il SEL

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

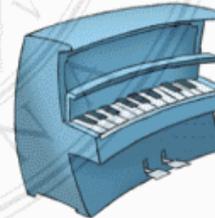
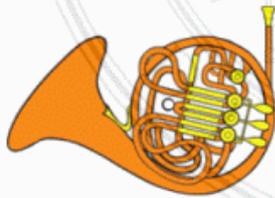


Image Courtesy of Brüel & Kjær

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

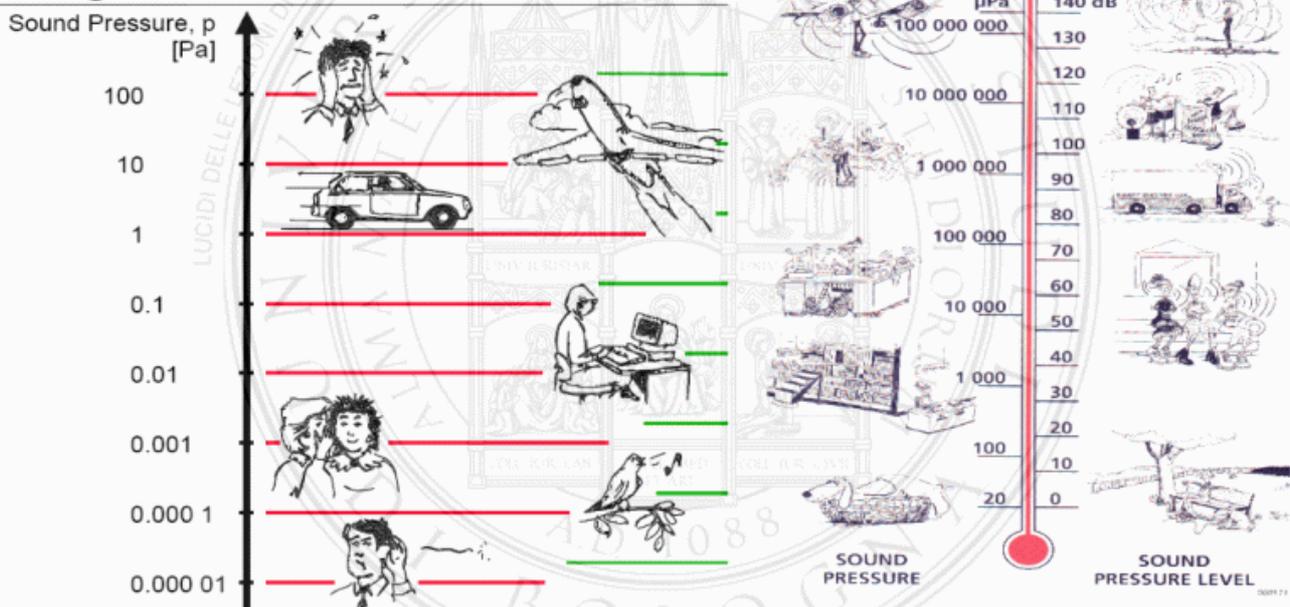


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Le sorgenti sonore generano suoni in un certo campo di frequenze

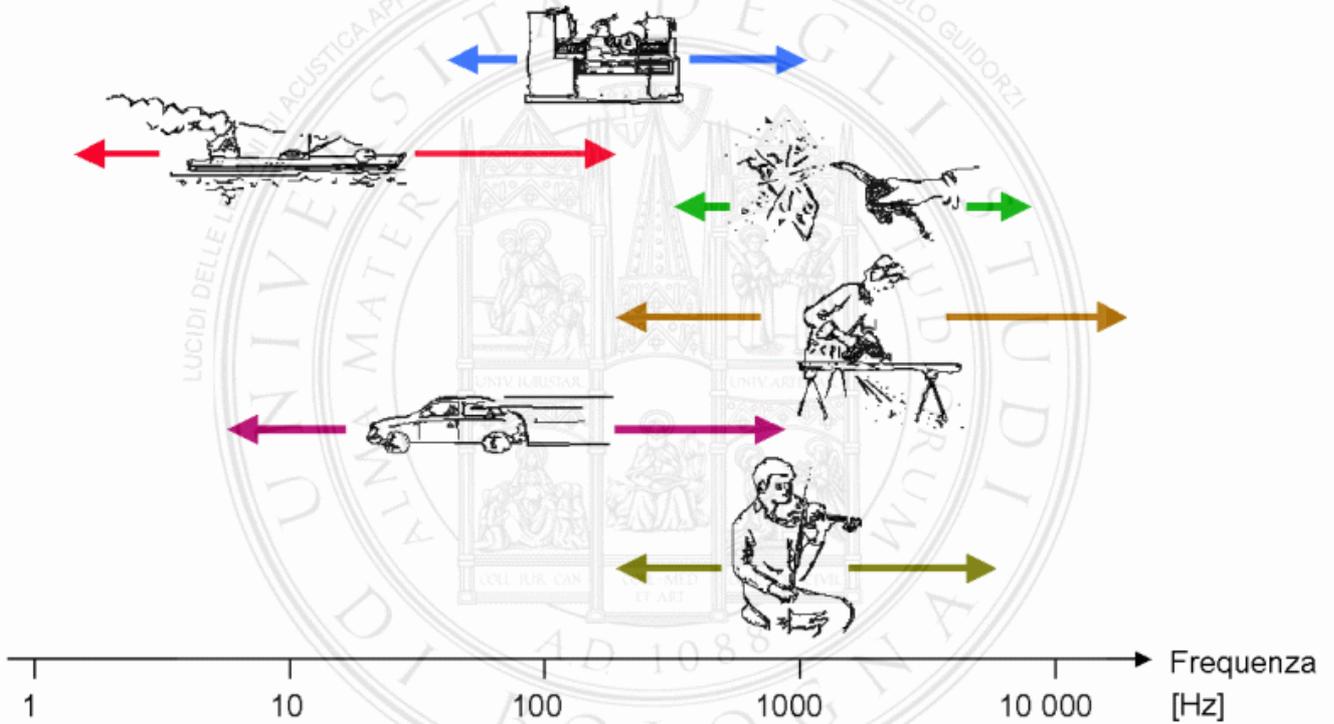


Image Courtesy of Brüel & Kjær

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

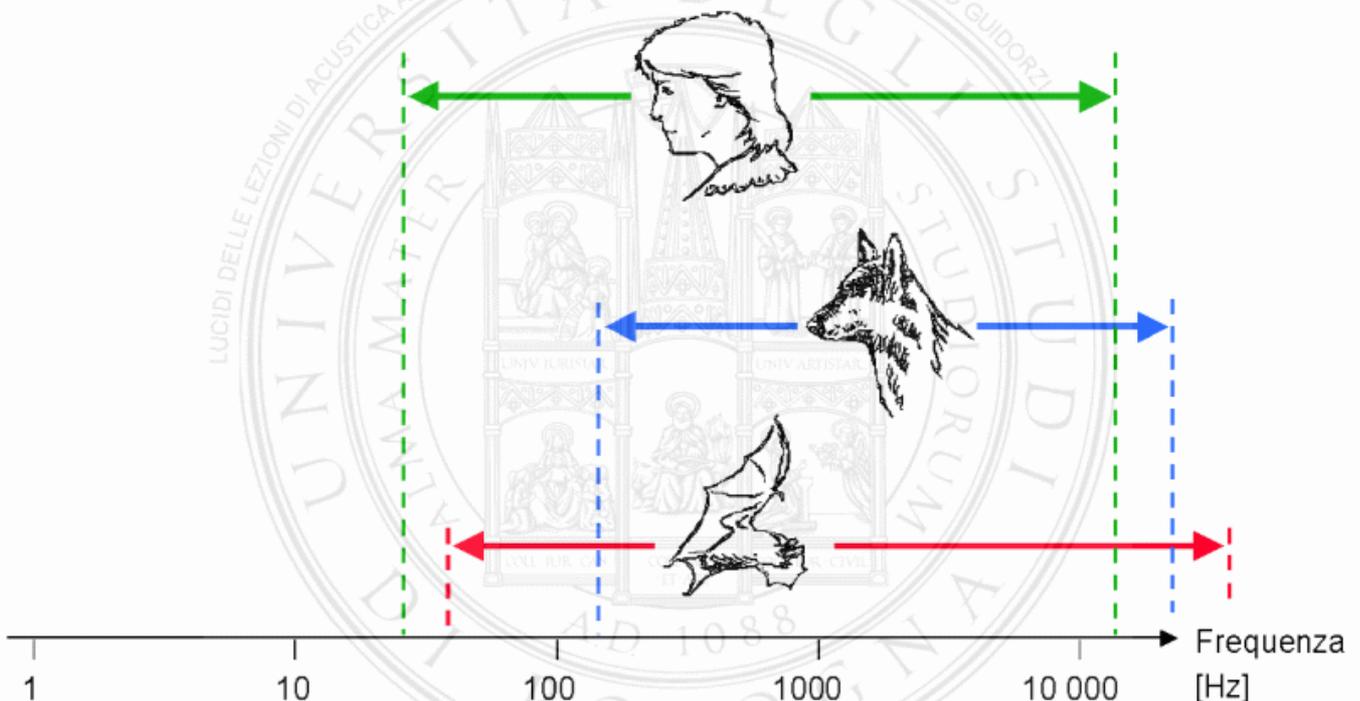


Image Courtesy of Brüel & Kjær

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

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

$$\text{Dinamica: } \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{200}{20 \cdot 10^{-6}} = 10^7 = 10.0000.000$$

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



Scala dei decibel

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

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

- 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

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

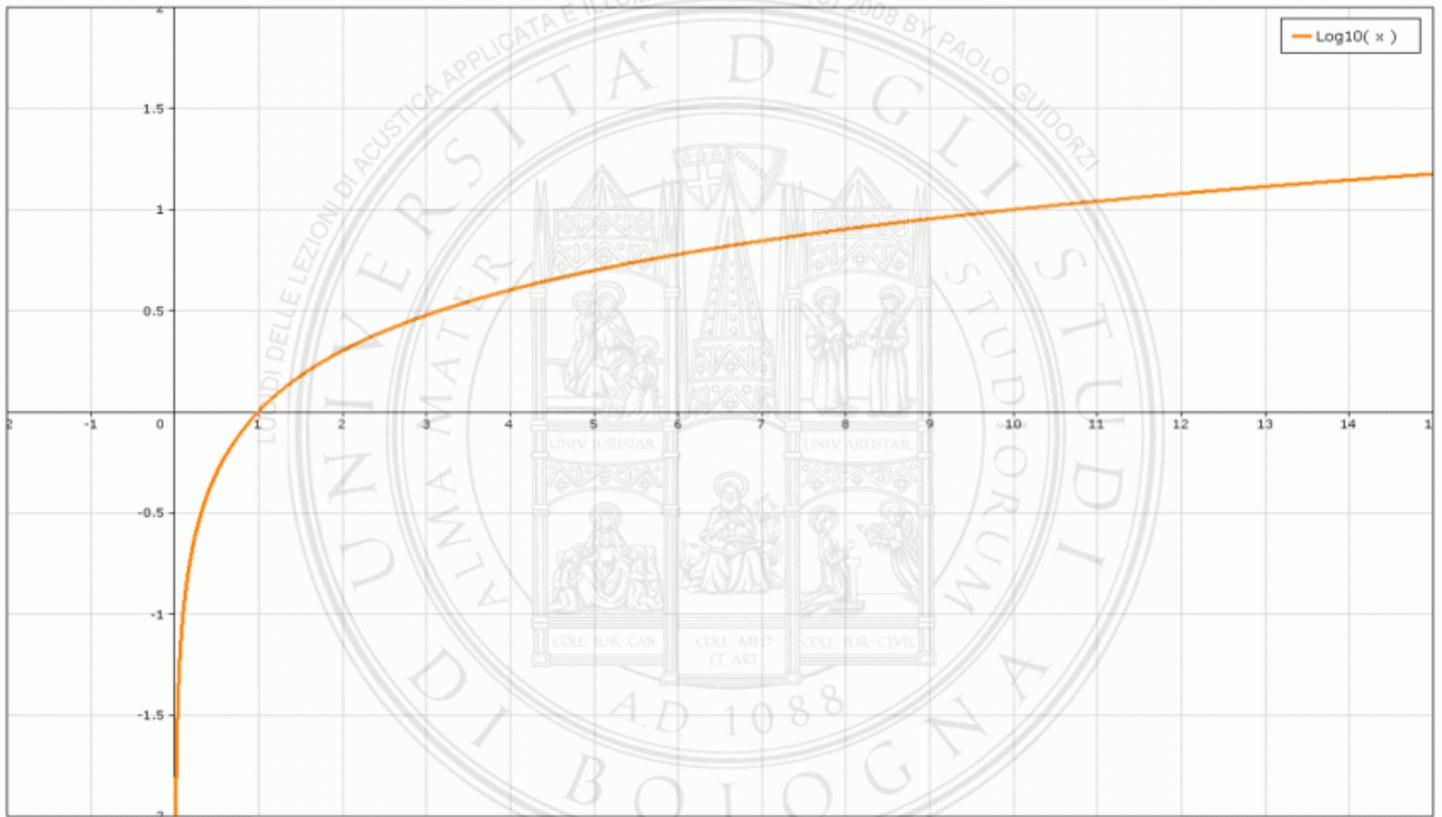
- Si comprime la dinamica con la funzione logaritmica

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

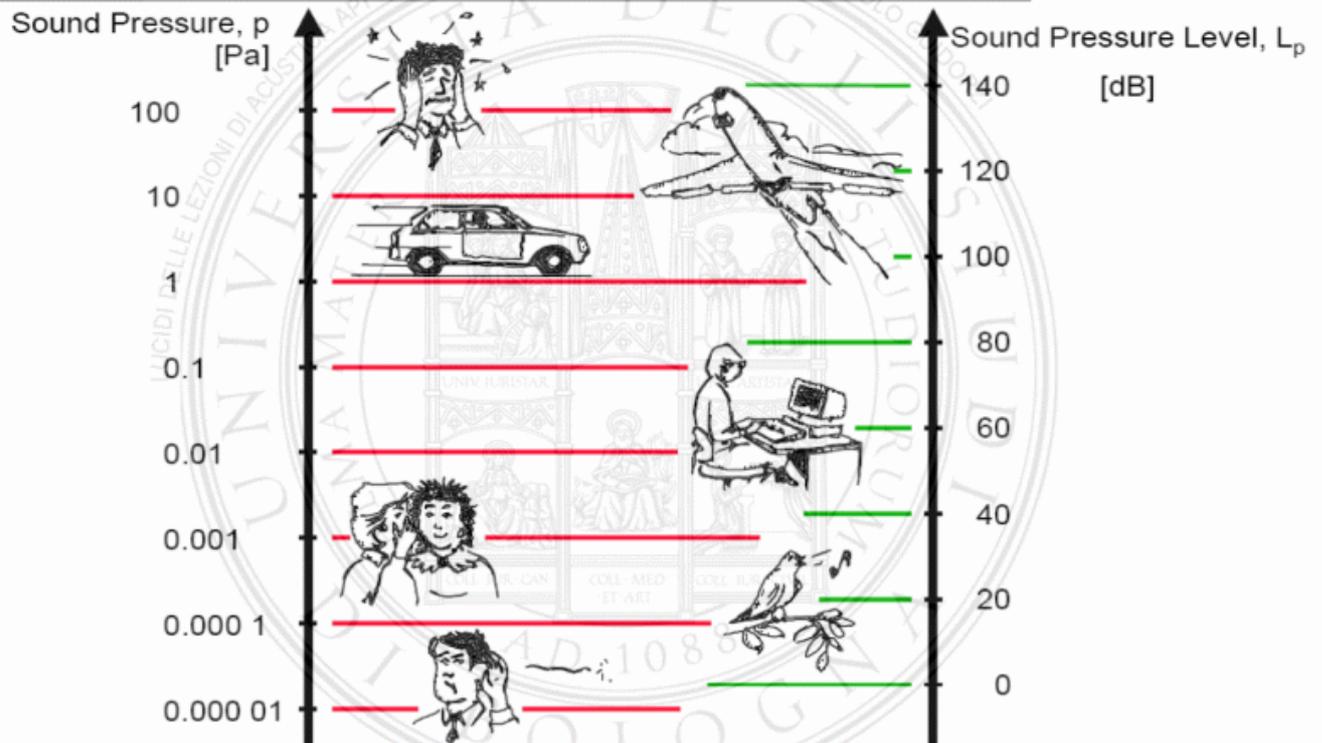
- Si espande di nuovo la dinamica di un fattore 10

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

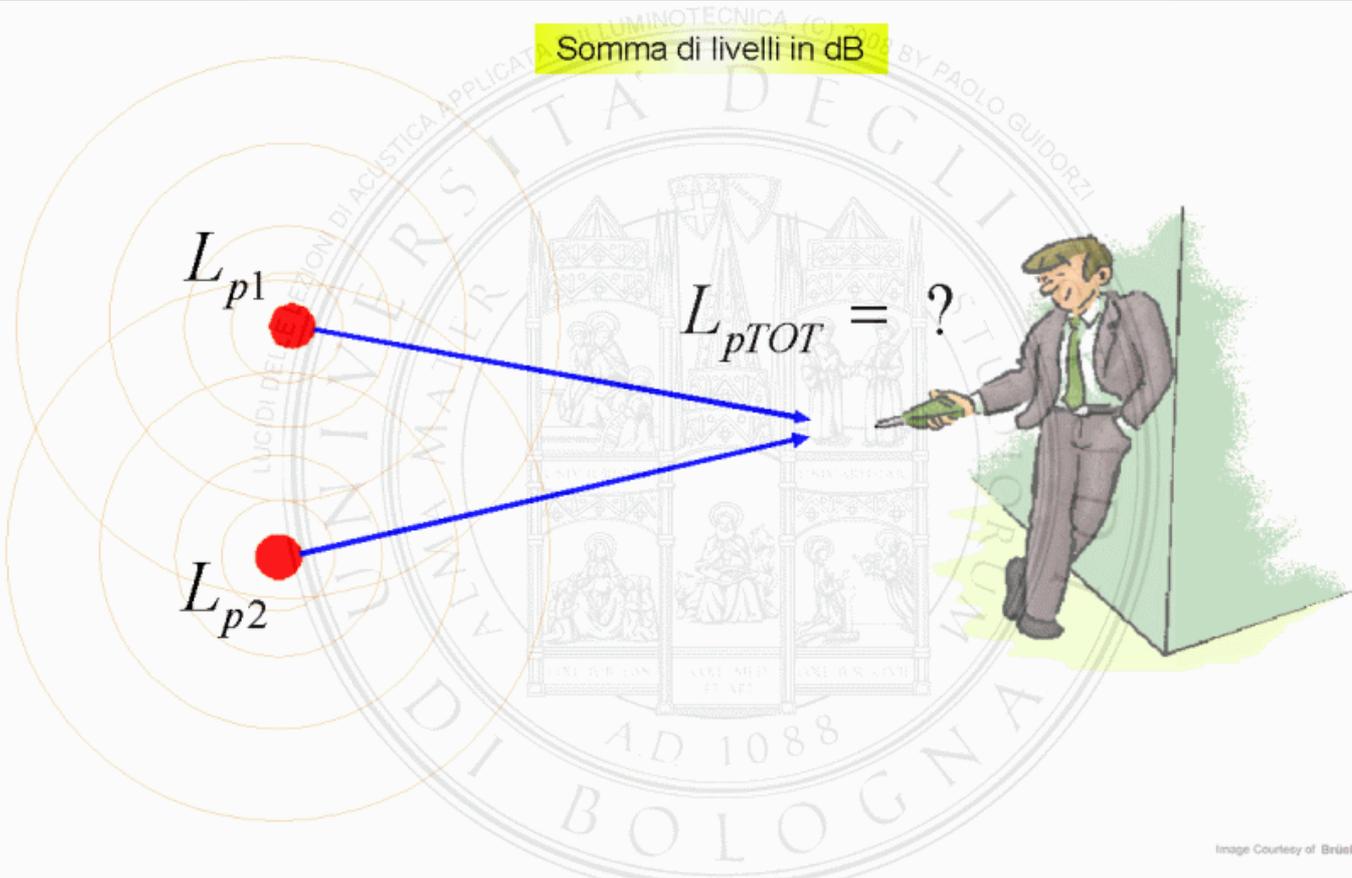


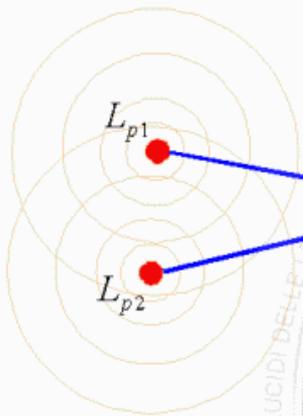


### Range of Sound Pressure Levels



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)



 $L_{pTOT} = ?$ 

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

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

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

**NO!**

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

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

Proprietà dei logaritmi



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

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

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

**OK**

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

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

**NO!**

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

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



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

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

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

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

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

$$L_{pTOT} = 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{80}{10}} \right) = 10 \log_{10} \left( 10^8 + 10^8 \right) = 10 \log_{10} \left( 2 \cdot 10^8 \right) =$$

$$= 10 \log_{10} (2) + 10 \log_{10} (10^8) = 10 \cdot 0,3 + 8 \cdot 10 \log_{10} (10) = 3 + 80 \cdot 1 = 83$$



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



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



Image Courtesy of Brüel & Kjær

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

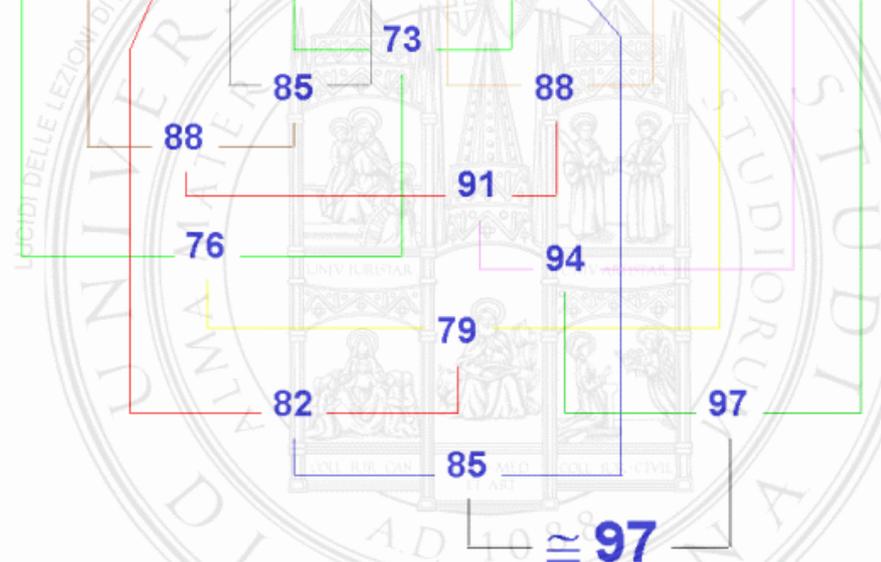


Image Courtesy of Brüel & Kjær

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

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

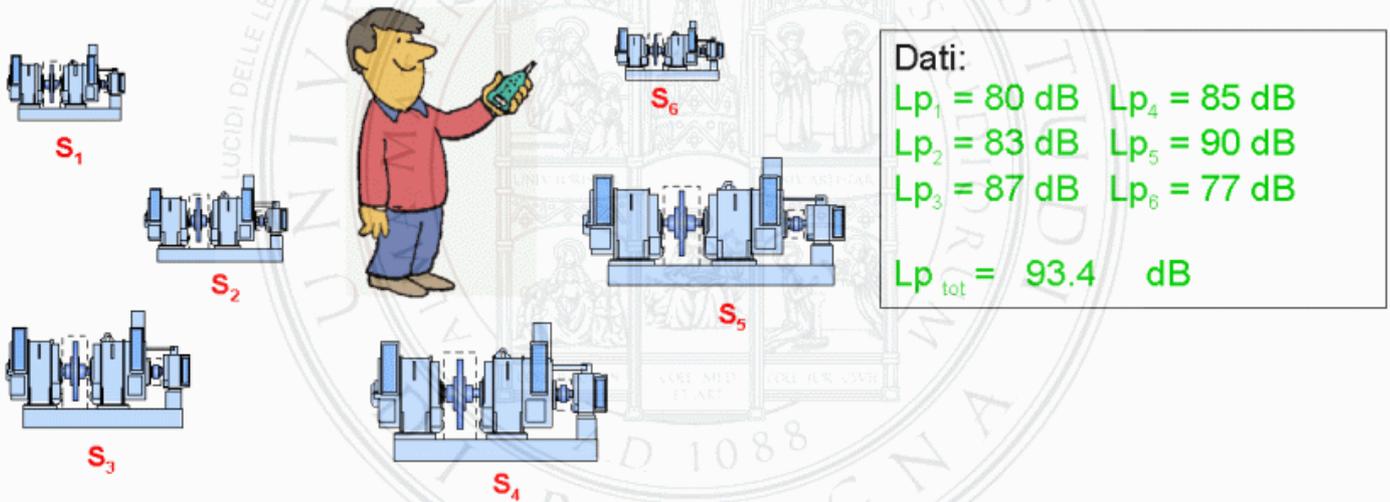


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## Addition of dB Levels

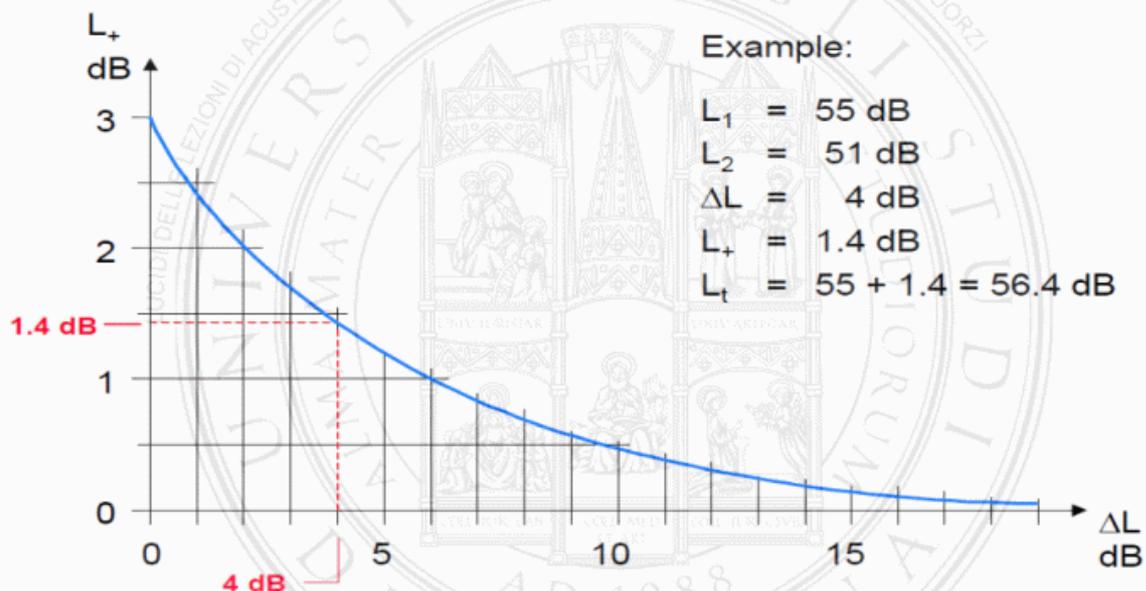


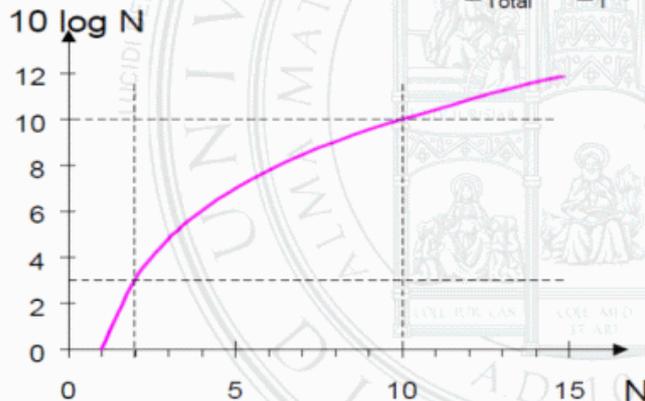
Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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:**

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

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

BA 7666-11, 30

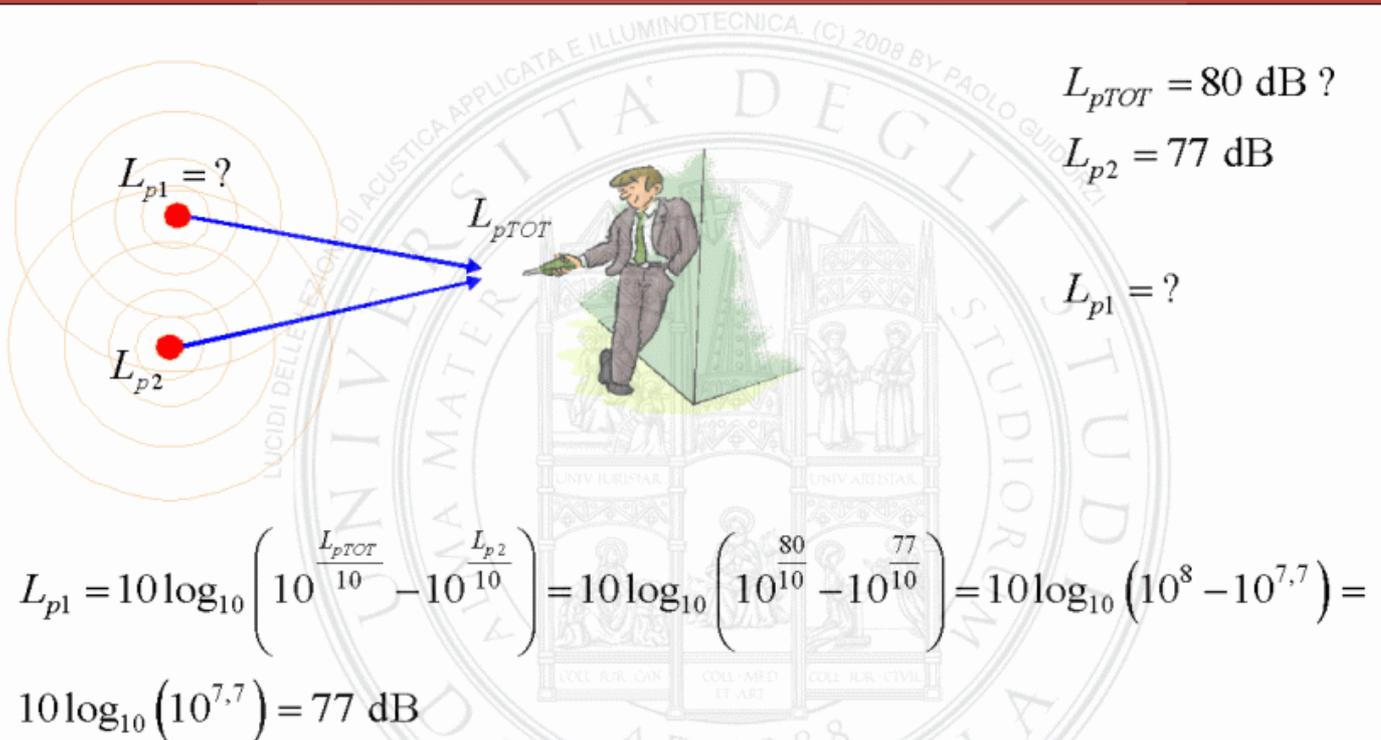
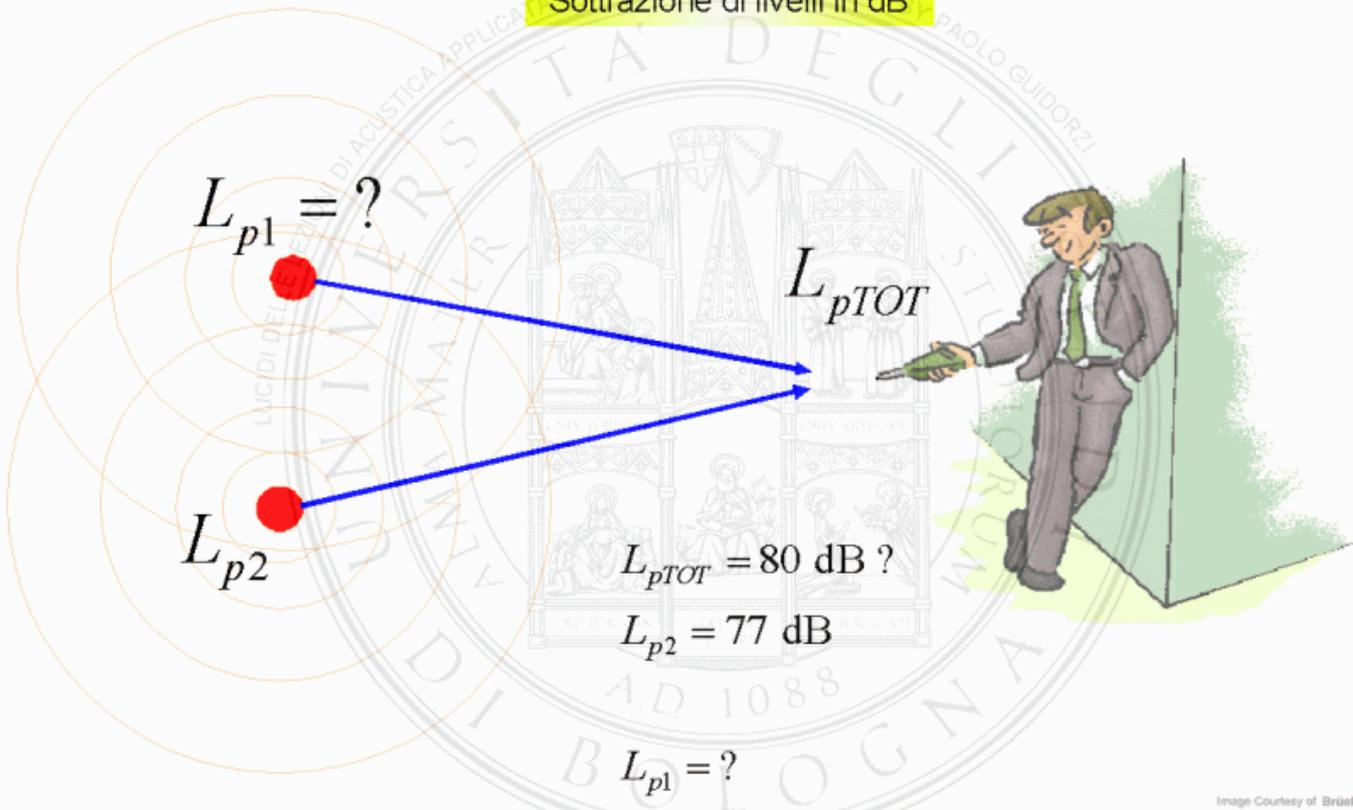
Brüel &amp; Kjær

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

### 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



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

Problema: voglio misurare il rumore prodotto da una sorgente *in situ* ma non è possibile eliminare il rumore di fondo (ad esempio all'interno di un'industria o nei pressi di una strada). E' però possibile accendere e spegnere la sorgente di cui si vuole misurare il livello sonoro.

Sia il **livello di rumore ambientale**  $L_{S+N}$  il livello sonoro prodotto da tutte le sorgenti di rumore esistenti nel luogo, ovvero comprendente sia il rumore di fondo che il rumore prodotto dalla sorgente che voglio misurare.

Sia il **livello di rumore residuo**  $L_N$  il livello sonoro che si rileva quando si esclude la specifica sorgente da misurare.

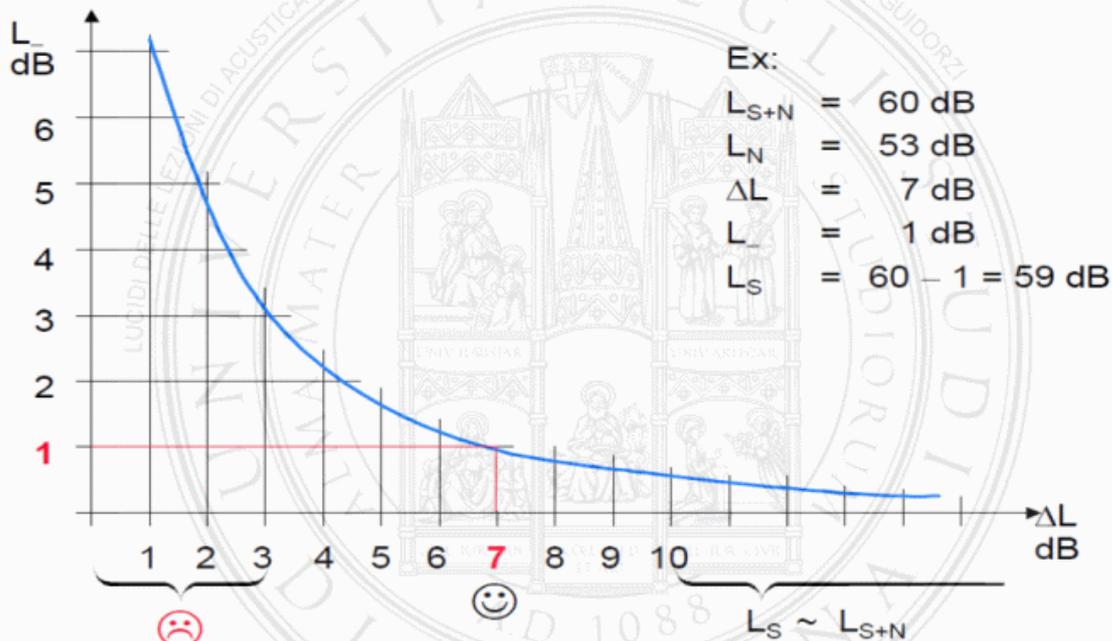
Quando la differenza tra il livello di rumore ambientale e residuo è meno di 3 dB, il livello della sorgente specifica  $L_S$  non è misurabile perché il rumore di fondo è troppo alto.

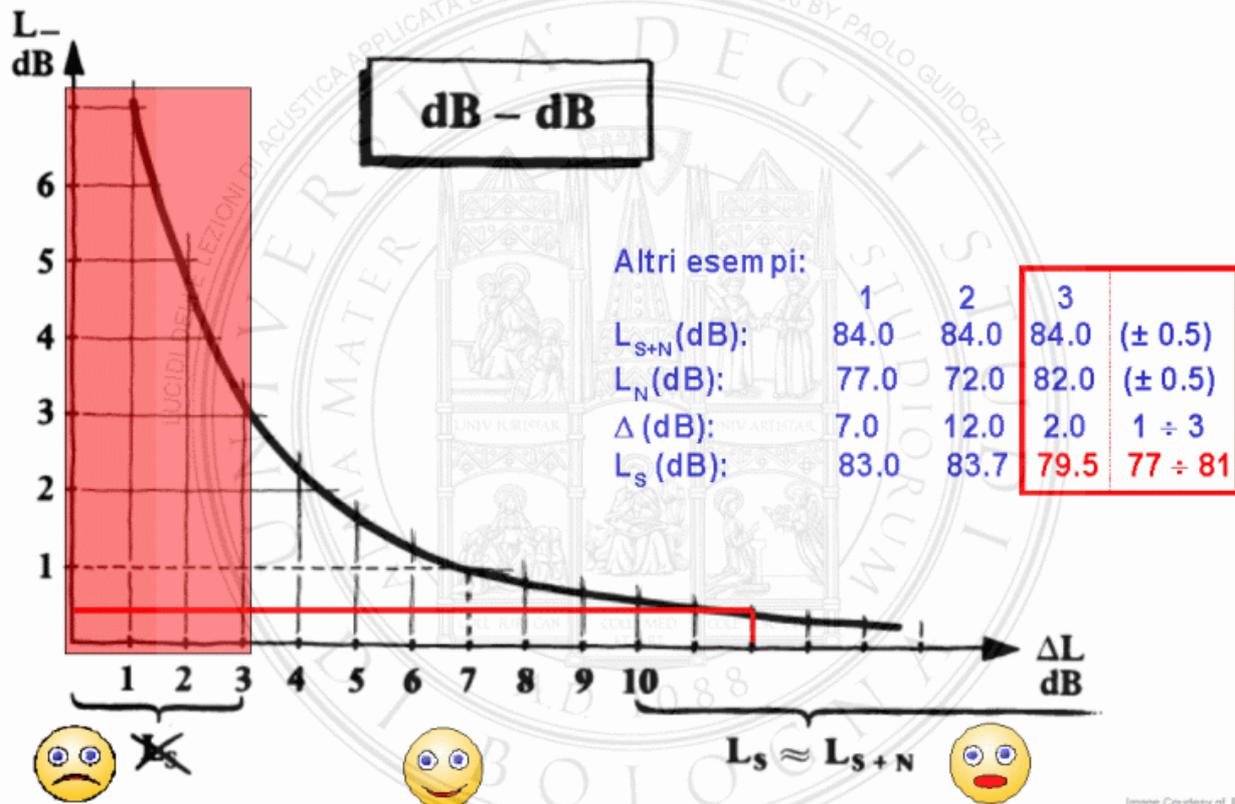
$$L_{S+N} - L_N \leq 3 \text{ dB} \Rightarrow L_S \text{ non misurabile}$$

$$L_{S+N} - L_N \geq 10 \text{ dB} \Rightarrow L_N \text{ trascurabile } (L_S \cong L_{S+N})$$

$$0 \text{ dB} \leq L_{S+N} - L_N \leq 10 \text{ dB} \Rightarrow L_S = 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{L_{S+N}}{10}} - 10^{\frac{L_N}{10}} \right)$$

## Subtraction of dB Levels





## Esempi di somme e sottrazioni di livelli in dB

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

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

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

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

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

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

$$= 10 \log_{10} (100000000 + 0,00000001) = 10 \log_{10} (100000000,00000001) \cong 80$$

## Esempi di somme e sottrazioni di livelli in dB

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

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

$$= 10 \log_{10} (100000000 - 0,00000001) = 10 \log_{10} (99999999,99999999) \cong 80$$

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

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

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

$$10 \log_{10} (10^8 - 10^{7,999999999999999565705518096748}) = 10 \log_{10} (100000000 - 99999999,99999999)$$

$$= 10 \log_{10} (0,00000001) = 10 \log_{10} (10^{-8}) = -80 \text{ dB}$$



## Esempi da ricordare a memoria

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

## Esercizi da fare senza il calcolatore

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

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



IS ANYONE  
OUT THERE  
LISTENING?

## Caso generale di somma o sottrazione di N sorgenti:

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



## Livelli di potenza e intensità

$$L_W = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) \text{ dB} \quad W_0 = 10^{-12} [\text{W}]$$

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ dB} \quad I_0 = 10^{-12} [\text{W/m}^2]$$

Dalla relazione che lega pressione acustica e intensità si può ricavare:

$$\langle I \rangle = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 c} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \Rightarrow L_I = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 c \cdot I_0} \text{ dB}$$

Se  $\rho_0 c = 400$  rayl (impedenza dell'aria a 39 gradi, pressione 101325 Pa), il valore numerico del **livello di pressione** e del **livello di intensità** coincidono.

$$L_I = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{400 \cdot 10^{-12}} = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{(20 \cdot 10^{-6})^2} = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = L_p \text{ (dB)}$$

Per valori di temperatura e pressione vicini a quelli citati, la differenza tra valori numerici di livello di intensità e livello di pressione è di frazioni di dB e quindi accettabile ai fini pratici.

$$\langle I \rangle = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 c} = \frac{p_{MAX}^2}{2\rho_0 c}$$

Sorgente	Intensità (W/m <sup>2</sup> )	Liv. di pressione (dB)
Aereo Jet	100	140
Soglia del dolore	1	120
Sirena	1 · 10 <sup>-2</sup>	100
Traffico stradale	1 · 10 <sup>-5</sup>	70
Conversazione	3 · 10 <sup>-6</sup>	65
Bisbiglio	1 · 10 <sup>-10</sup>	20
Foglie mosse dal vento	1 · 10 <sup>-11</sup>	10
Soglia di udibilità	1 · 10 <sup>-12</sup>	1

## Livello di densità

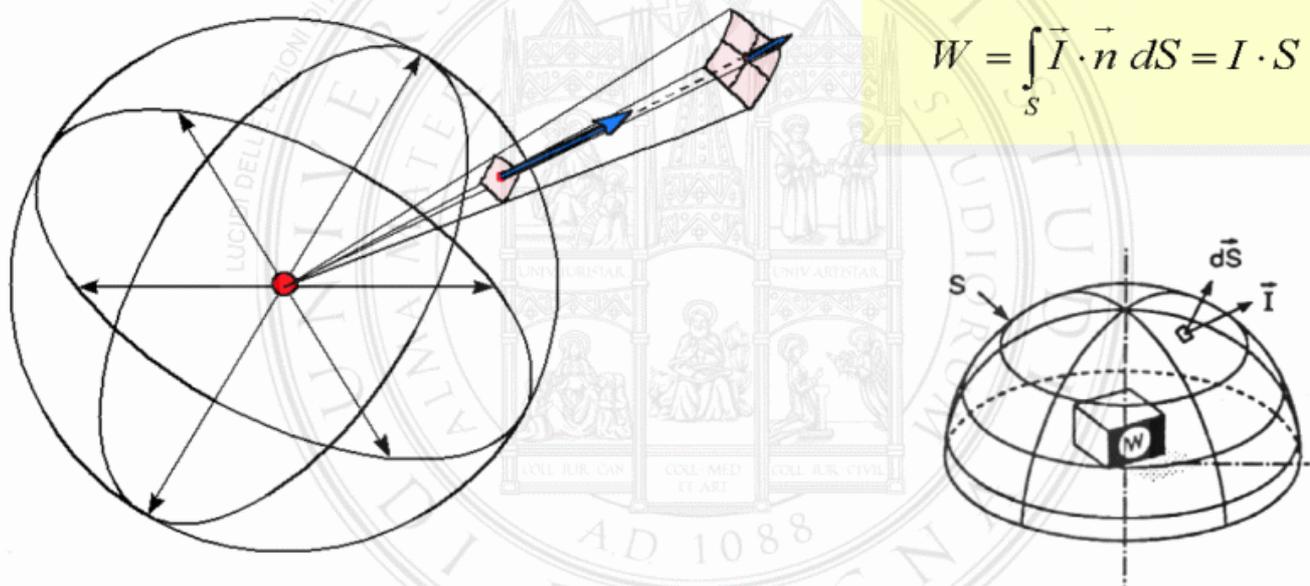
$$D = \frac{I}{c}$$

$$L_D = 10 \log_{10} \left( \frac{D}{D_0} \right) \text{ dB} \quad D_0 = 2,94 \cdot 10^{-15} \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right]$$

In condizioni normali e per un'onda piana progressiva, i valori numerici del **Livello di Pressione**, del **Livello di Intensità** e del **Livello di Densità** coincidono o sono molto simili e quindi si possono considerare uguali ai fini pratici.

Nel caso generale il livello di intensità è minore del livello di densità.

L'intensità è una grandezza vettoriale  $\vec{I} = p\vec{u}$  e dipende quindi dalla direzione.



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

$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS = 0$$

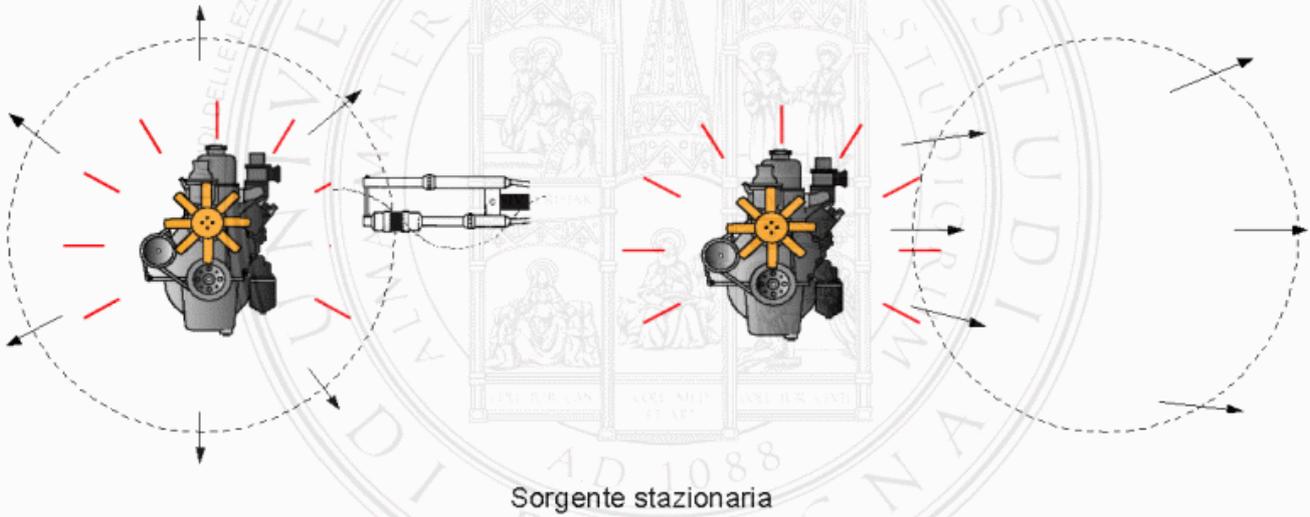
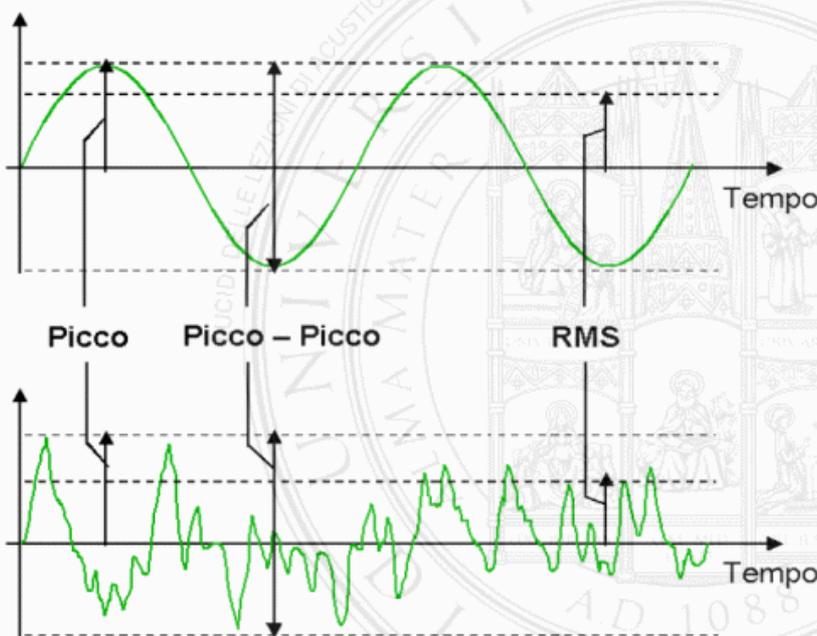


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## Descrizione del fenomeno sonoro



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

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

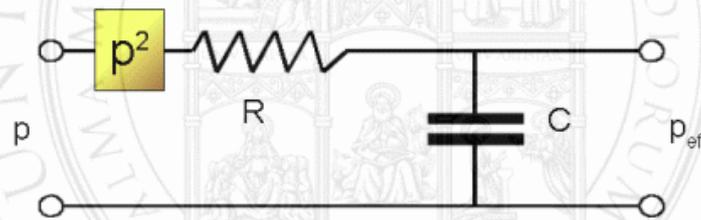
Gli strumenti di misura implementano due diverse soluzioni di integrazione dei valori istantanei di pressione acustica:

- 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



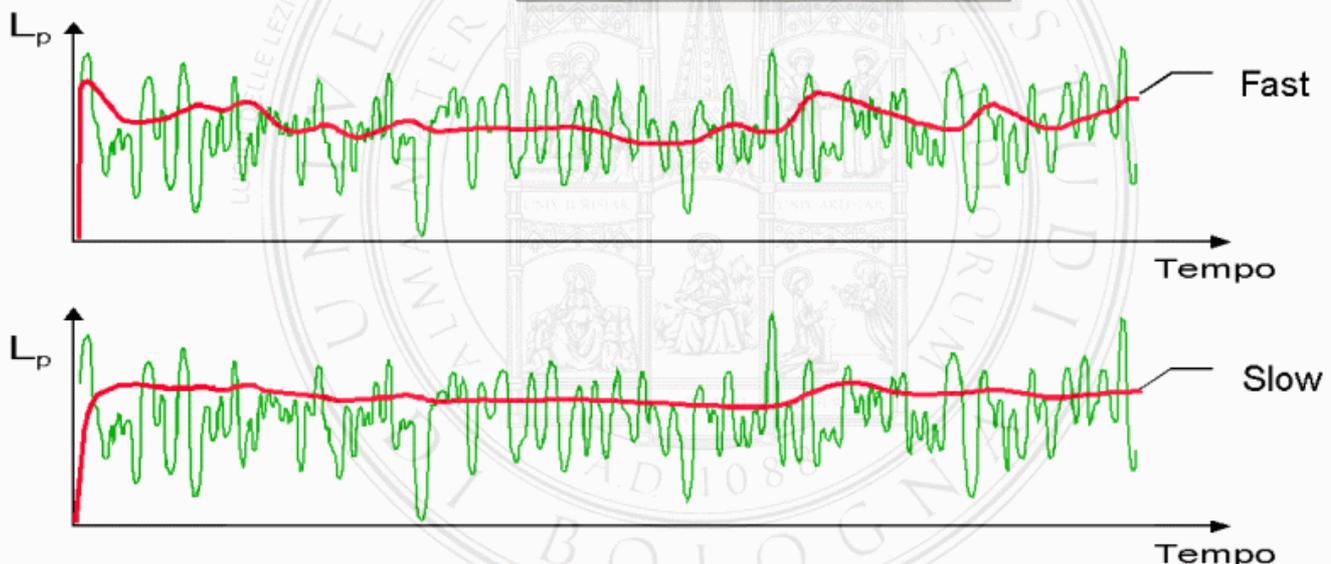
La risposta di tale circuito ha andamento temporale esponenziale e dipende dal prodotto RC.

#### 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  $\mu$ s



Lettura sul display digitale dello strumento di misura

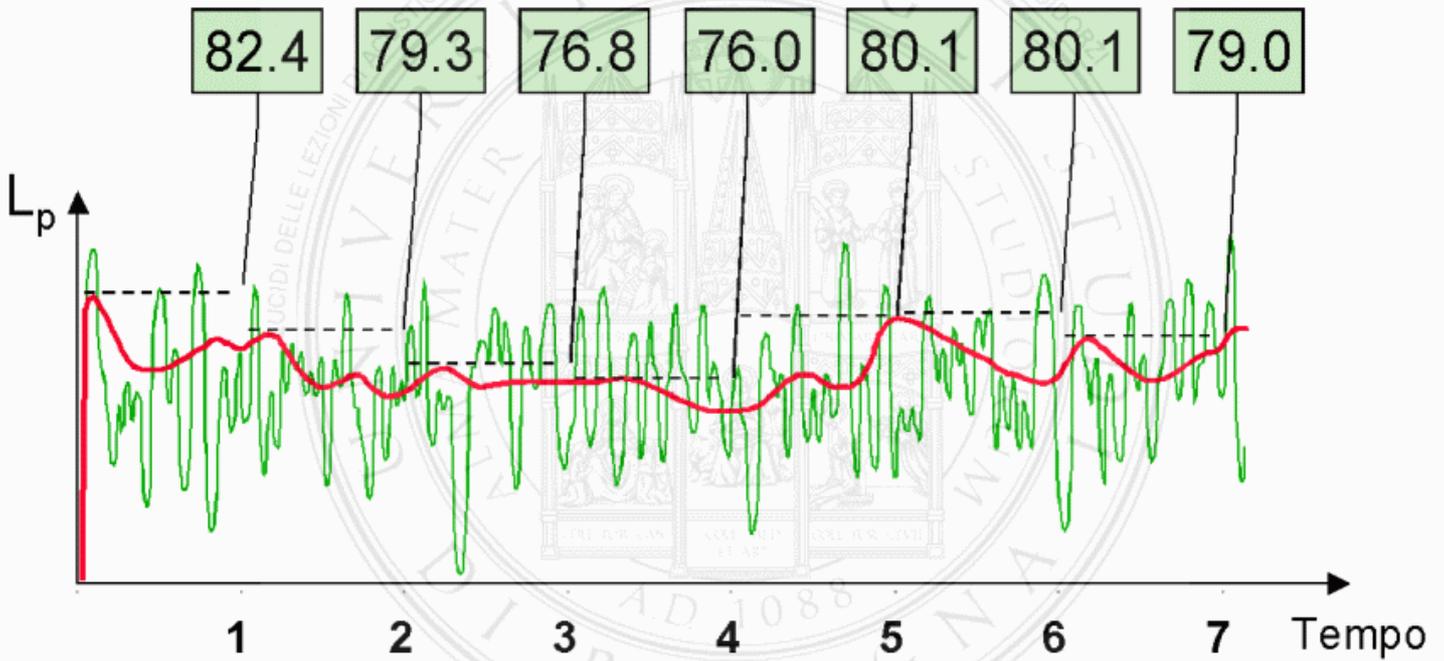


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Risposta dello strumento

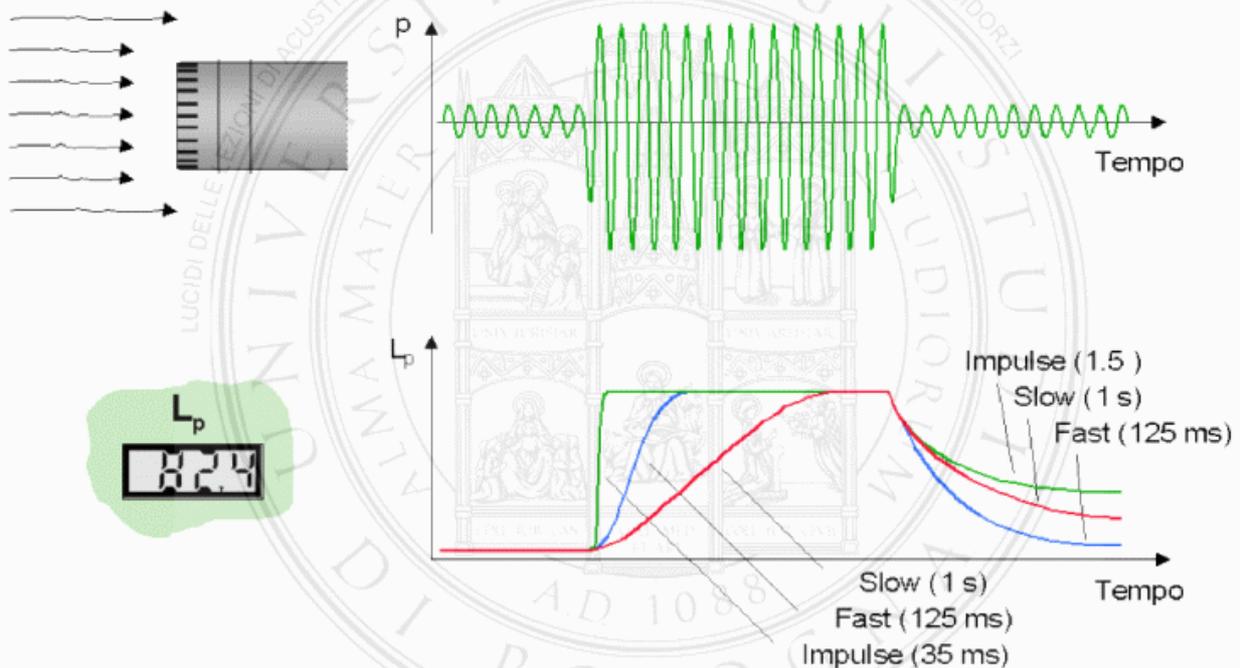


Image Courtesy of Brüel & Kjær

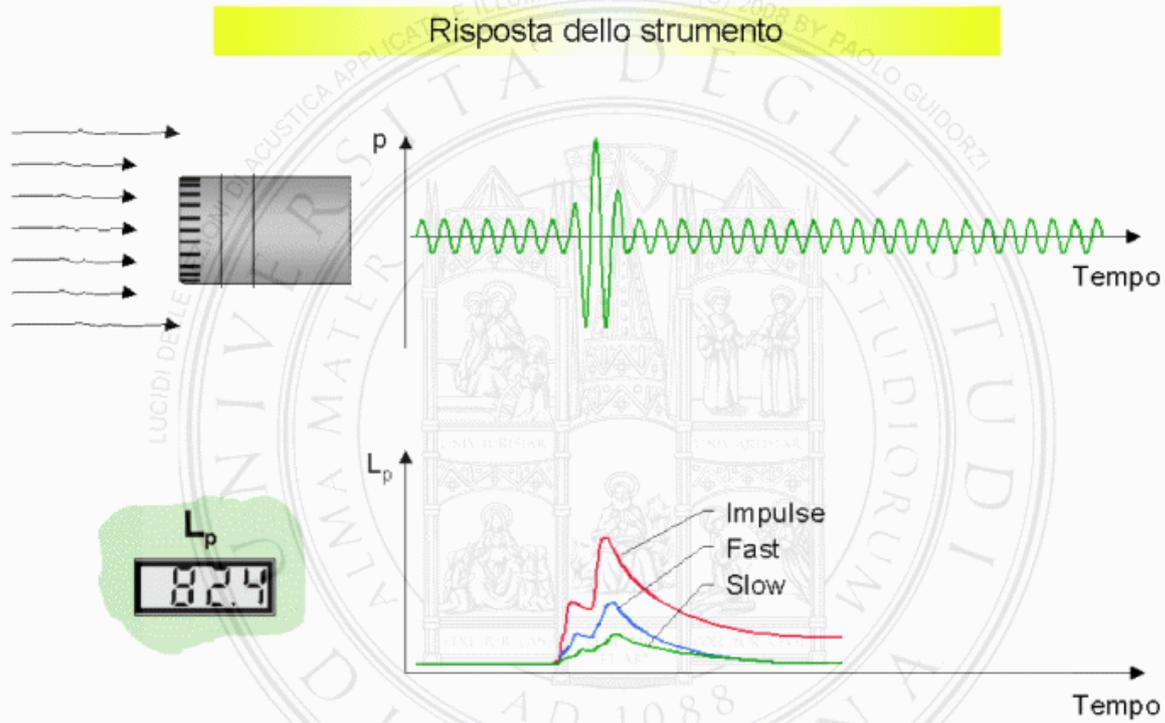
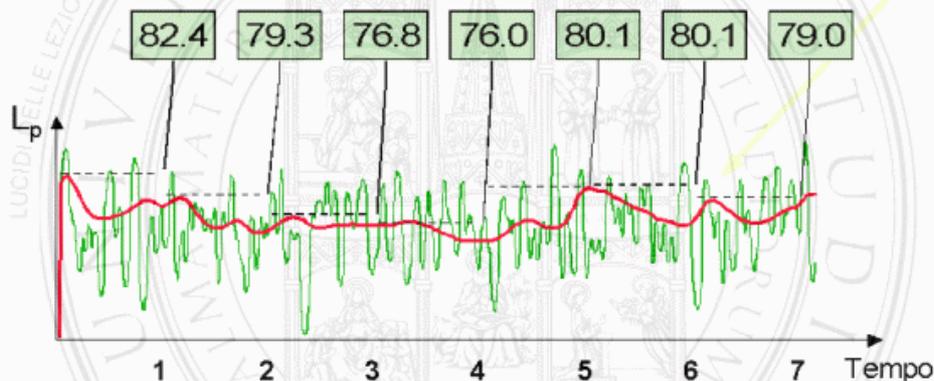


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## INTEGRAZIONE LINEARE

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

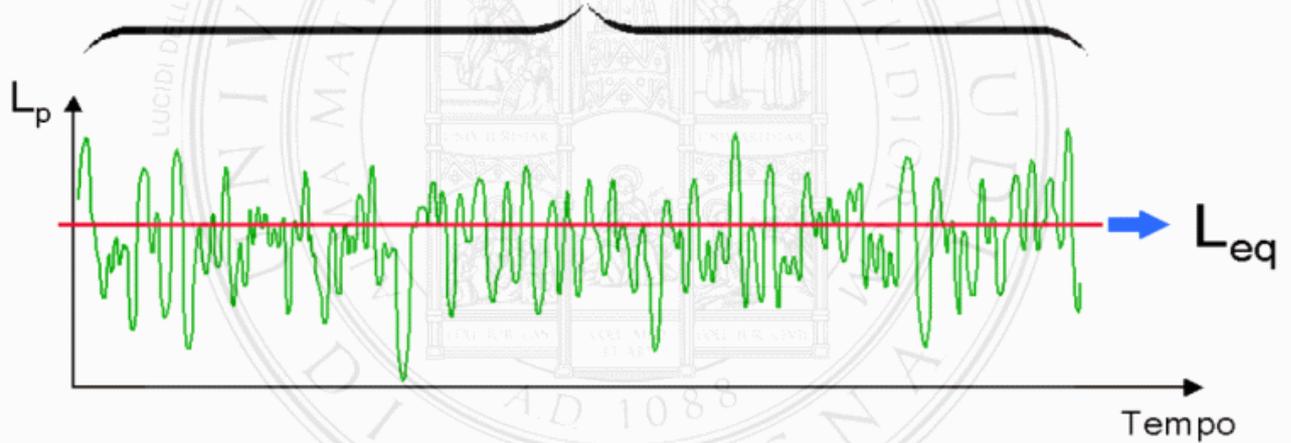
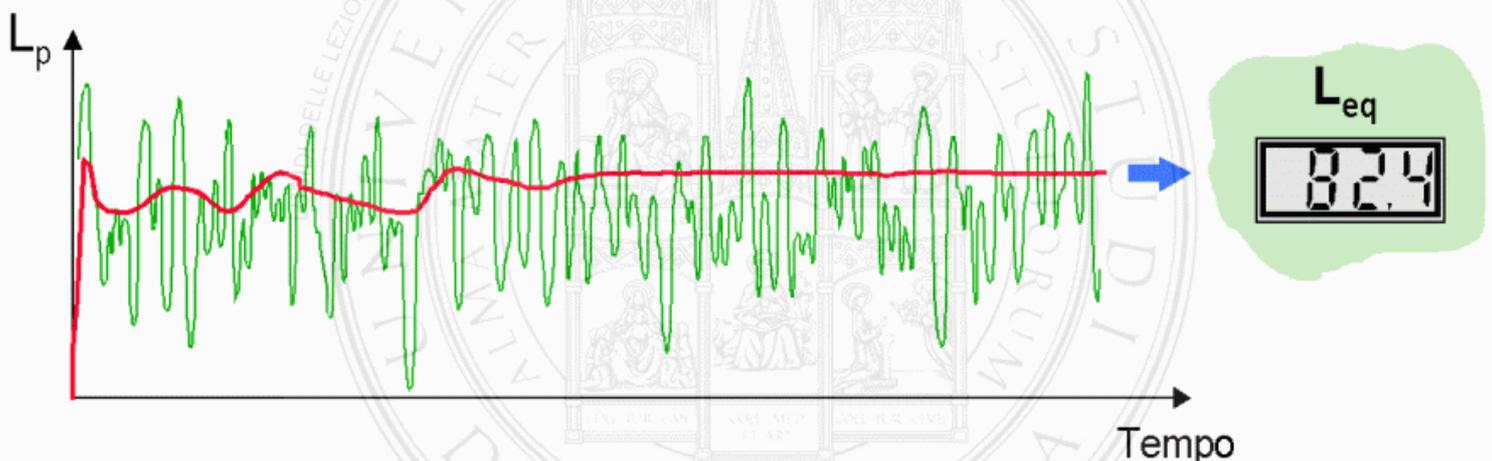


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## INTEGRAZIONE LINEARE

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



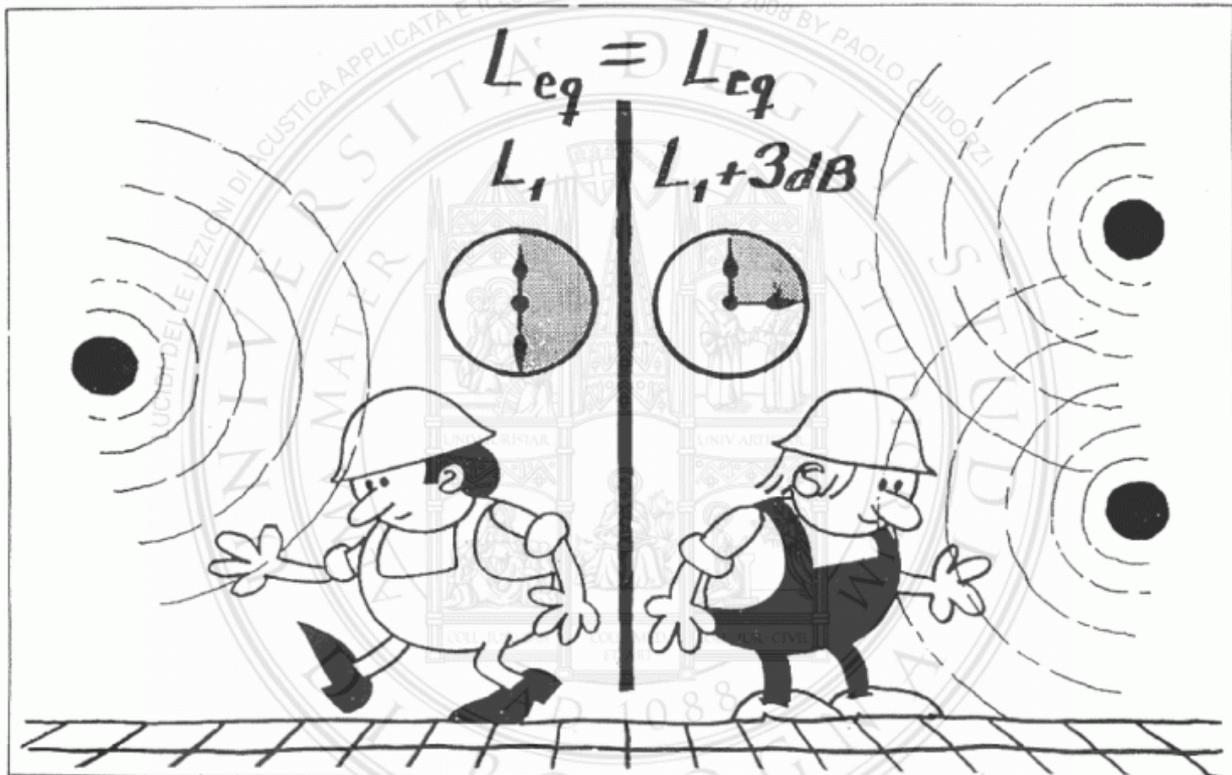
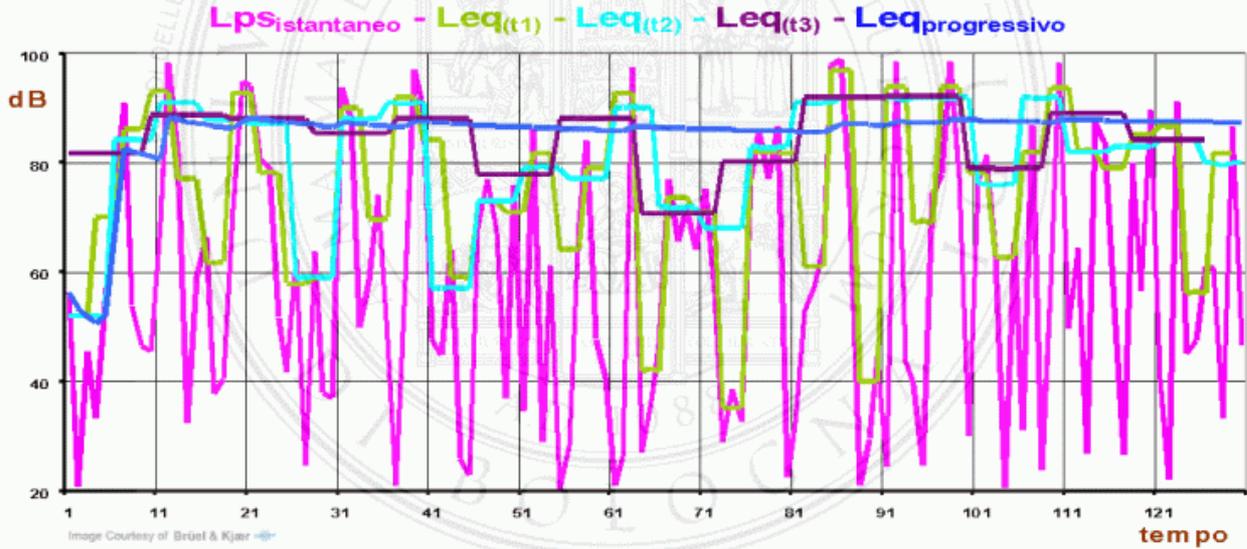
Il  $L_{eq,T}$  va sempre associato al tempo di misura  $T$ .

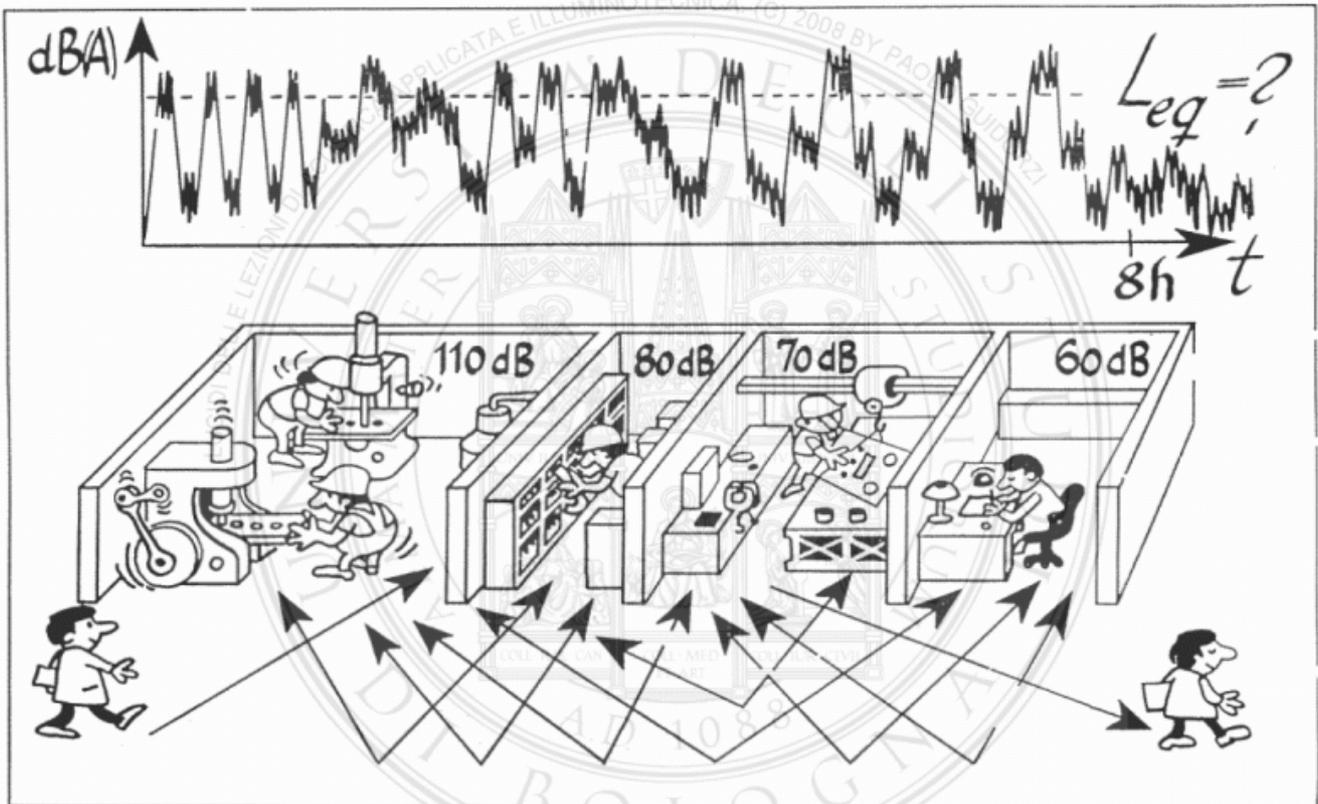
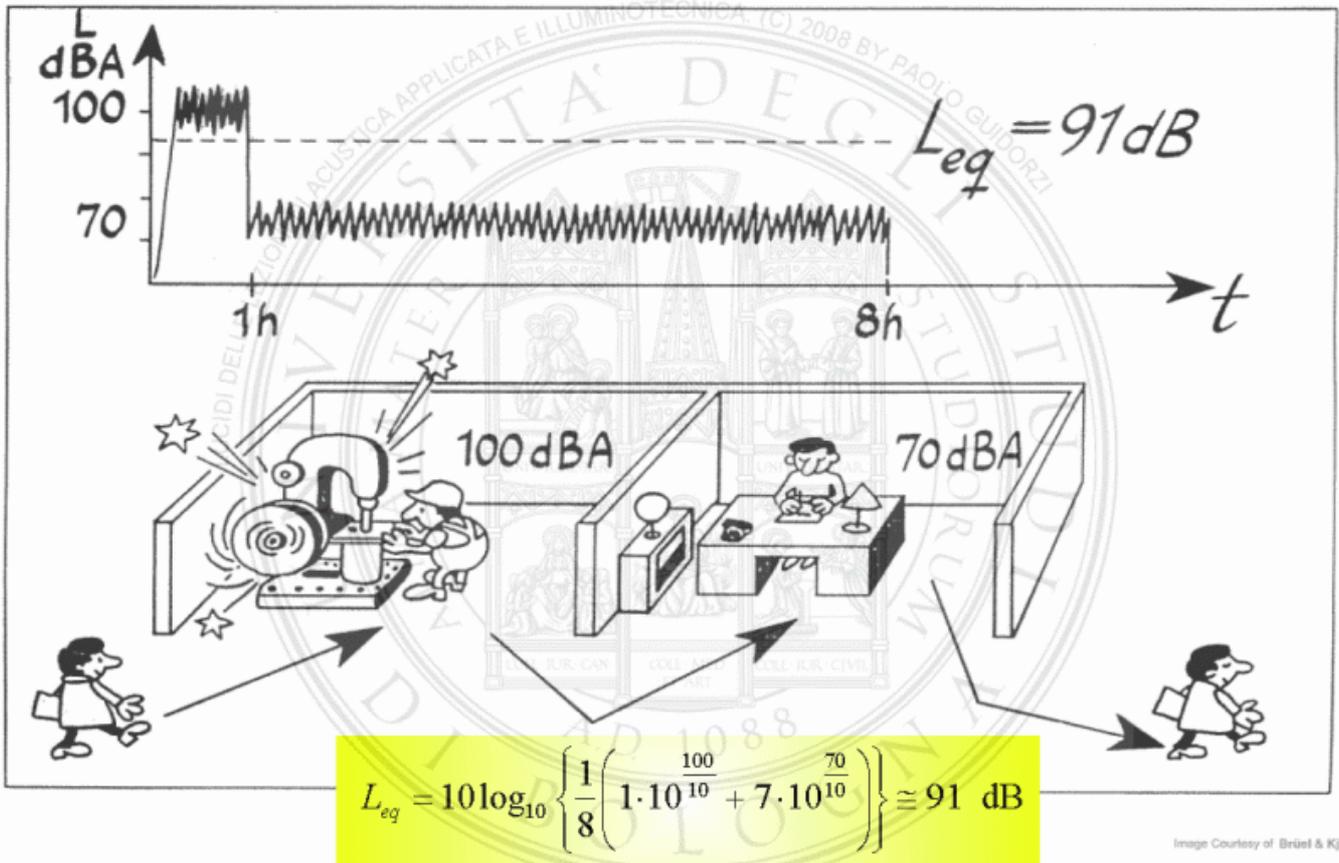
Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**INTEGRAZIONE LINEARE**

$L_{eq,T}$  **progressivo**: si lascia T libero di aumentare, fino a ricoprire l'intero periodo di misura. Ottengo un unico valore di  $L_{eq,T}$  che fornisce l'esatto contenuto energetico del fenomeno sonoro, dall'inizio alla fine della misura.

**Short Leq**: il tempo di media lineare T si fissa molto breve, secondi o frazioni di secondo, e dalla sequenza di valori ottenuti si possono ricostruire gli altri descrittori, quali il  $L_{eq,T}$  progressivo





**SEL**

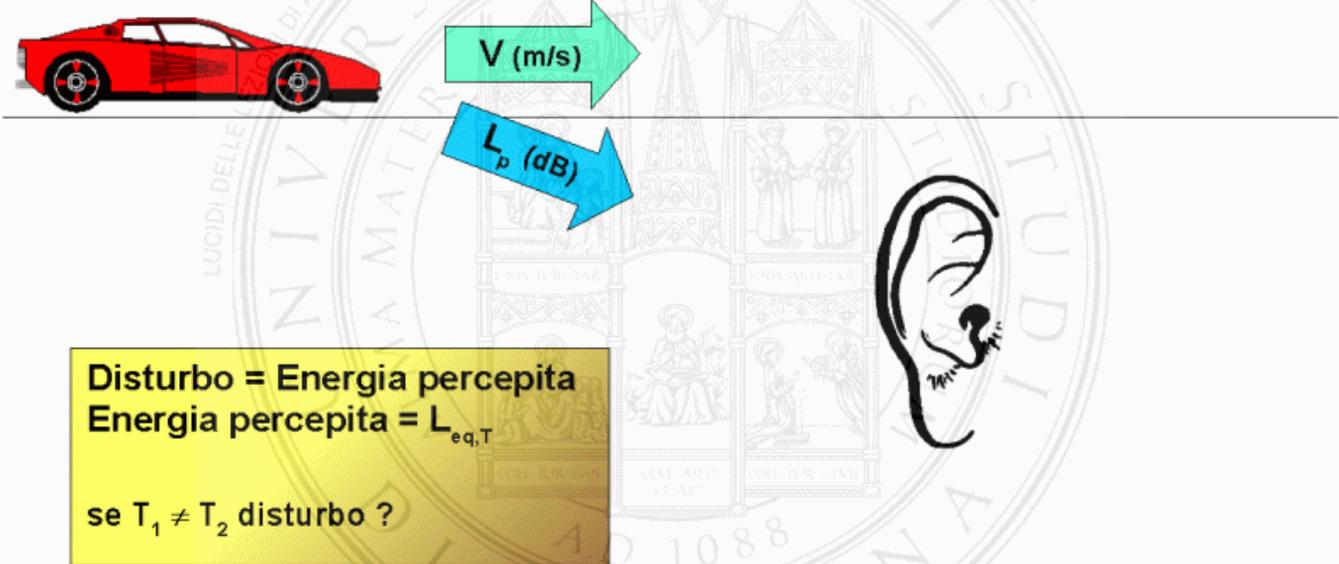


Image Courtesy of Brüel & Kjær

**ORIGINE DEL SEL**

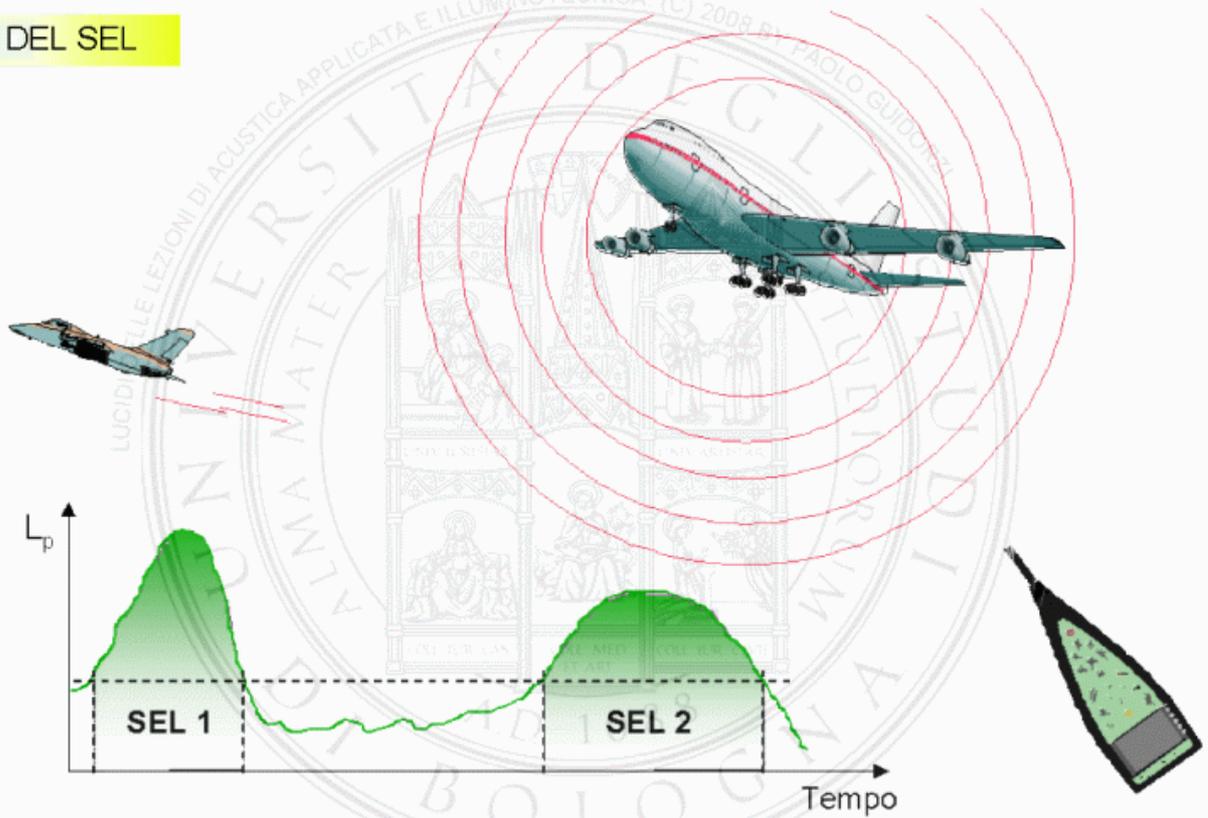


Image Courtesy of Brüel & Kjær

SEL: DESCRITTORE DI UN FENOMENO DI DURATA VARIABILE

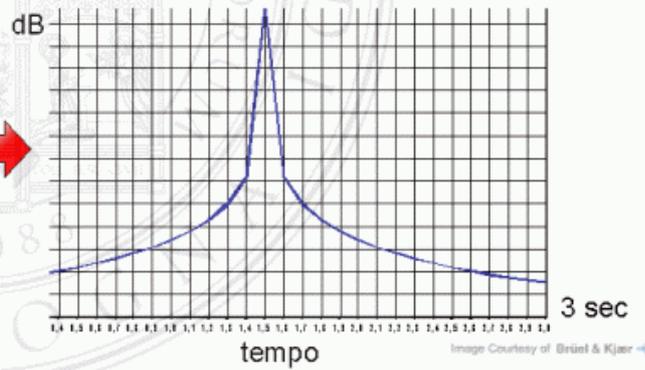
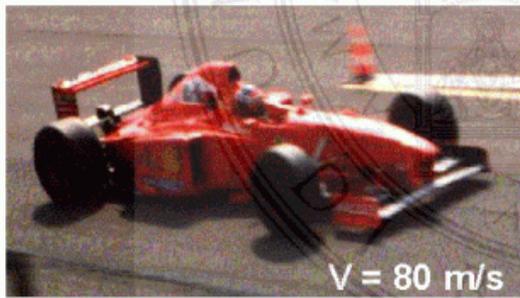
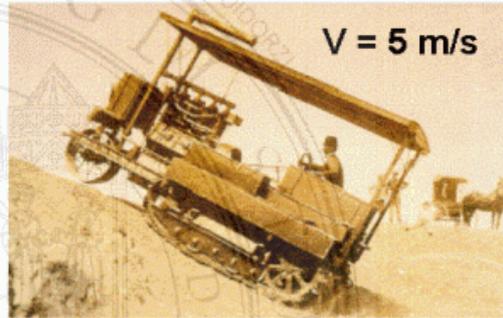
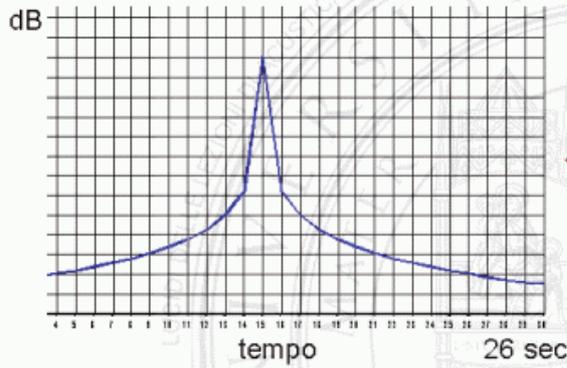


Image Courtesy of Brüel & Kjær

SEL

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

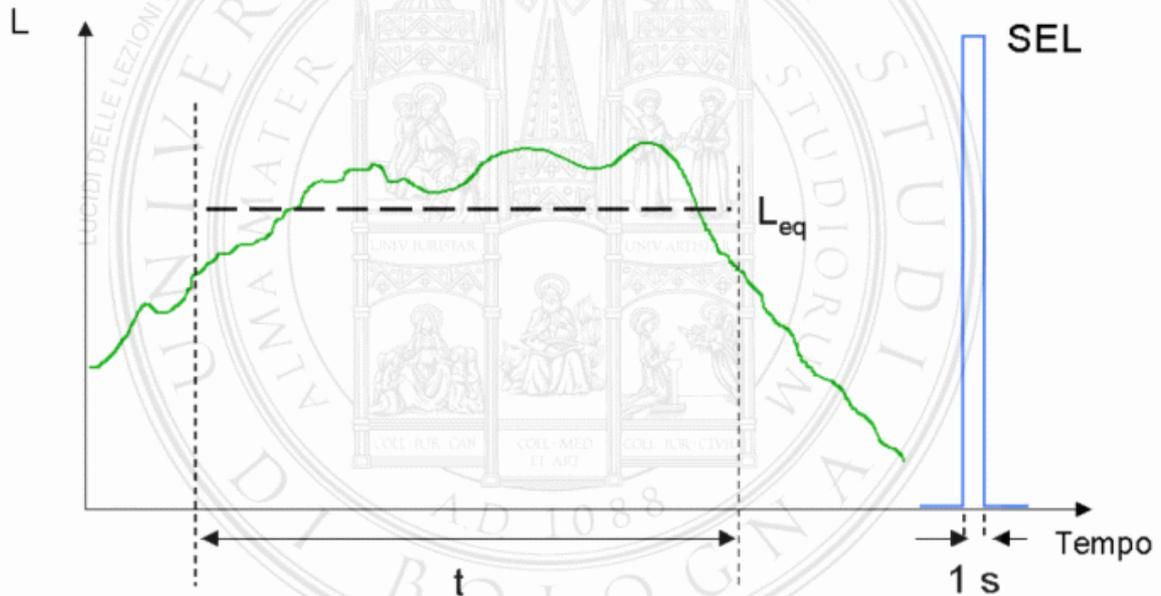
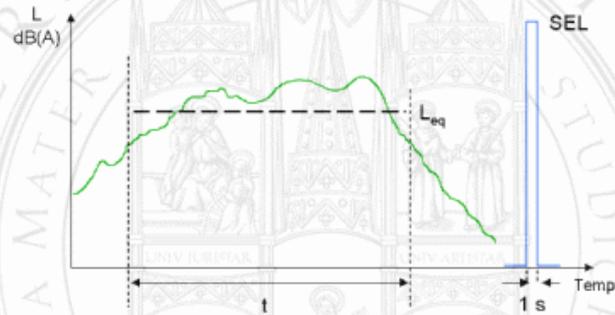


Image Courtesy of Brüel & Kjær

## SEL

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



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:

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

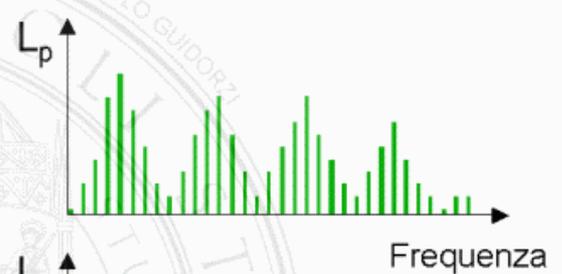
Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

Cosa c'è dentro ai suoni?

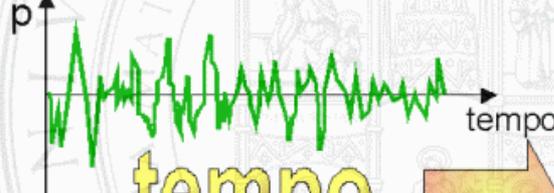
Per scoprirlo occorre fare l'ANALISI IN FREQUENZA..



periodico



casuale



tempo



frequenza?



impulsivo



Frequenza

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



*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

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

***Indice***

ANALISI IN FREQUENZA - IL SISTEMA Uditivo UMANO

Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - Analisi in frequenza
- 3 - Filtri di 1/1 di ottava e 1/3 di ottava
- 4 - Bande normalizzate IEC1260
- 5 - Esempi di suoni e spettri
- 6 - Il sistema uditivo umano
- 7 - Curve isofoniche - Pesatura "A"
- 8 - Pesatura e filtri nel fonometro
- 9 - Descrittori acustici pesati

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

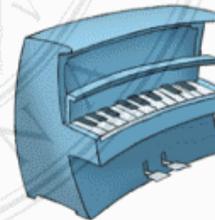
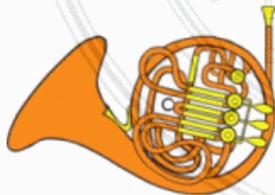


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

Le sorgenti sonore generano suoni in un certo campo di frequenze

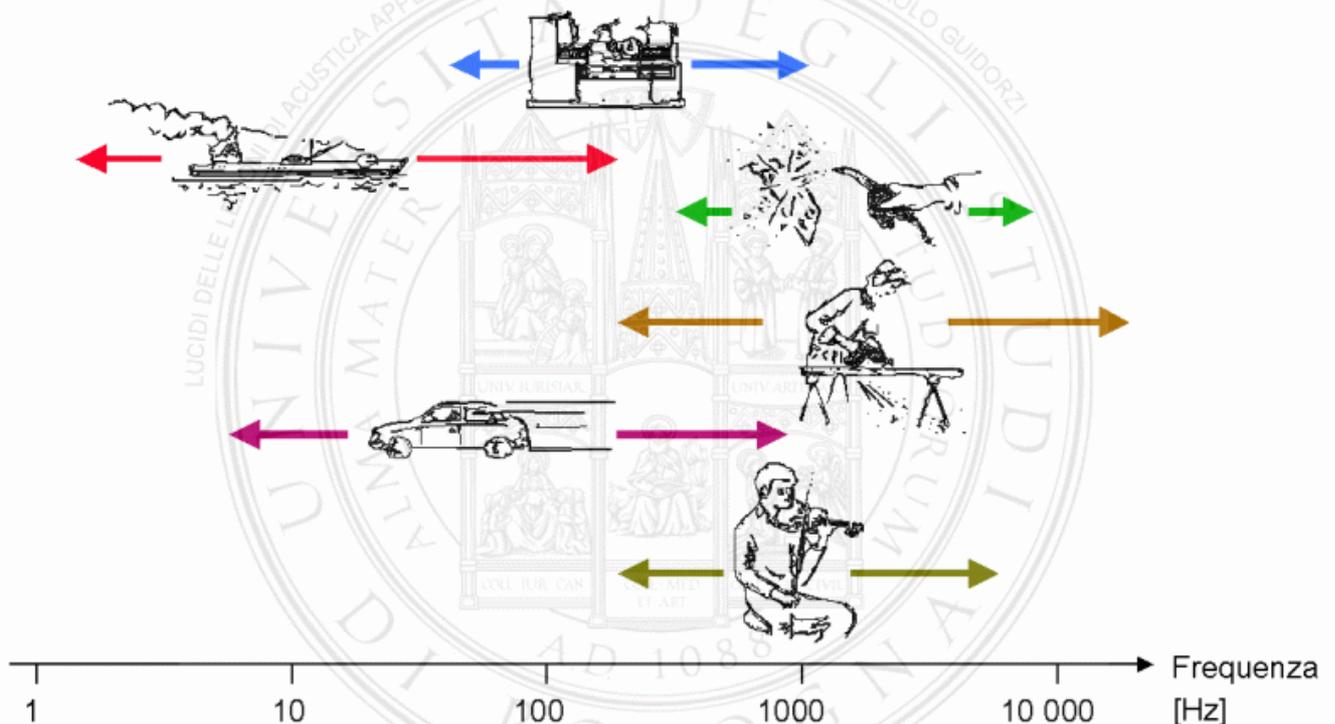


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

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

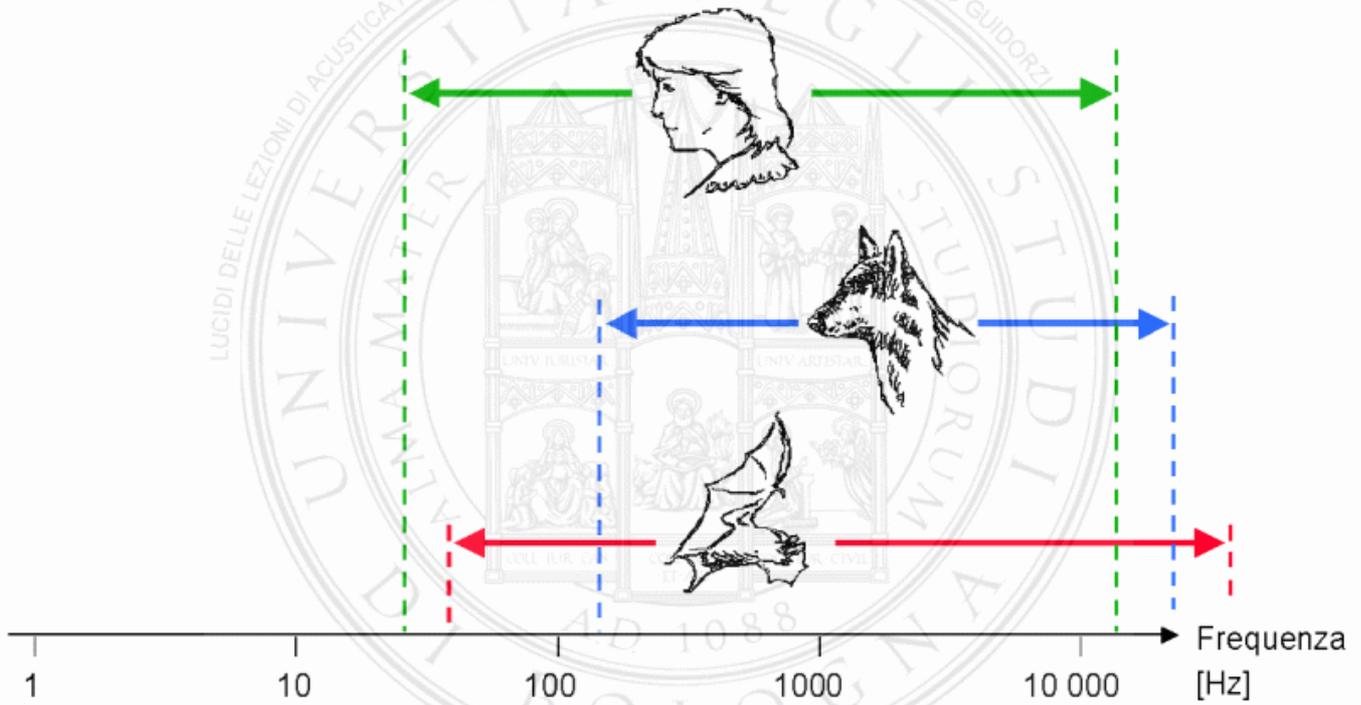
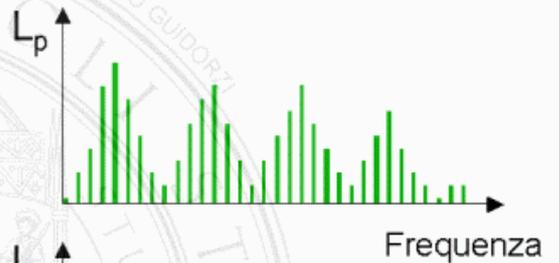
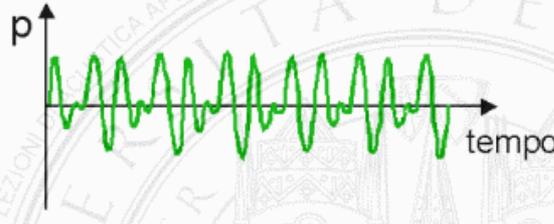


Image Courtesy of Brüel & Kjær

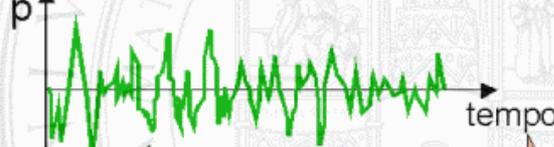
### ANALISI IN FREQUENZA



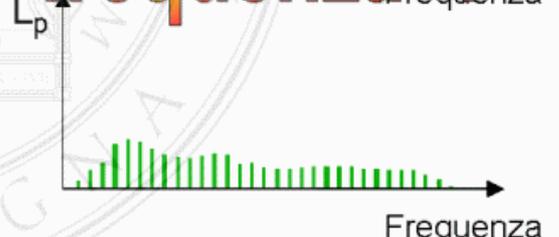
periodico



casuale



impulsivo



tempo → frequenza ?

Image Courtesy of Brüel & Kjær

## 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

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

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

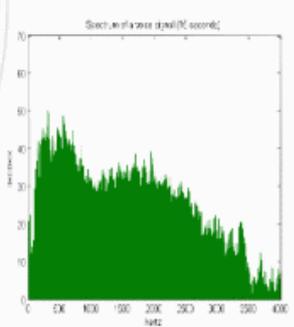
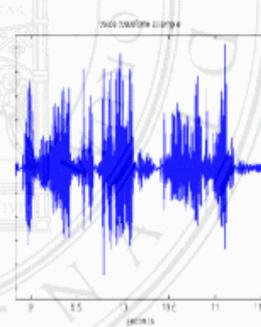
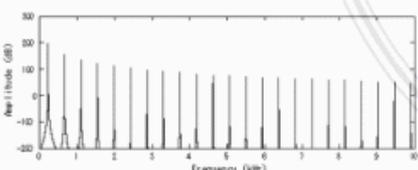
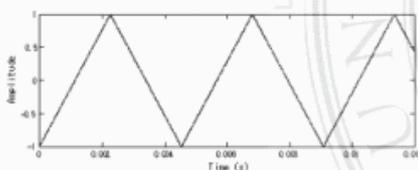
$$x(t) = F^{-1}[X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{+j2\pi ft} df$$

Trasformata diretta  
Tempo → FrequenzaTrasformata inversa  
Frequenza → Tempo

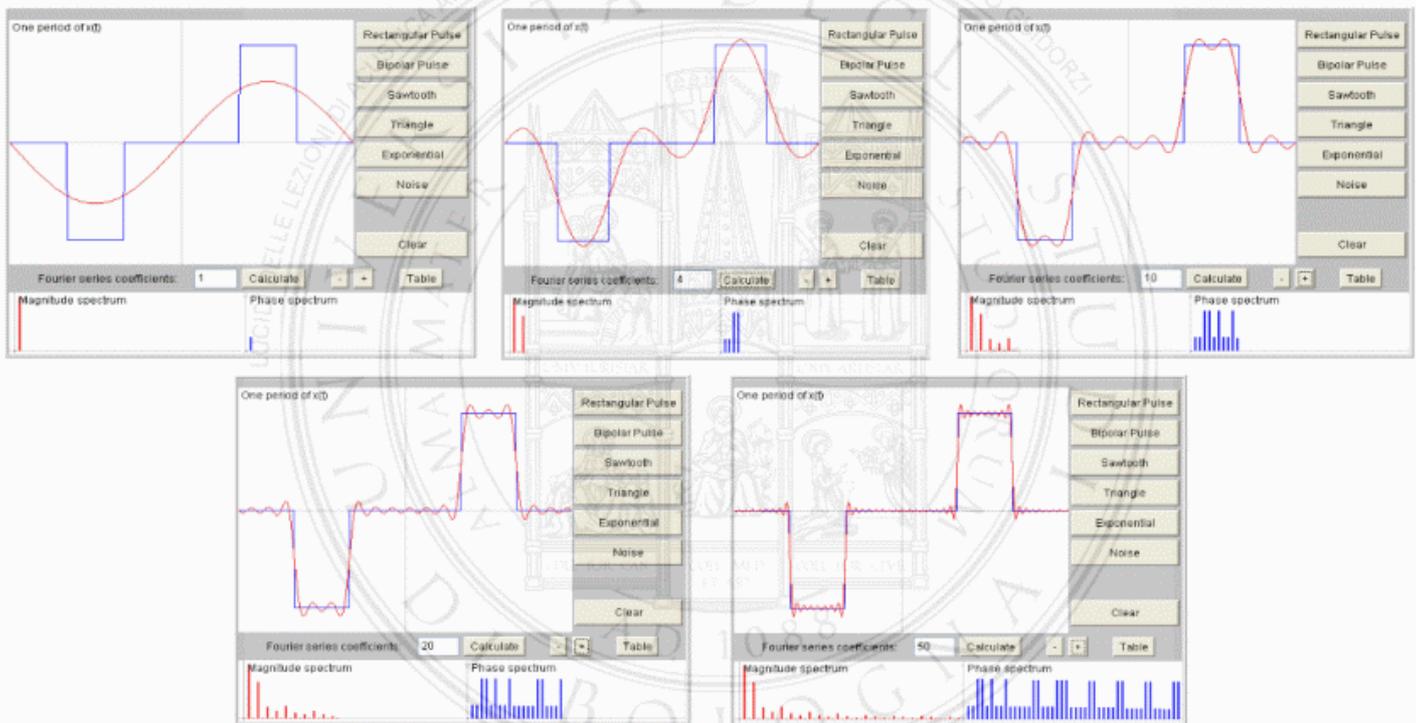
## ANALISI IN FREQUENZA

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 computer, grazie ad un algoritmo veloce detto FFT (Fast Fourier Transform)

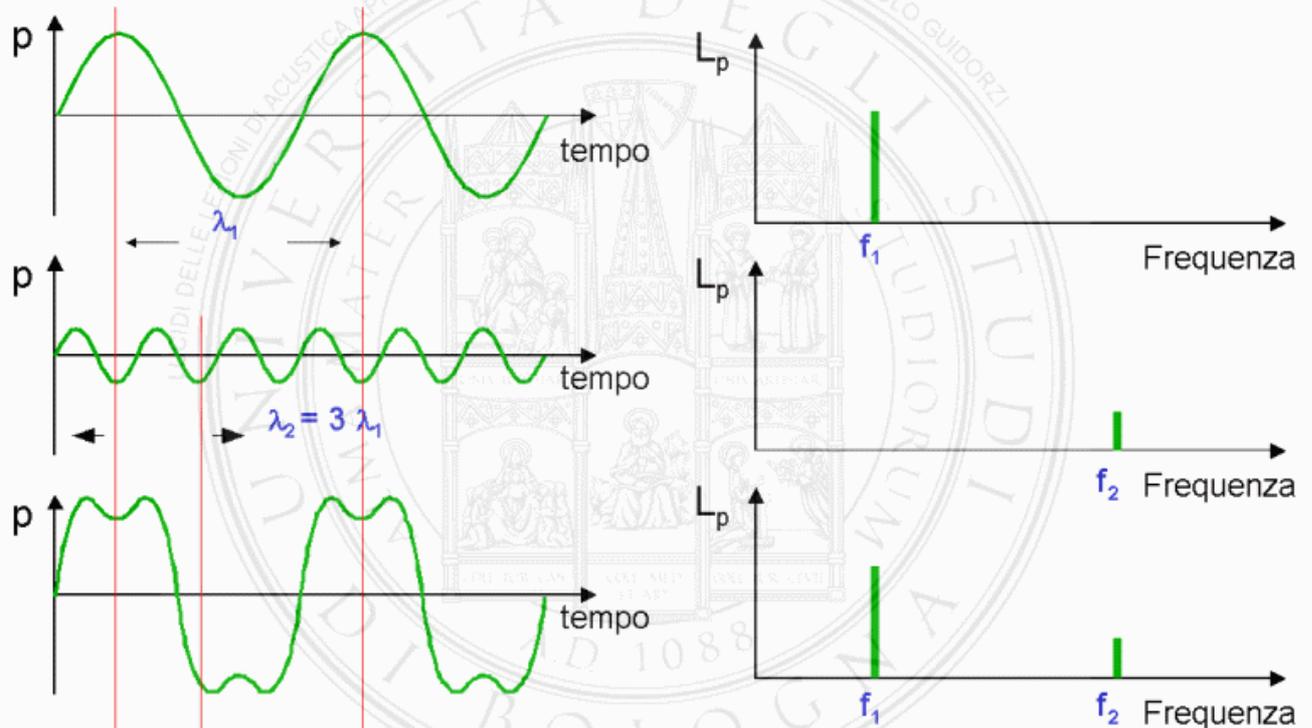


## APPROSSIMAZIONE DI UN SEGNALE MEDIANTE SERIE DI FOURIER



<http://www.jhu.edu/~signals/fourier2/index.html>

## SPETTRO DI TONI PURI E LORO COMPOSIZIONE



## CONCETTO DI FILTRO

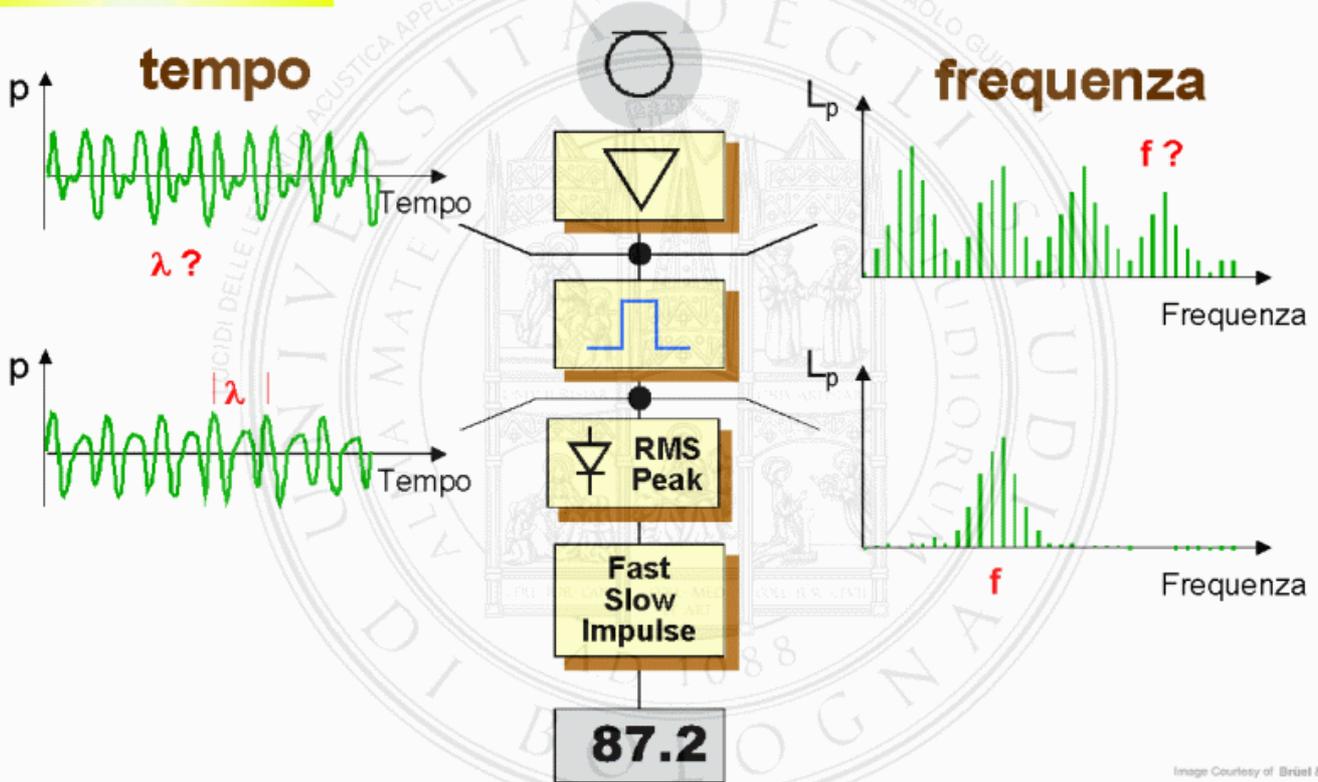


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## IL FILTRO IDEALE

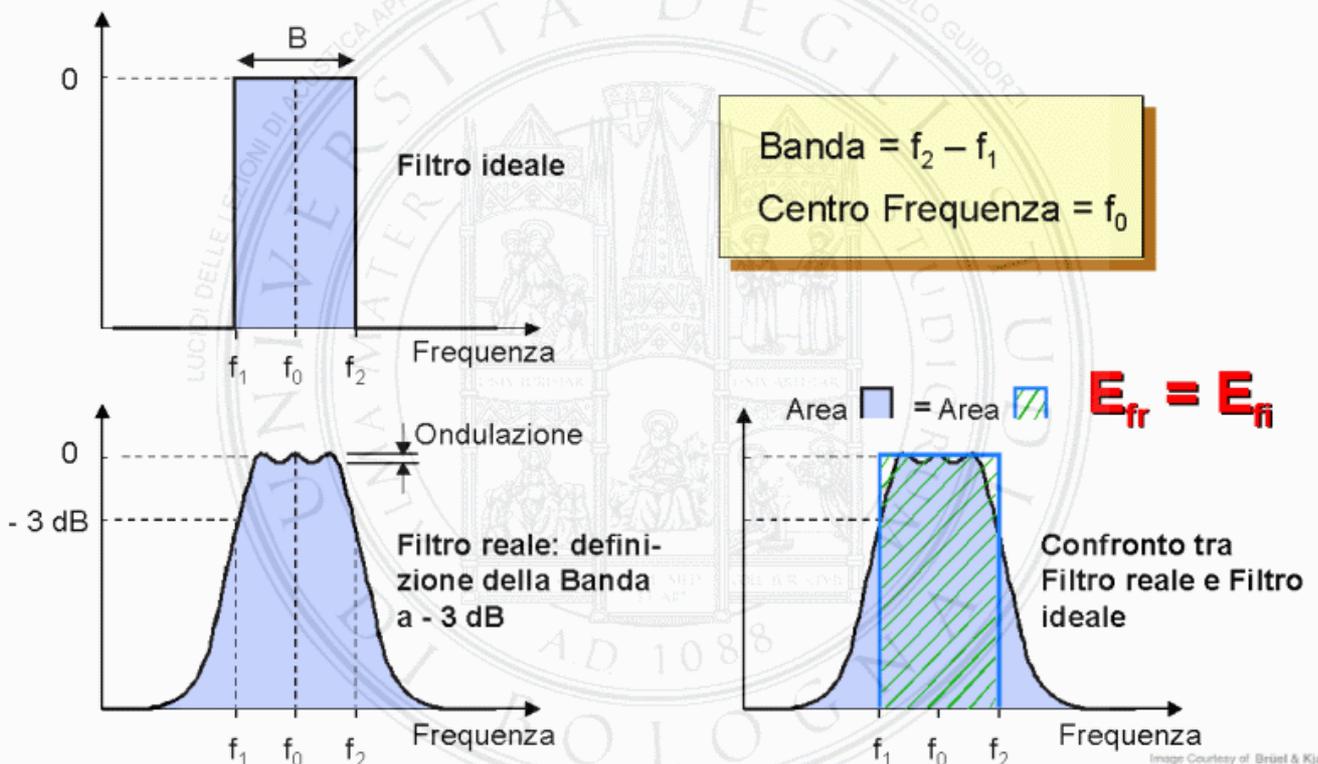
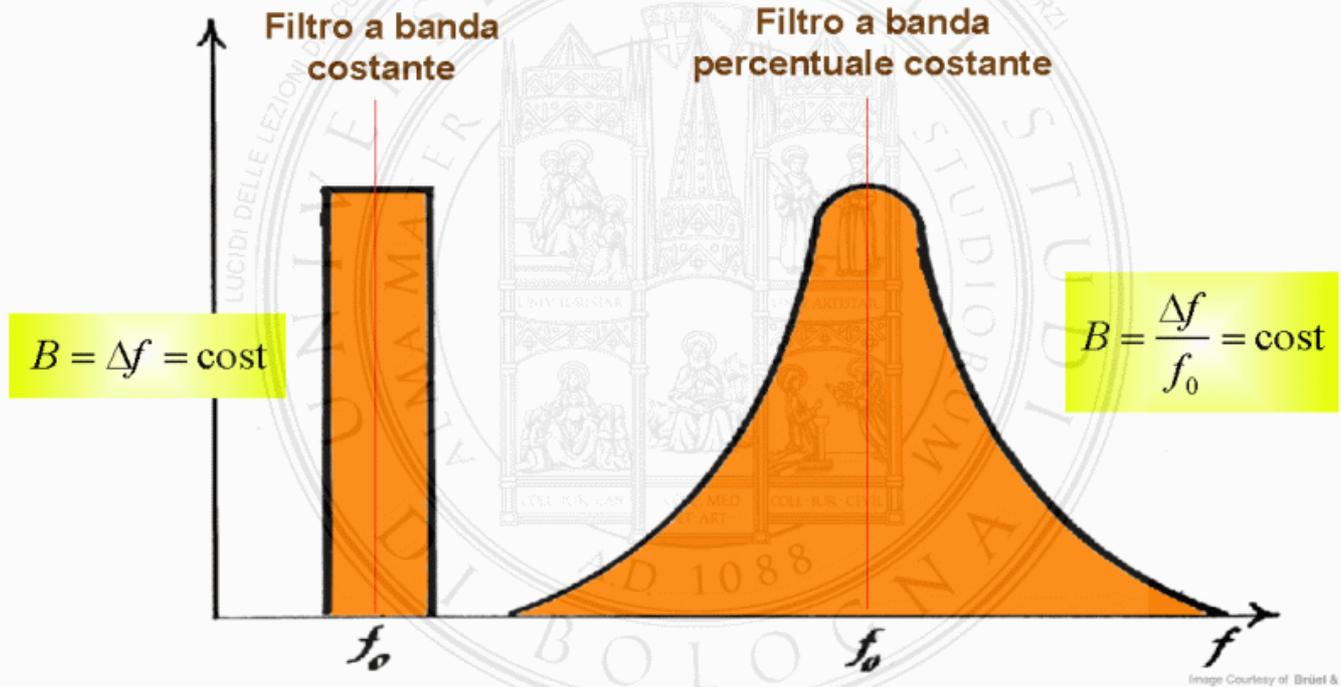
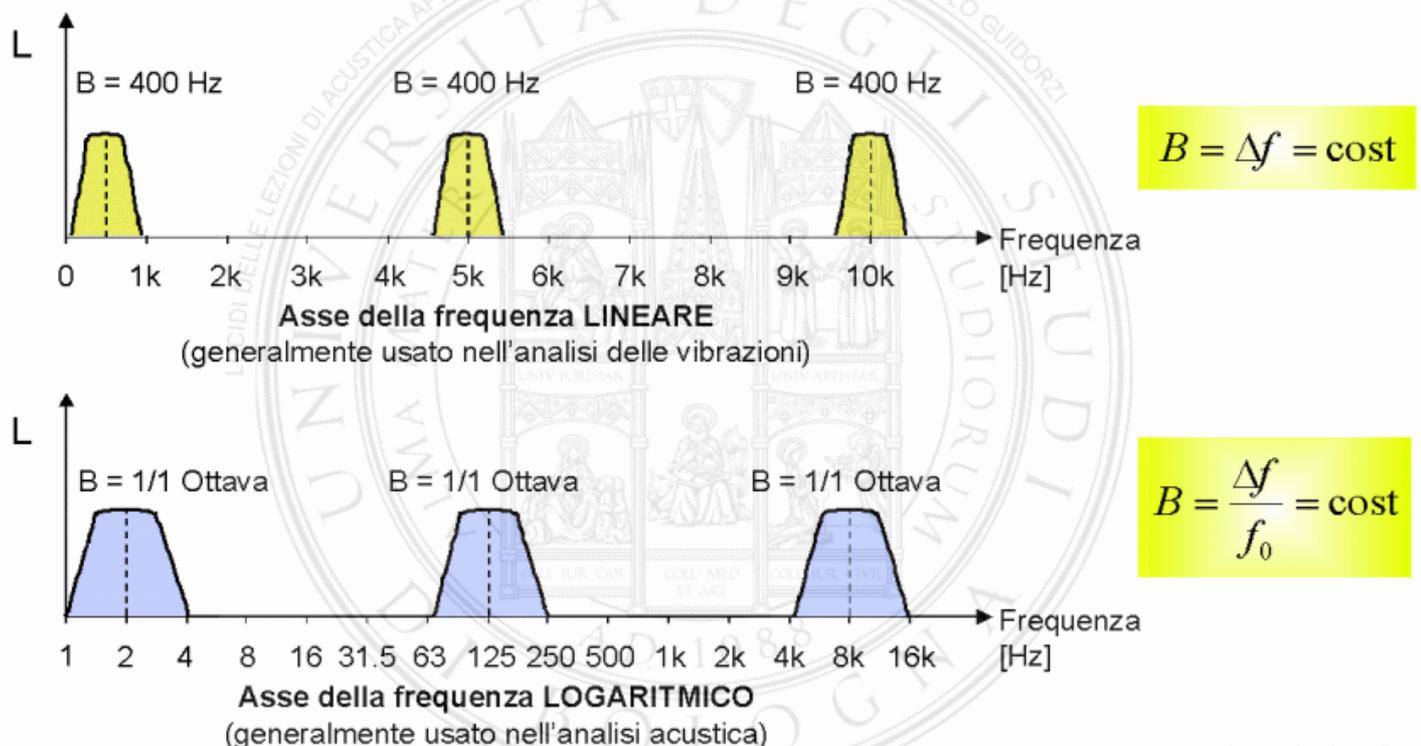


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## FILTRI A BANDA COSTANTE E PERCENTUALE COSTANTE

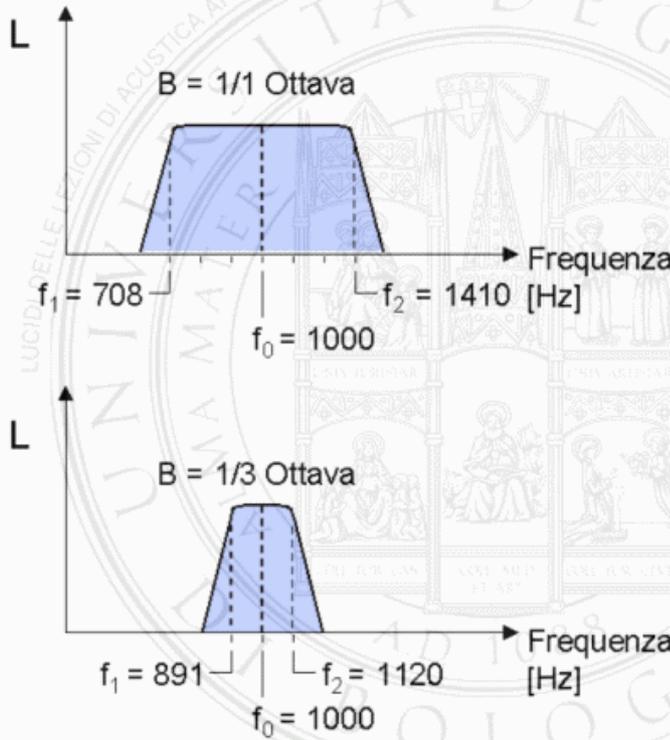


## FILTRI A BANDA COSTANTE E PERCENTUALE COSTANTE



**BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA**

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



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

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

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

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

Sono bande ad ampiezza percentuale costante

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

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

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

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

Image Courtesy of Brüel & Kjær

**BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA**

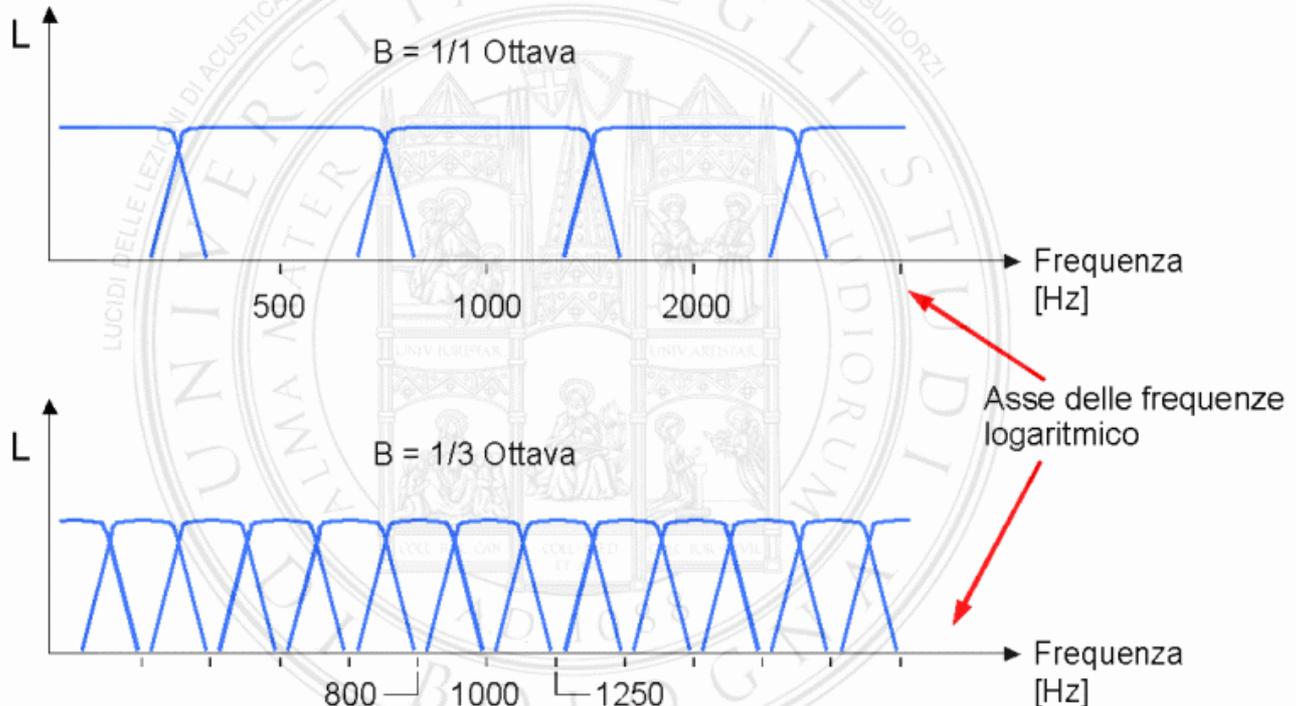


Image Courtesy of Brüel & Kjær

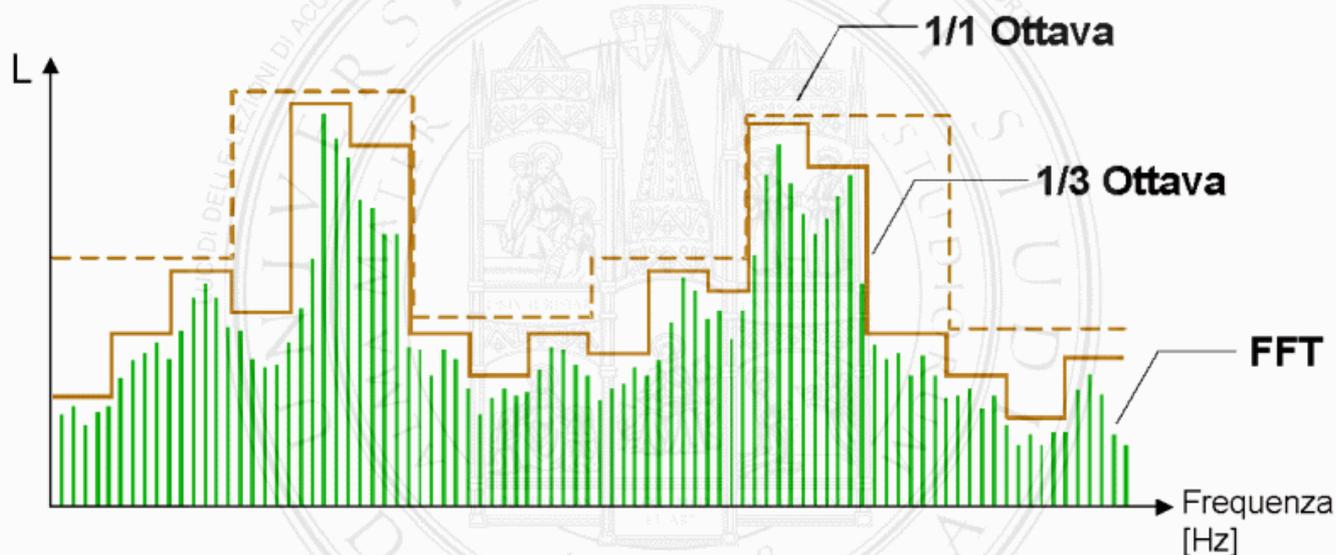
**BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA**


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**BANDE NORMALIZZATE (IEC1260)**

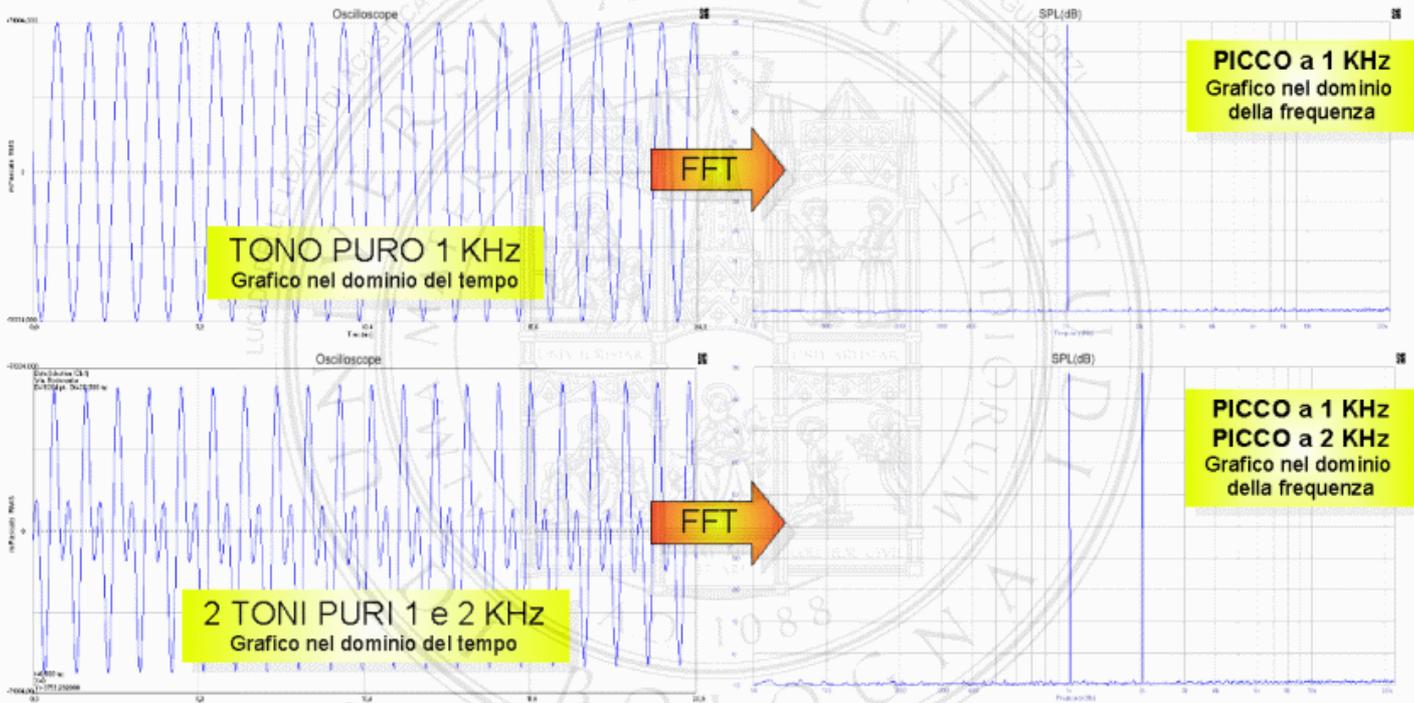
Banda No.	Centro frequenza Nominale Hz	Banda Filtro 1/3 ottava Hz	Banda Filtro 1/1 ottava Hz
1	1.25	1.12 – 1.41	
2	1.6	1.41 – 1.78	
3	2	1.78 – 2.24	1.41 – 2.82
4	2.5	2.24 – 2.82	
5	3.15	2.82 – 3.55	
6	4	3.55 – 4.47	2.82 – 5.62
27	500	447 – 562	355 – 708
28	630	562 – 708	
29	800	708 – 891	
30	1000	891 – 1120	780 – 1410
31	1250	1120 – 1410	
32	1600	1410 – 1780	
40	10 K	8910 – 11200	
41	1.25 K	11.2 – 14.1	
42	16 K	14.1 – 17.8 K	11.2 – 22.4 K
43	20 K	17.8 – 22.4 K	

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

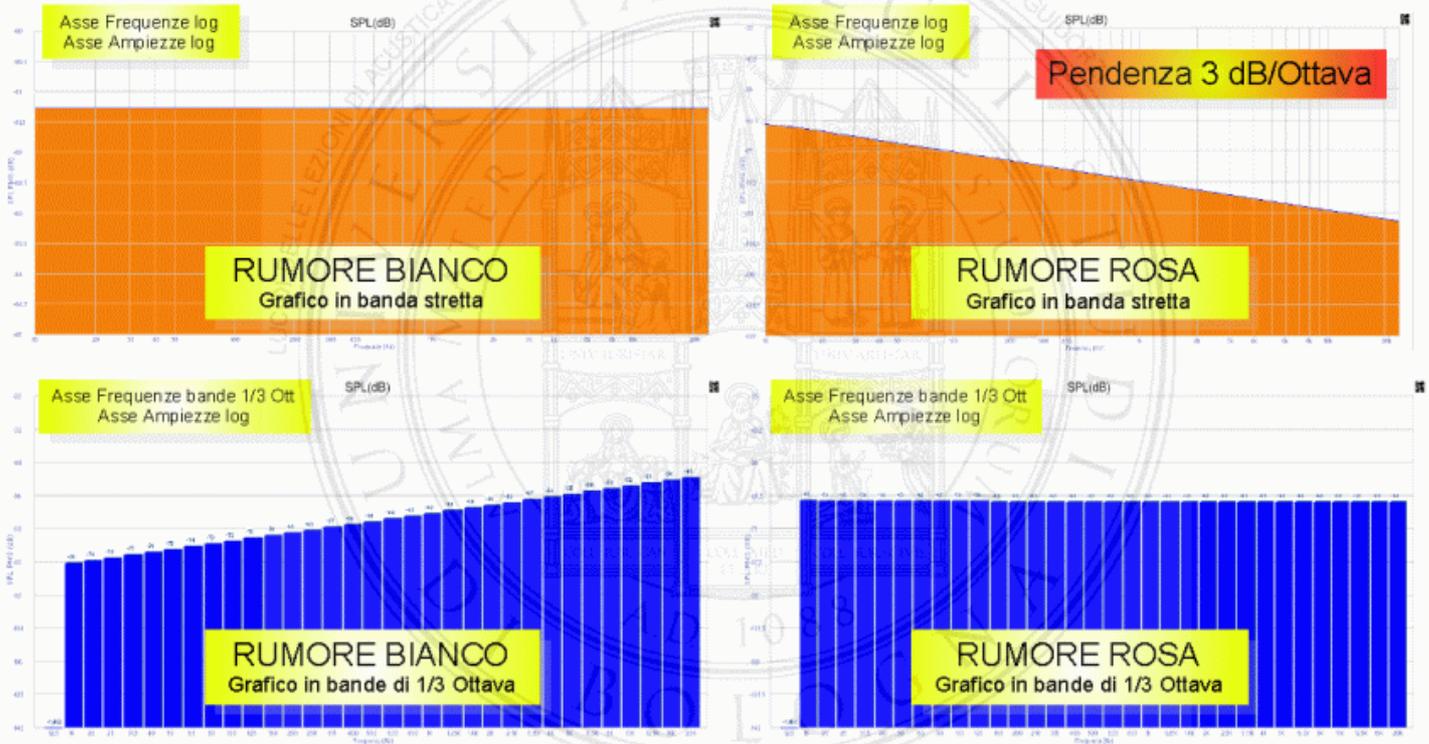
**BANDE NORMALIZZATE (IEC1260) – Frequenze di centro banda (1/1, 1/2 e 1/3 di Ottava)**

16	16	12.5	250	250	200	4000	4000	3150
	22.4	20		355	315		5600	5000
31.5	31.5	25	500	500	500	8000	8000	6300
	45	40		710	630		11200	10000
63	63	50	1000	1000	1000	16000	16000	12500
	90	80		1400	1250		22400	20000
125	125	100	2000	2000	2000	31500	31500	25000
	180	160		2800	2500			40000

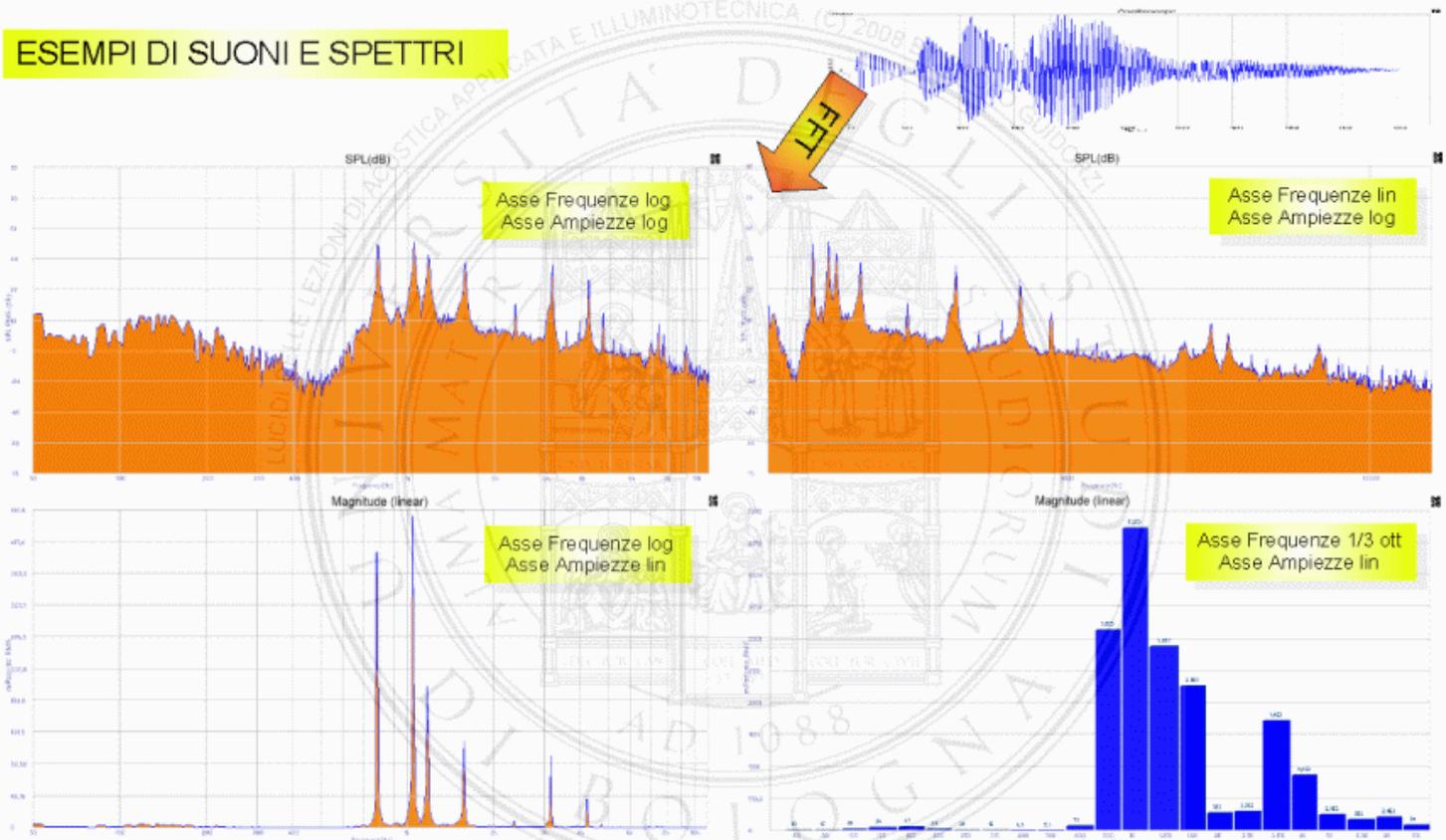
**ESEMPI DI SUONI E SPETTRI**



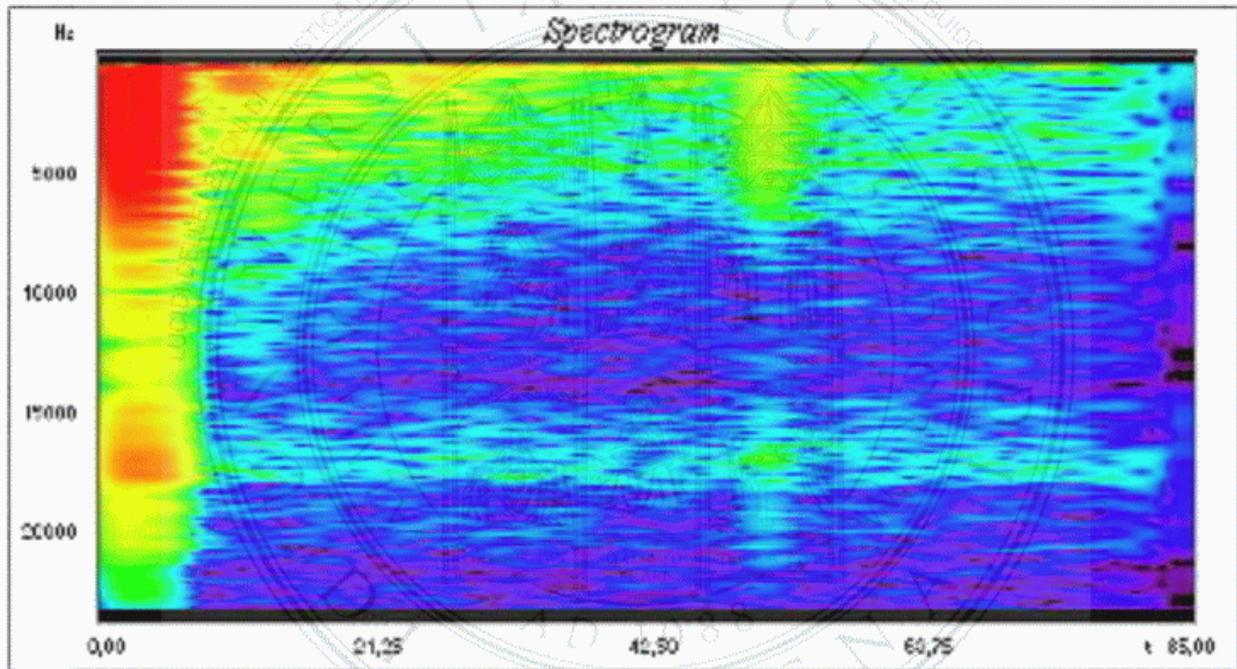
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



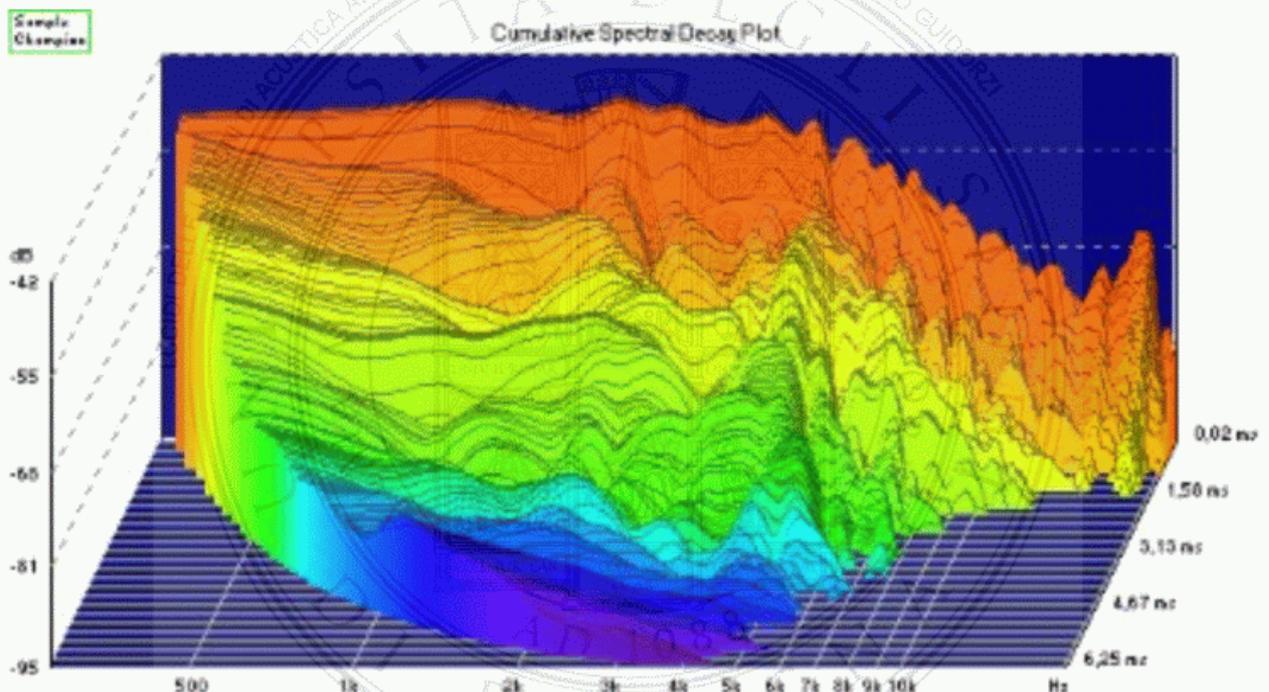
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



## IL SISTEMA Uditivo UMANO

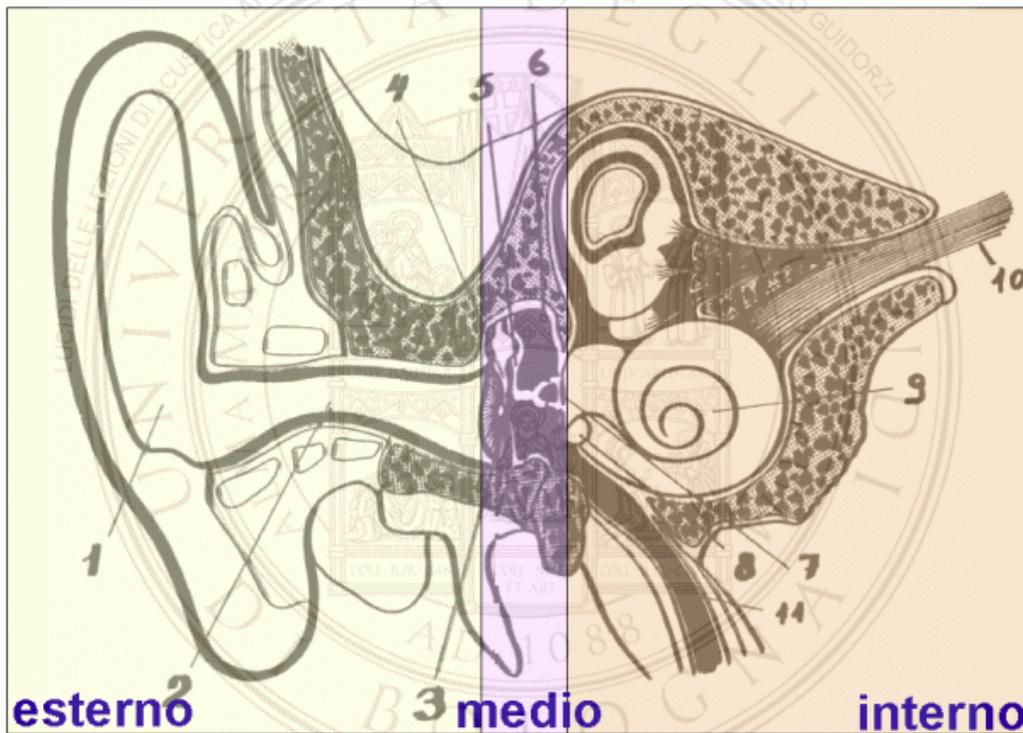
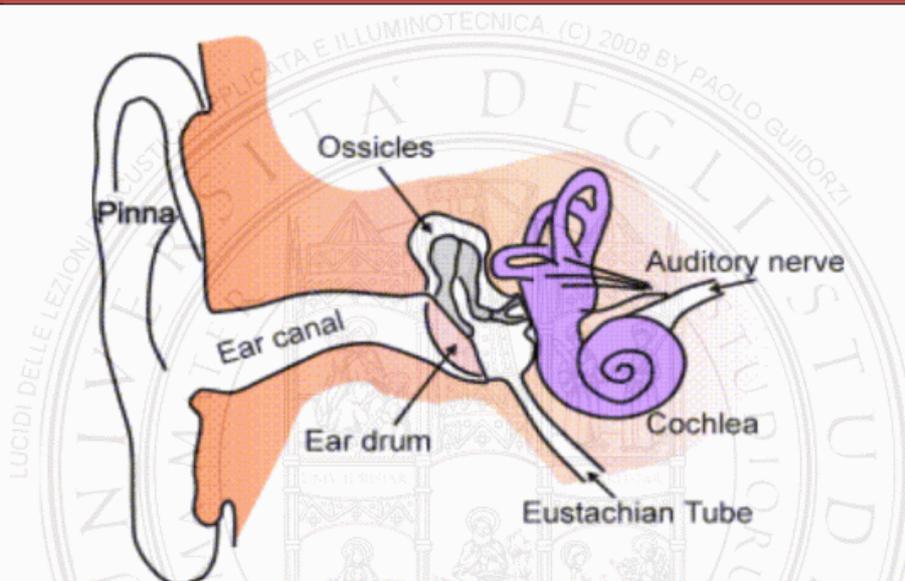


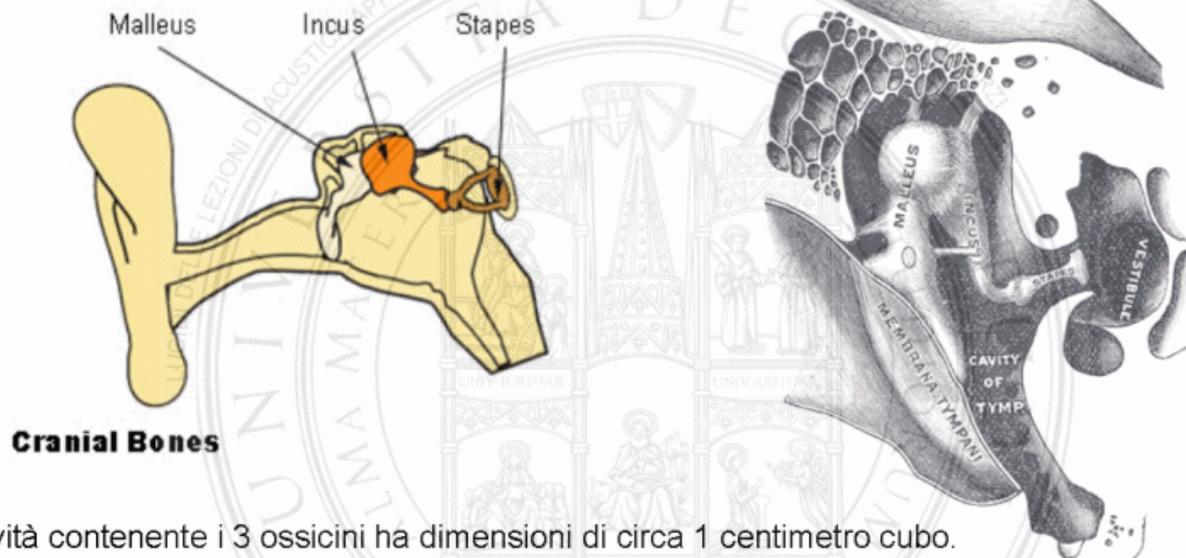
Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



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

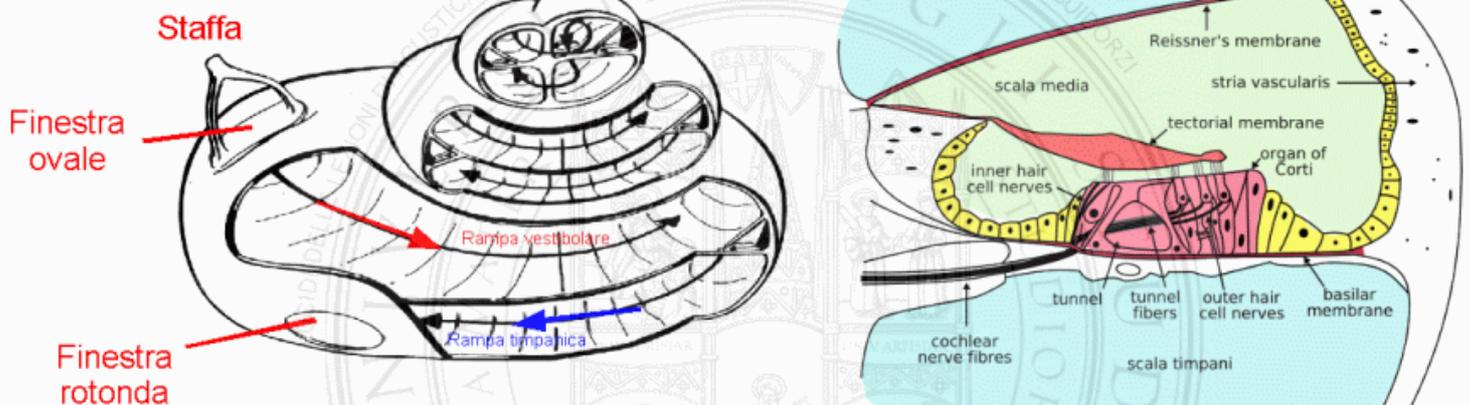
**ORECCHIO MEDIO:** contiene 3 ossicini (martello, incudine e staffa); è in comunicazione con naso e bocca tramite la tuba di Eustachio (riequilibrio di pressione)

**ORECCHIO INTERNO:** chiocciola contenente cellule che "sentono" i suoni

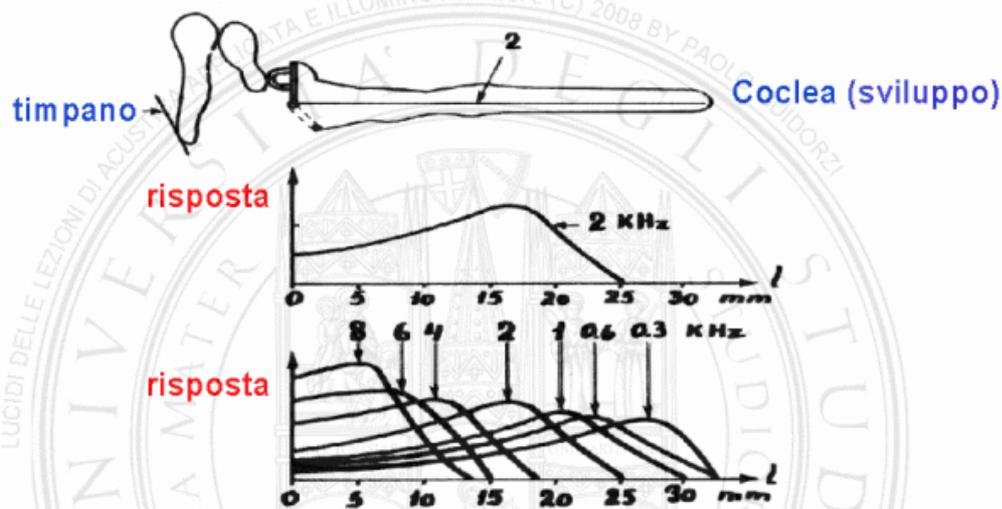


La cavità contenente i 3 ossicini ha dimensioni di circa 1 centimetro cubo.

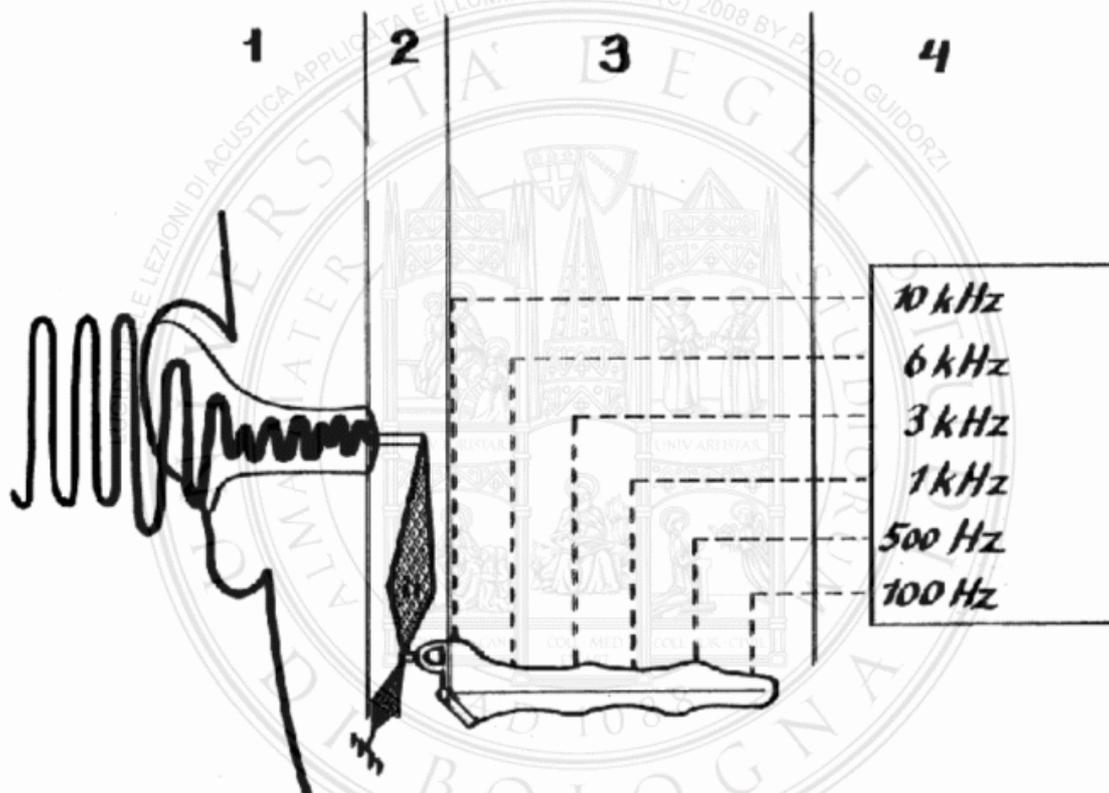
Il martello è attaccato alla membrana timpanica, segue l'incudine e infine la staffa. Attaccato alla staffa è il muscolo stapedio. Il sistema formato dai 3 ossicini funziona come un adattatore di impedenza. Il sistema uditivo può in parte variare la sua impedenza tramite il muscolo stapedio, che irrigidisce 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.



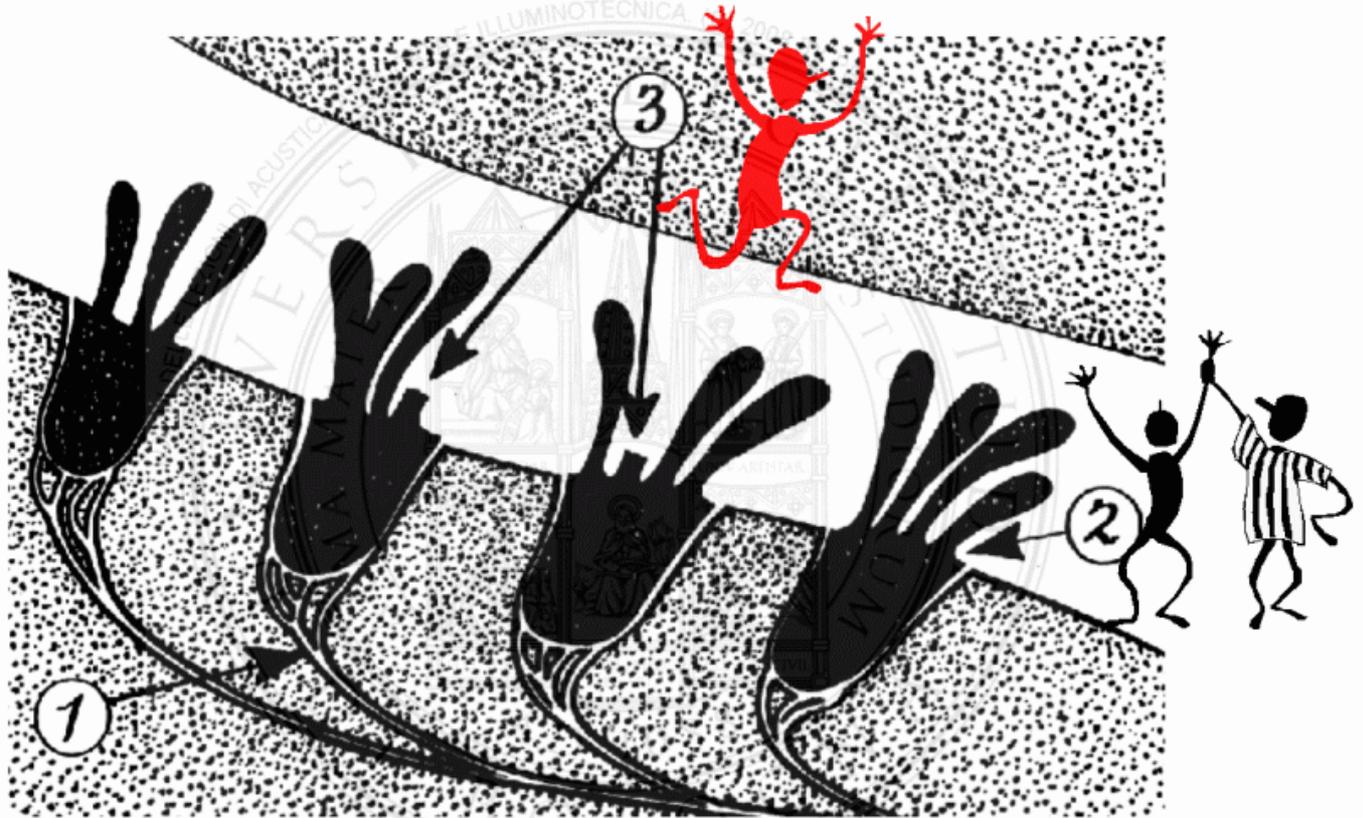


Image Courtesy of Brüel & Kjær

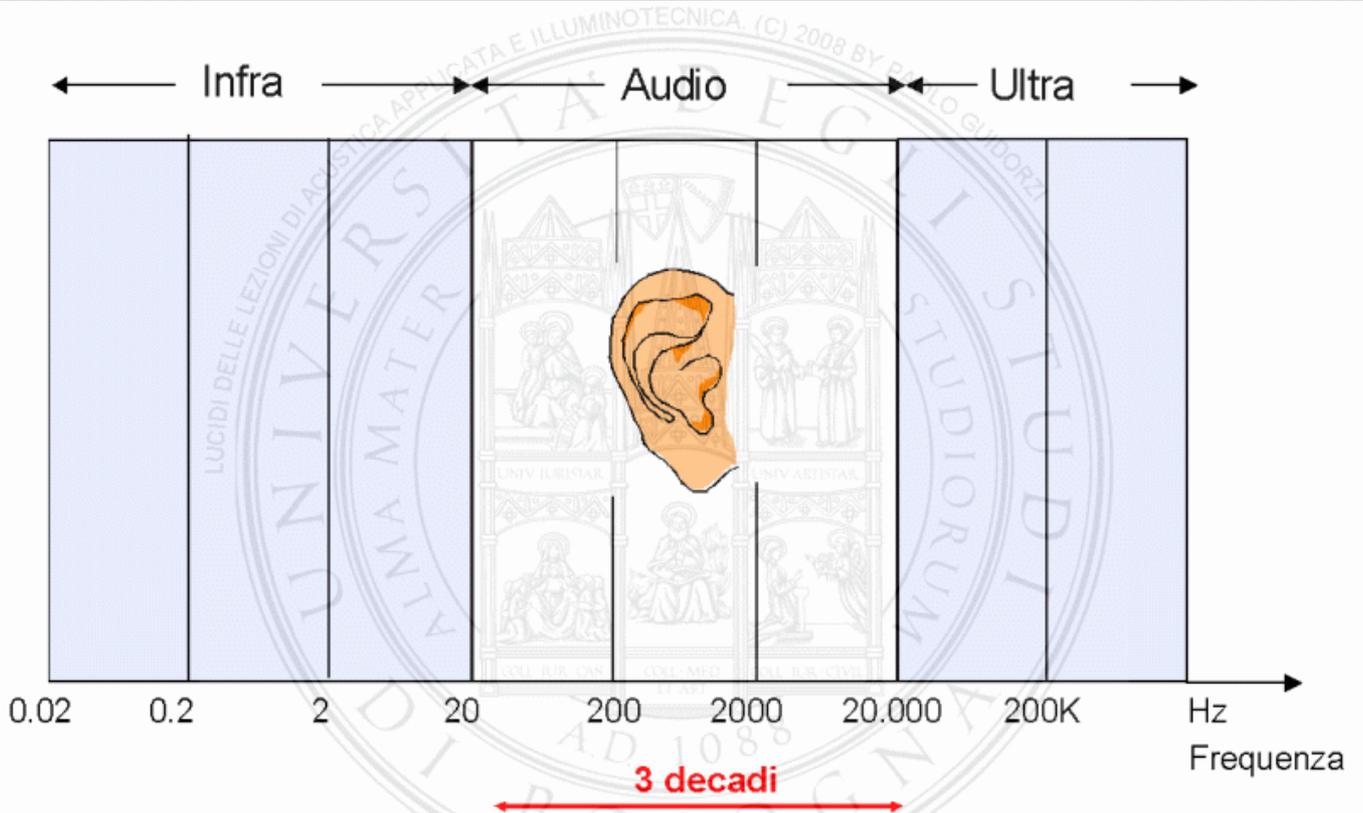


Image Courtesy of Brüel & Kjær

### Range of Sound Pressure Levels

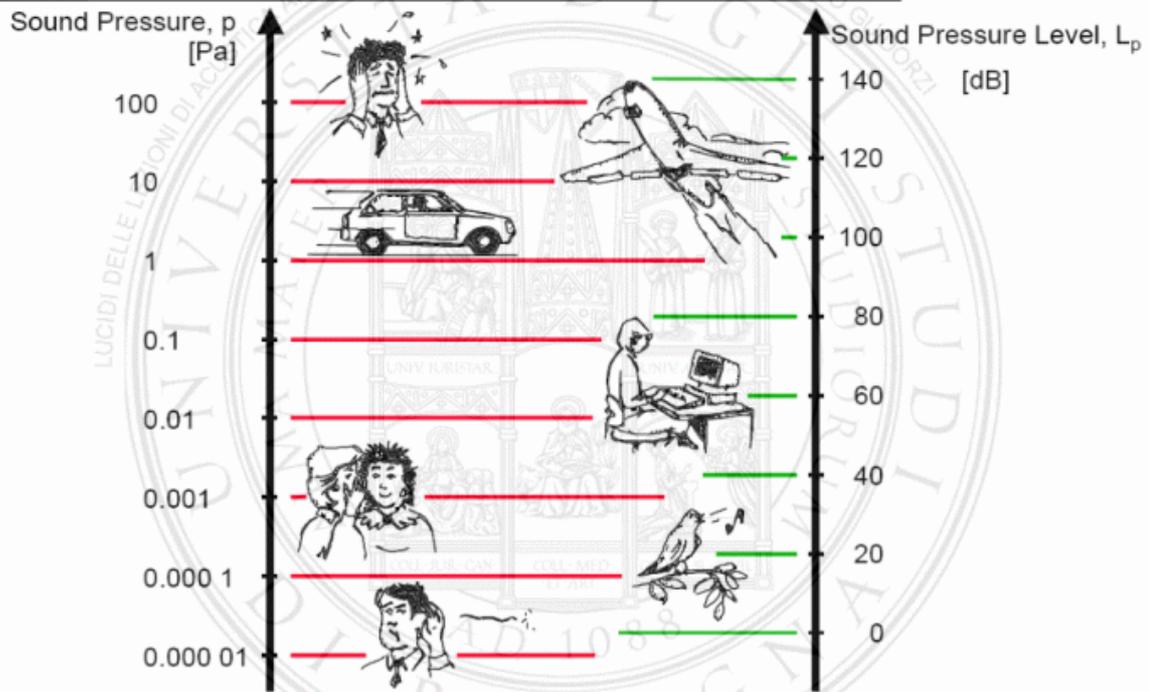


Image Courtesy of Brüel & Kjær

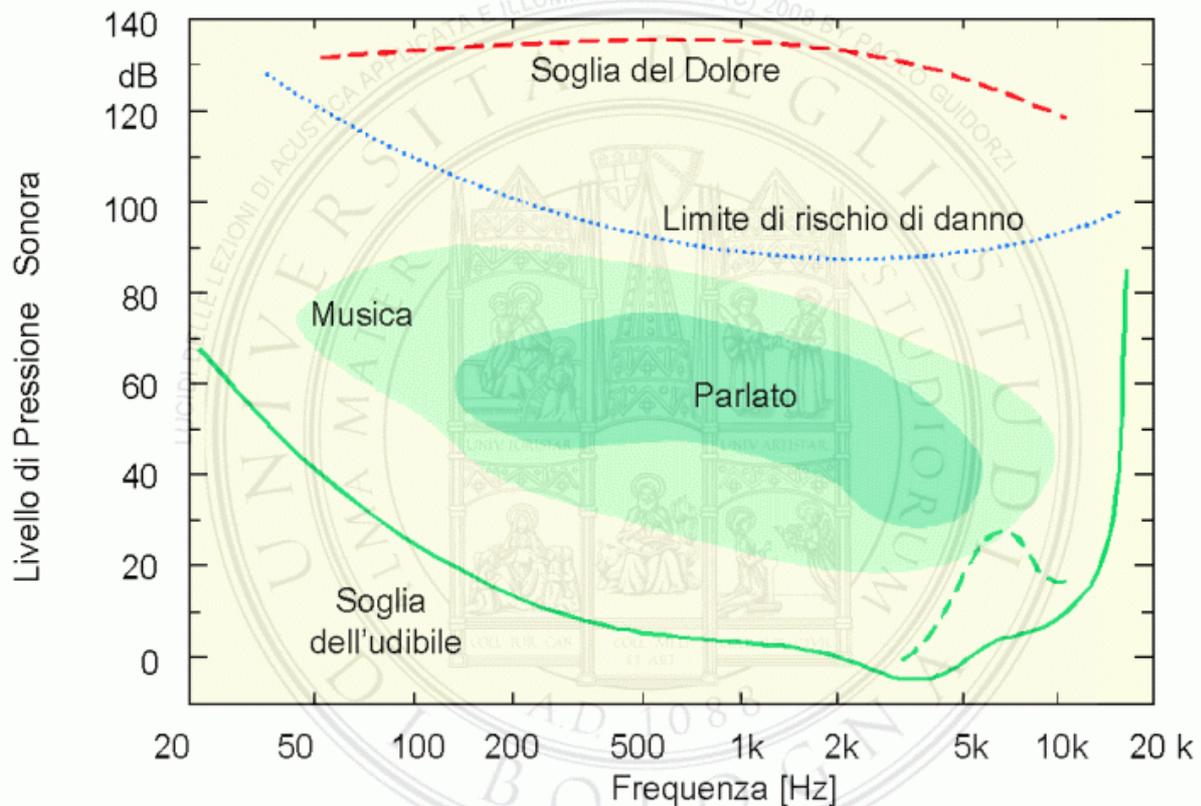


Image Courtesy of Brüel & Kjær

## CURVE ISOFONICHE

Norma ISO 226/1987:  
curve isofoniche

Livello di  
Pressione  
Sonora,  $L_p$   
(dB re 20  $\mu$ Pa)

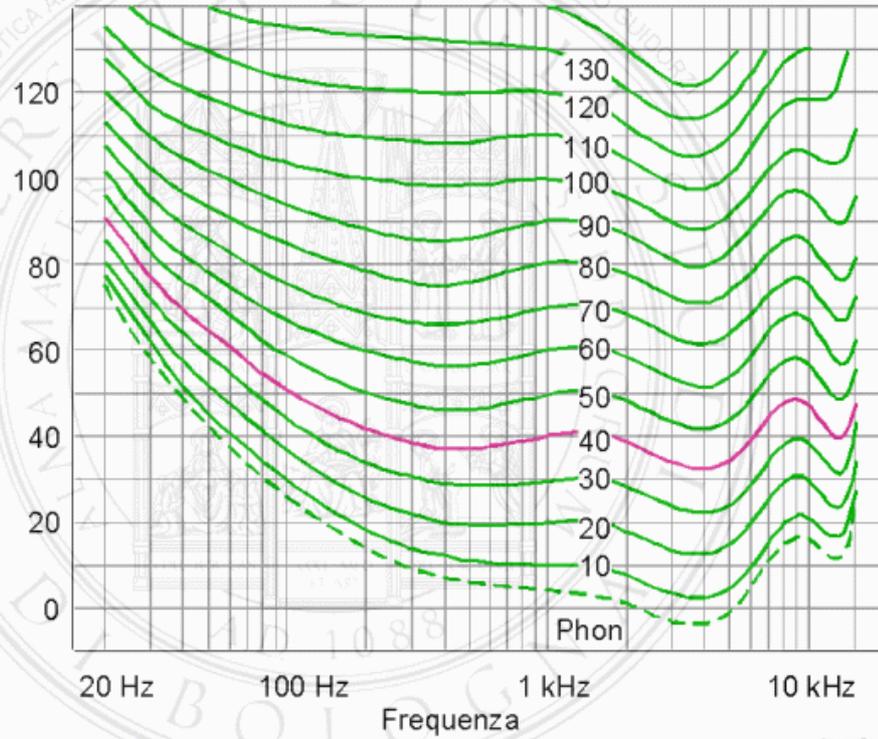
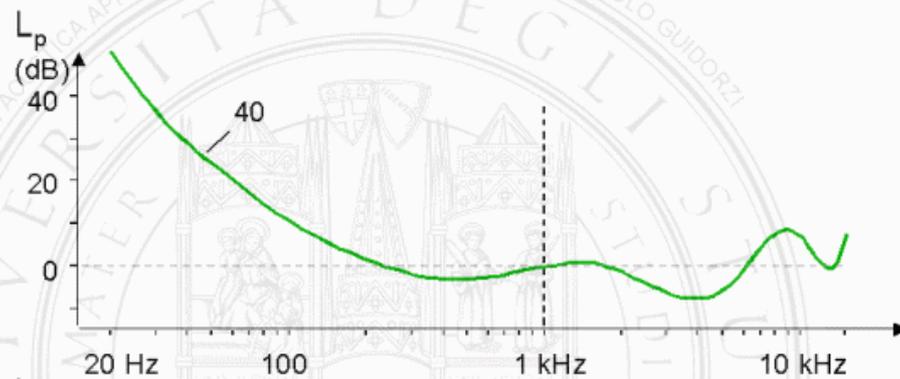


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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

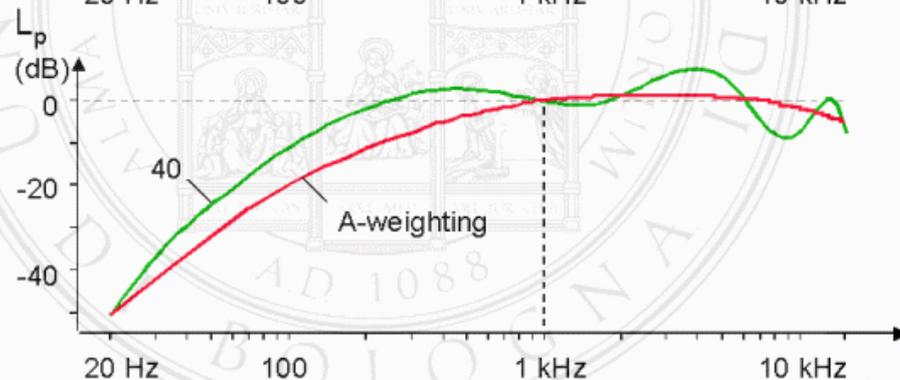


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

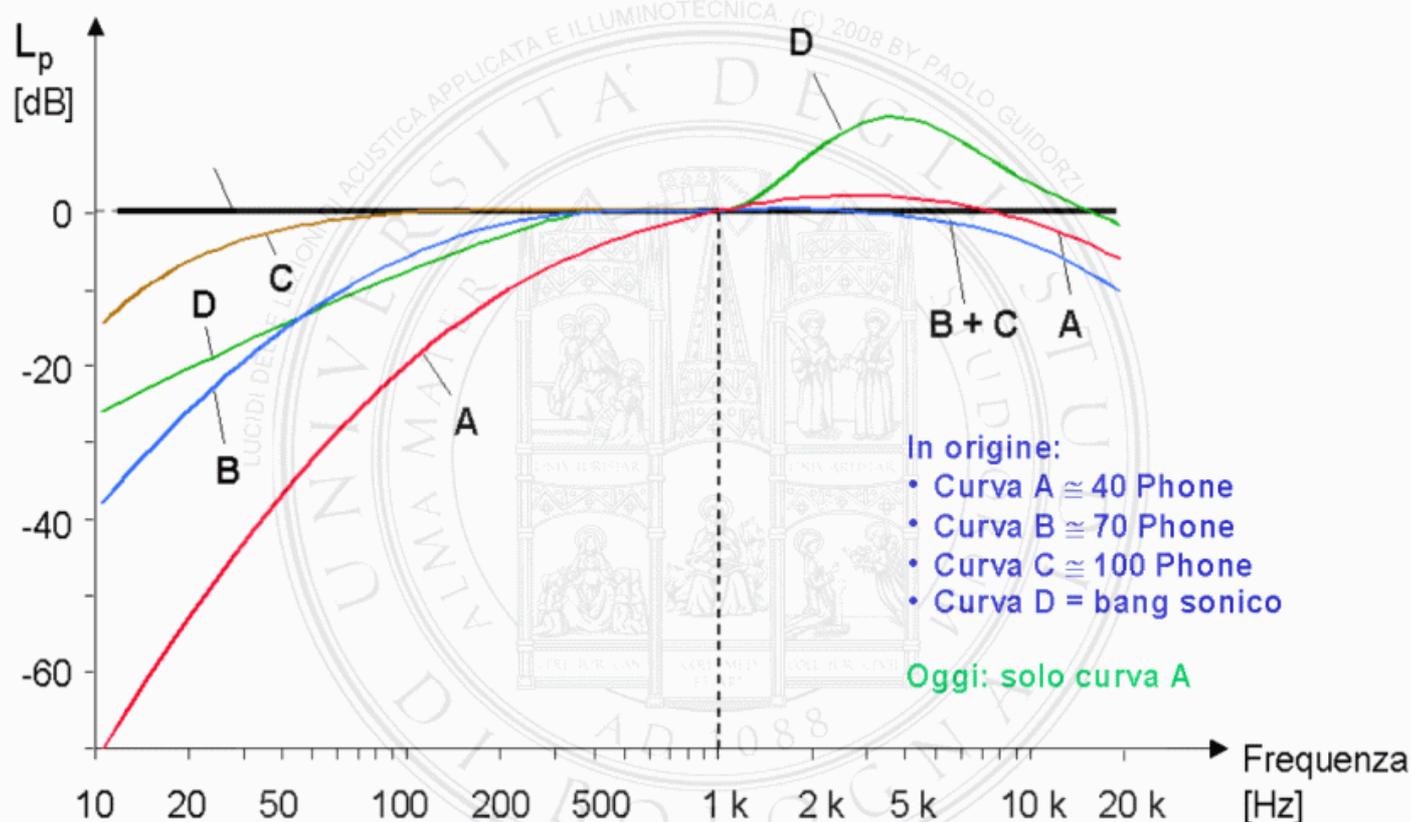


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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**.

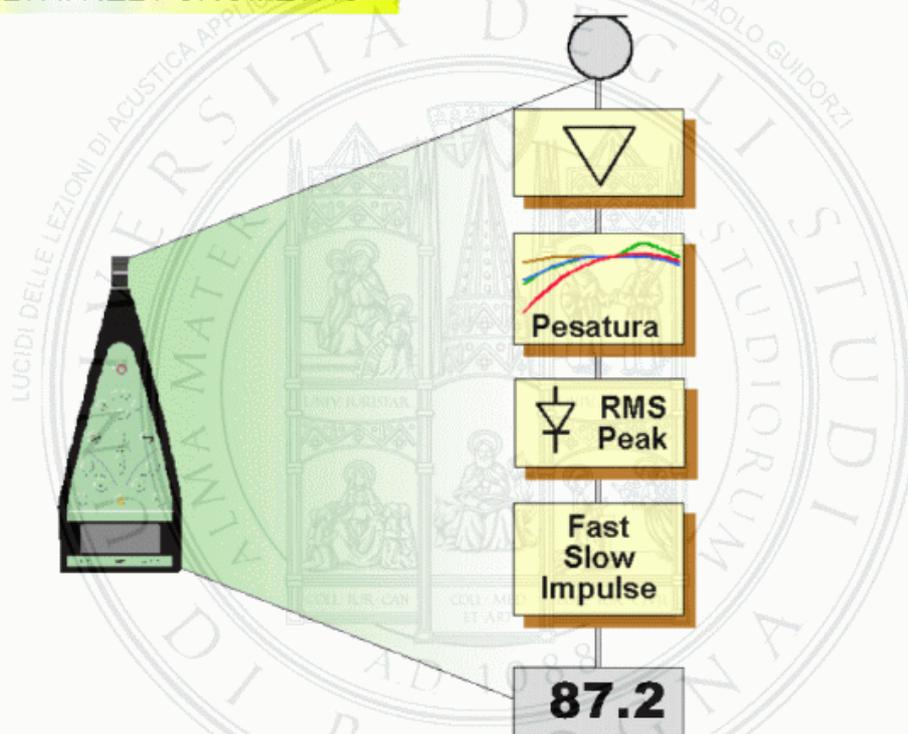
Tutti i valori in dB determinati con l'impiego del filtro A devono riportare, dopo il termine dB, la lettera (A).

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## CURVE ISOFONICHE - COEFFICIENTI PER LA PESATURA "A"

Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)	Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
20	-50,5	800	-0,8
25	-44,7	1000	0
31,5	-39,4	1250	0,6
40	-34,6	1600	1
50	-30,2	2000	1,2
63	-26,2	2500	1,3
80	-22,5	3150	1,2
100	-19,1	4000	1
125	-16,1	5000	0,5
160	-13,4	6300	-0,1
200	-10,9	8000	-1,1
250	-8,6	10000	-2,5
315	-6,6	12500	-4,3
400	-4,8	16000	-6,6
500	-3,2	20000	-9,3
630	-1,9		

## PESATURA E FILTRI NEL FONOMETRO



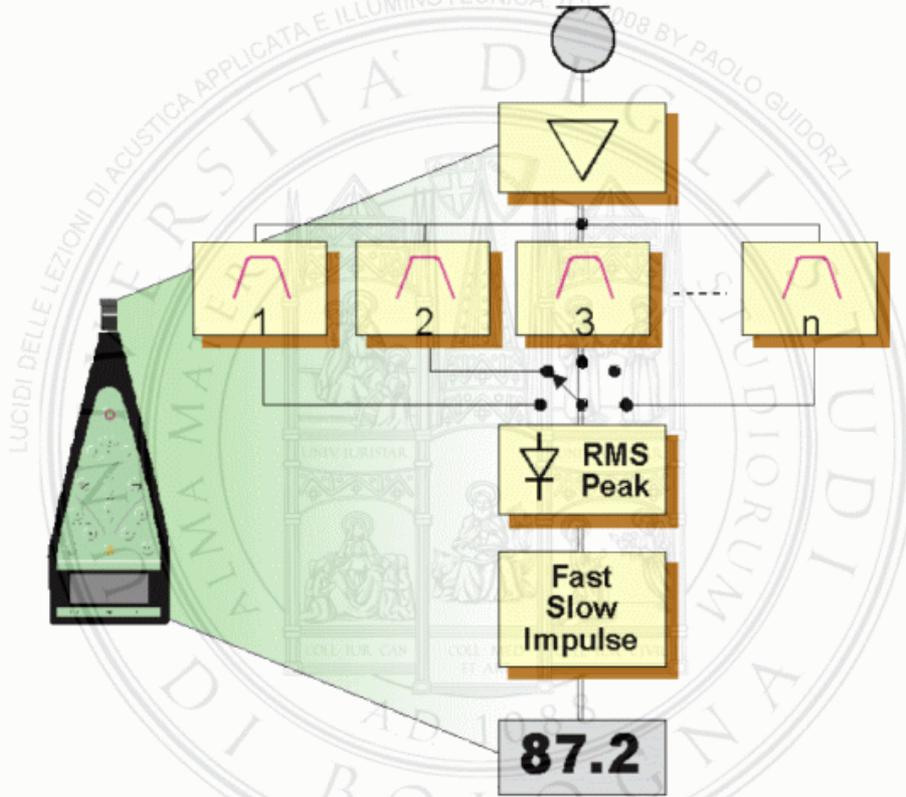


Image Courtesy of Brüel & Kjær

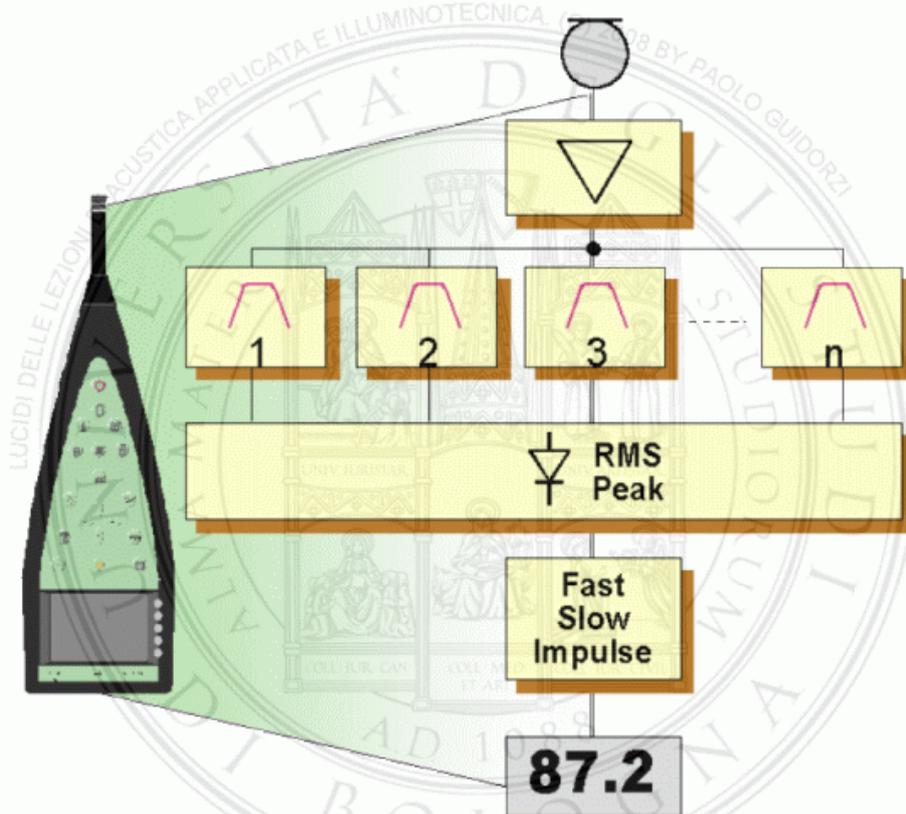


Image Courtesy of Brüel & Kjær

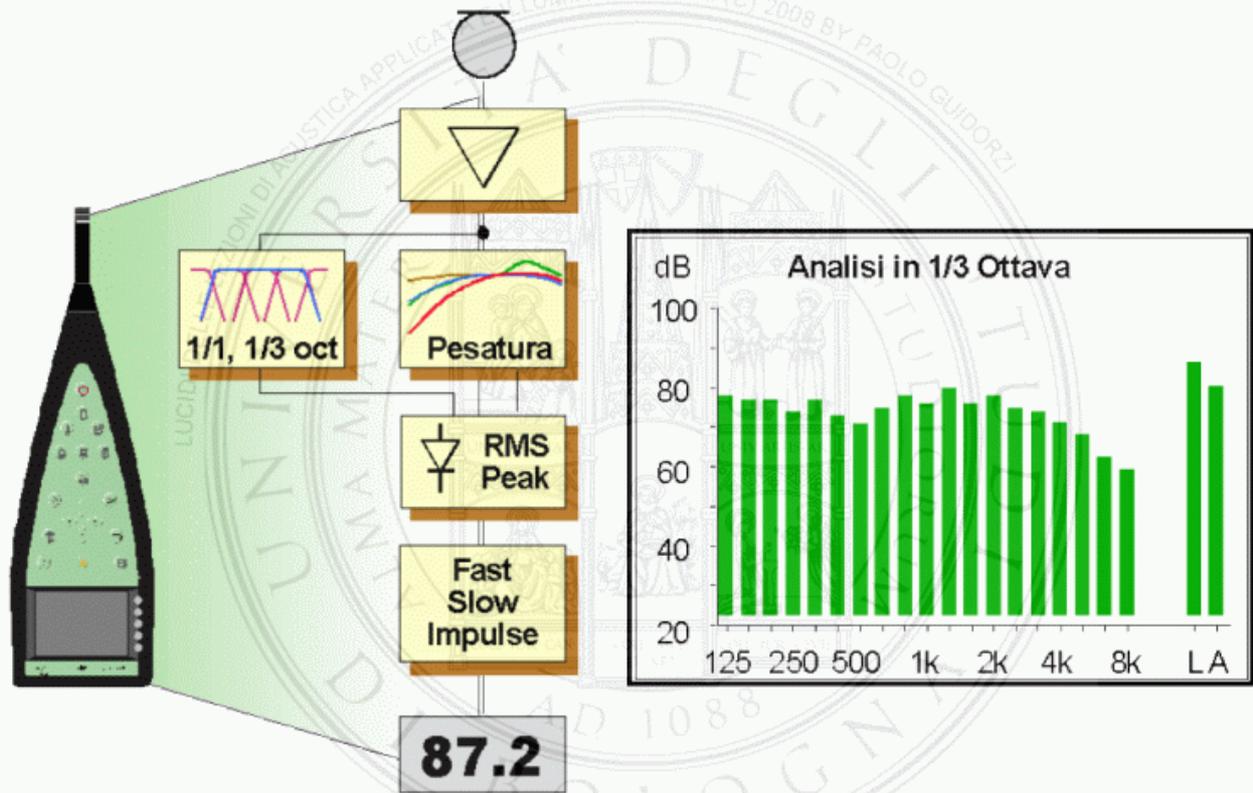
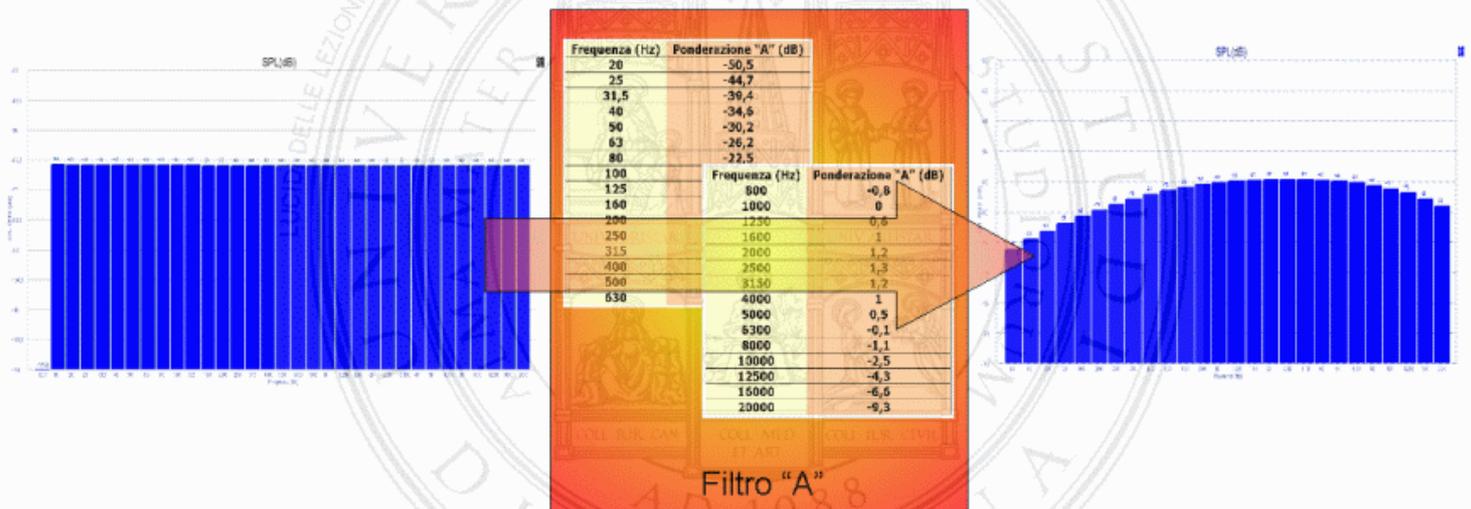
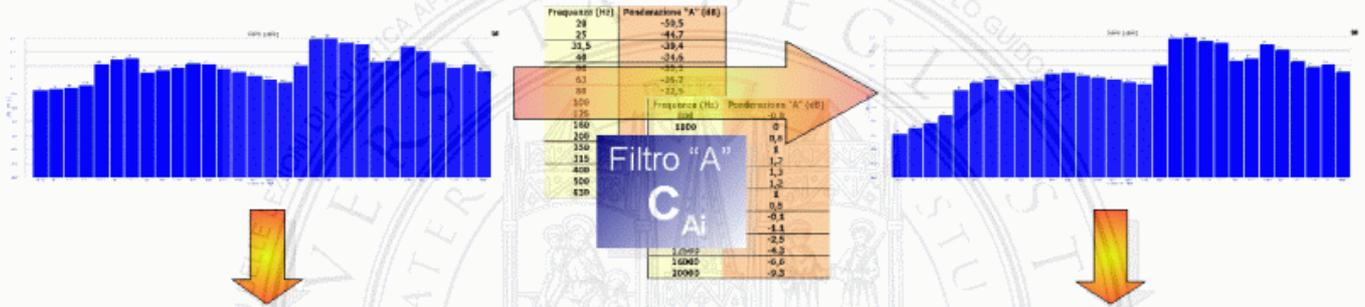


Image Courtesy of Brüel & Kjær

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



LIVELLO SONORO GLOBALE LINEARE E PONDERATO "A"



Livello sonoro globale lineare

$$L_{Lin} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \text{ dB}$$

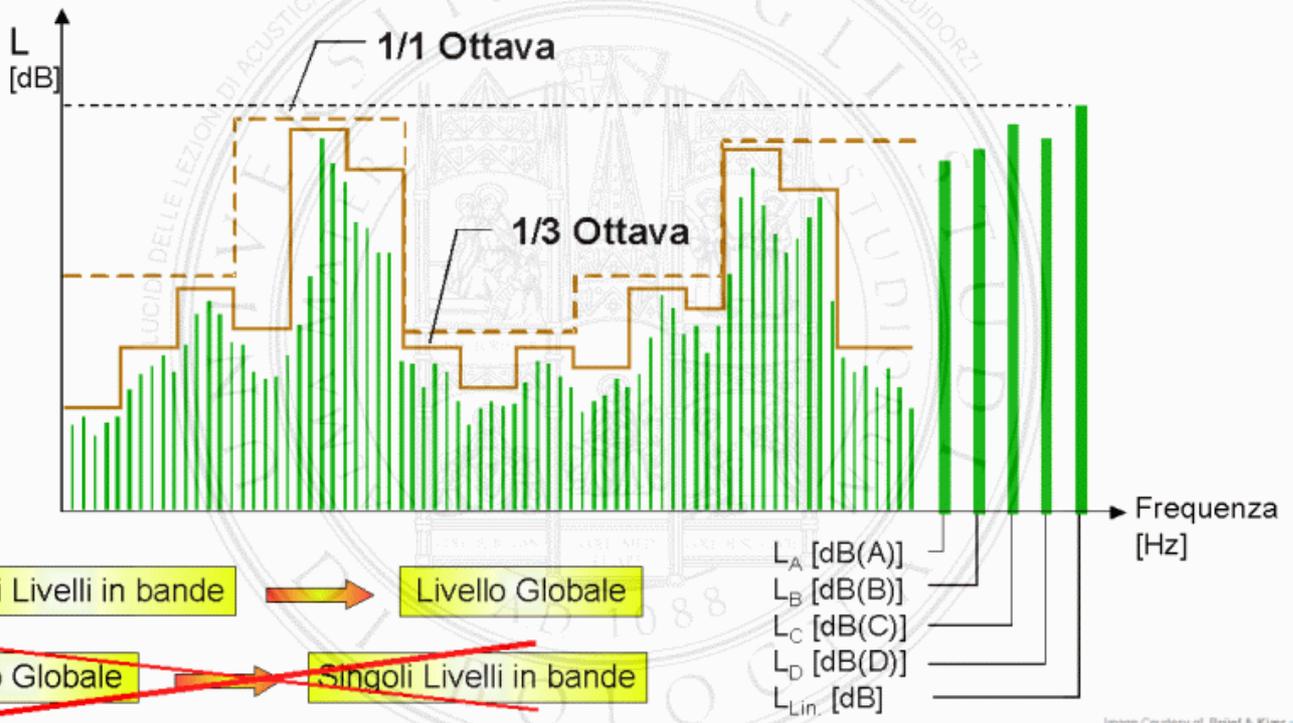
n : numero di bande  
L<sub>i</sub>: Livello in dB nella i-esima banda

Livello sonoro globale ponderato "A"

$$L_A = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i + C_{Ai}}{10}} \text{ dB(A)}$$

n : numero di bande  
L<sub>i</sub> : Livello in dB nella i-esima banda  
C<sub>Ai</sub> : Ponderazione "A" per il livello della i-esima banda

SPETTRO IN BANDE E LIVELLO GLOBALE

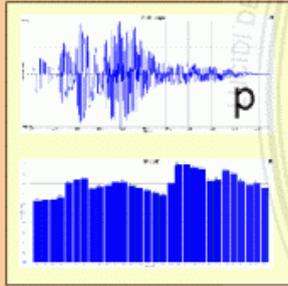


## LIVELLO EQUIVALENTE PONDERATO "A"

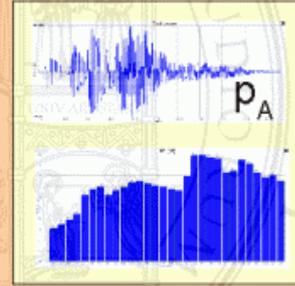
Livello equivalente

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

p: valori di pressione "lineari"



Filtro "A"

Livello equivalente  
ponderato "A"

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right\} \text{ dB(A)}$$

p\_A: valori di pressione ponderati "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

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

*MICROFONI E FONOMETRI*

## *Indice*

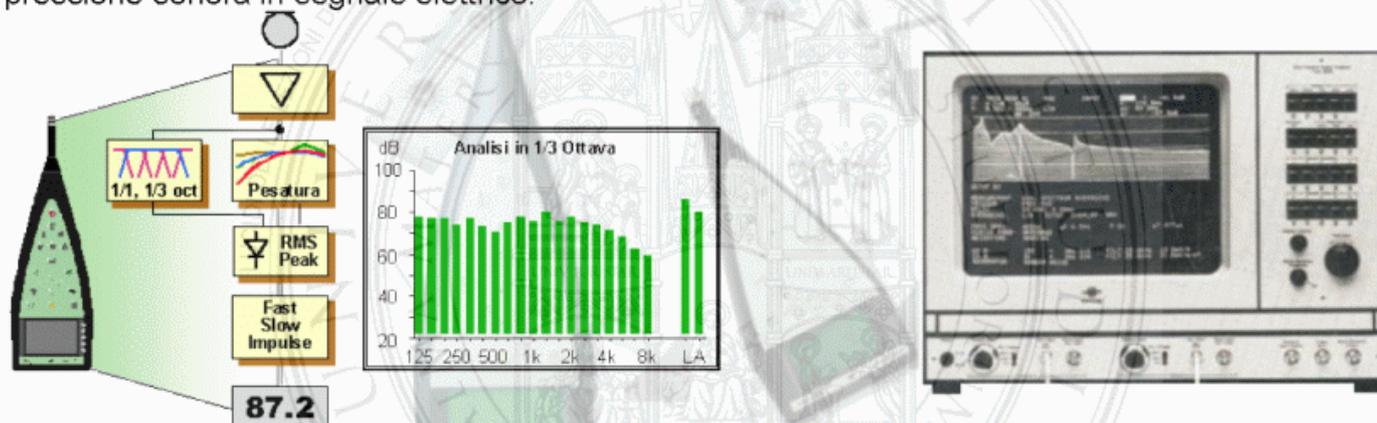
Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - Il fonometro
- 3 - Il microfono a condensatore
- 4 - Misura dell'intensita' acustica
- 5 - La trasformata di Fourier
- 6 - Il prodotto di convoluzione
- 7 - Delta di Dirac
- 8 - Sistemi lineari-stazionari
- 9 - Risposta all'impulso e risposta in frequenza

## 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.

000105

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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 \*andrebbe\* fatto tutti i giorni all'autovettura prima di metterla in marcia)*

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## FONOMETRO – PRINCIPI GENERALI DI FUNZIONAMENTO

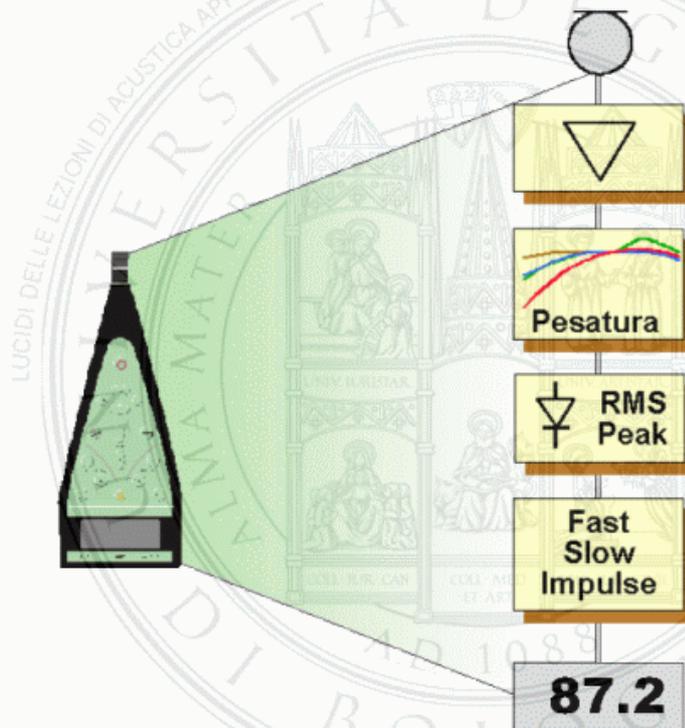


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

FONOMETRO – ANALISI IN FREQUENZA SERIALE

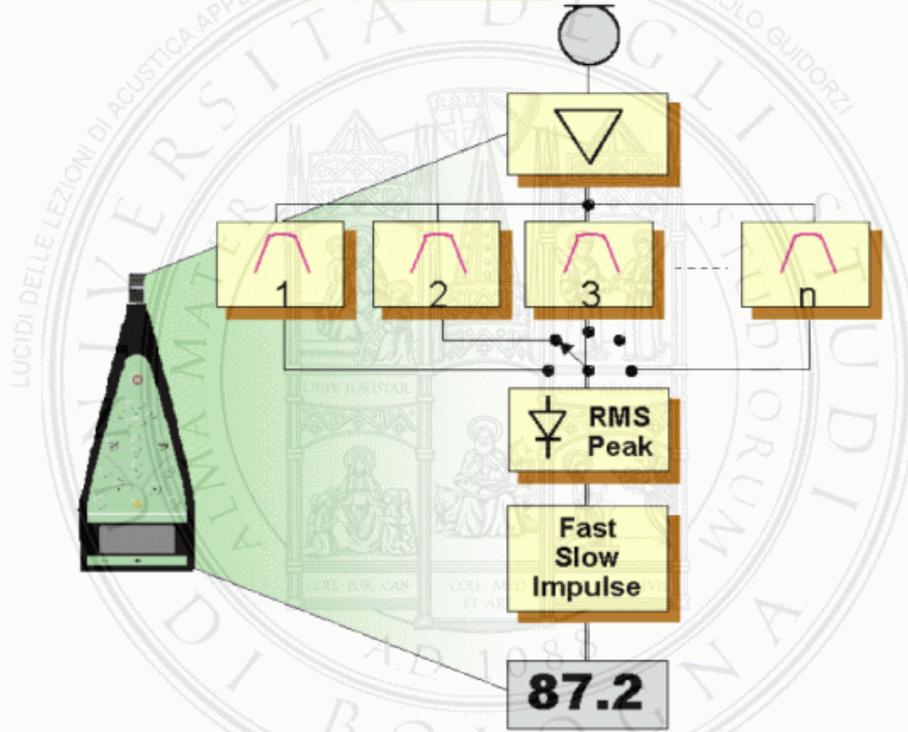


Image Courtesy of Brüel & Kjær

FONOMETRO – ANALISI IN FREQUENZA PARALLELA

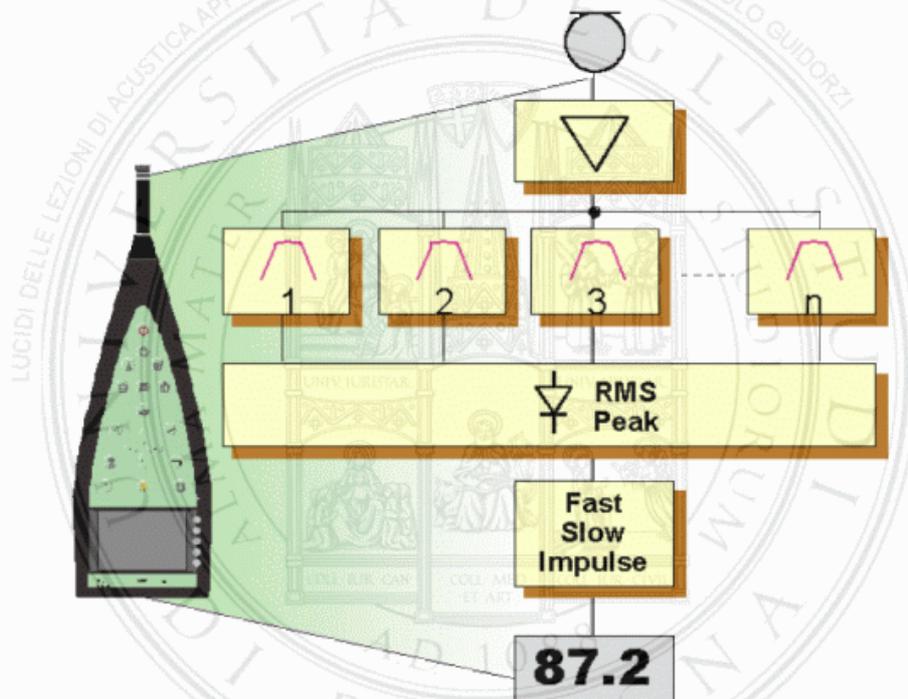


Image Courtesy of Brüel & Kjær

**FONOMETRO IN TEMPO REALE**

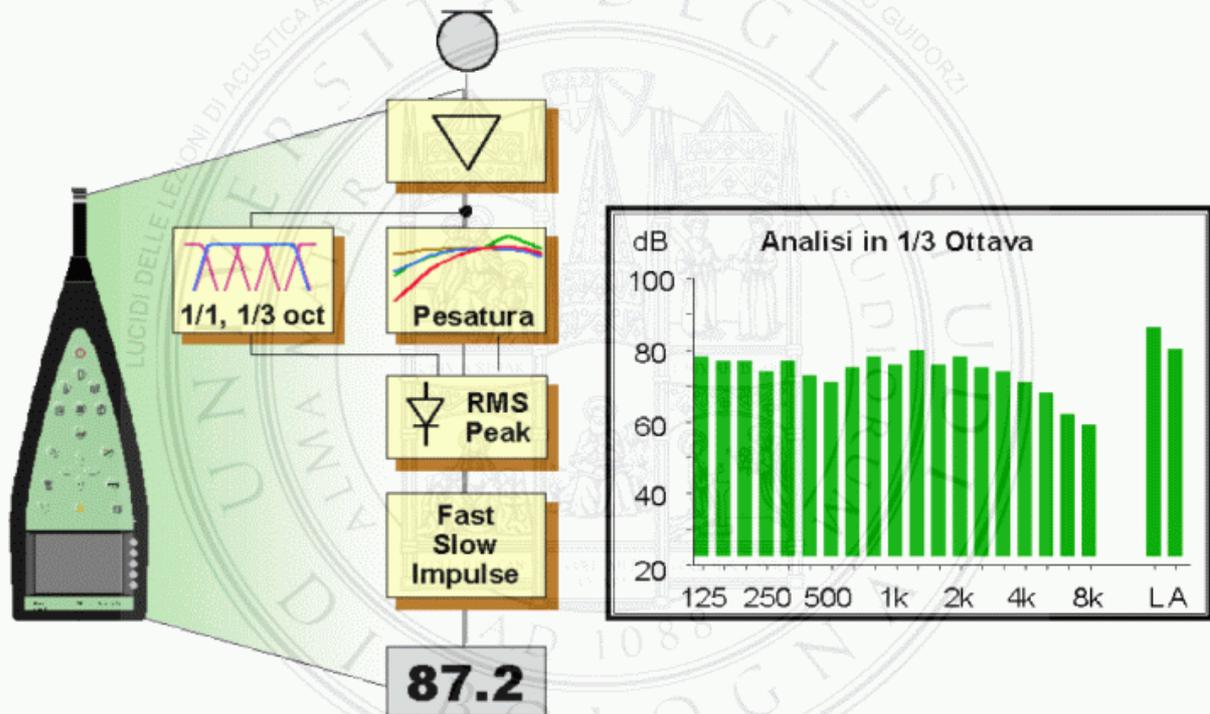
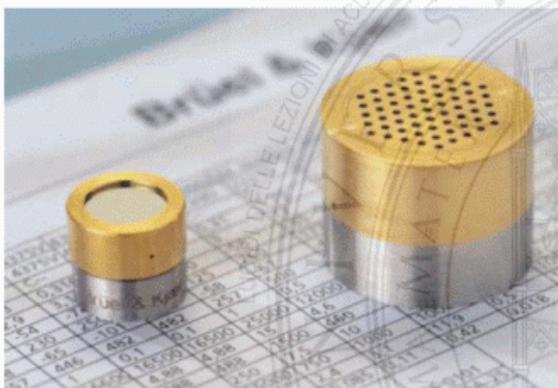


Image Courtesy of Brüel & Kjær

**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

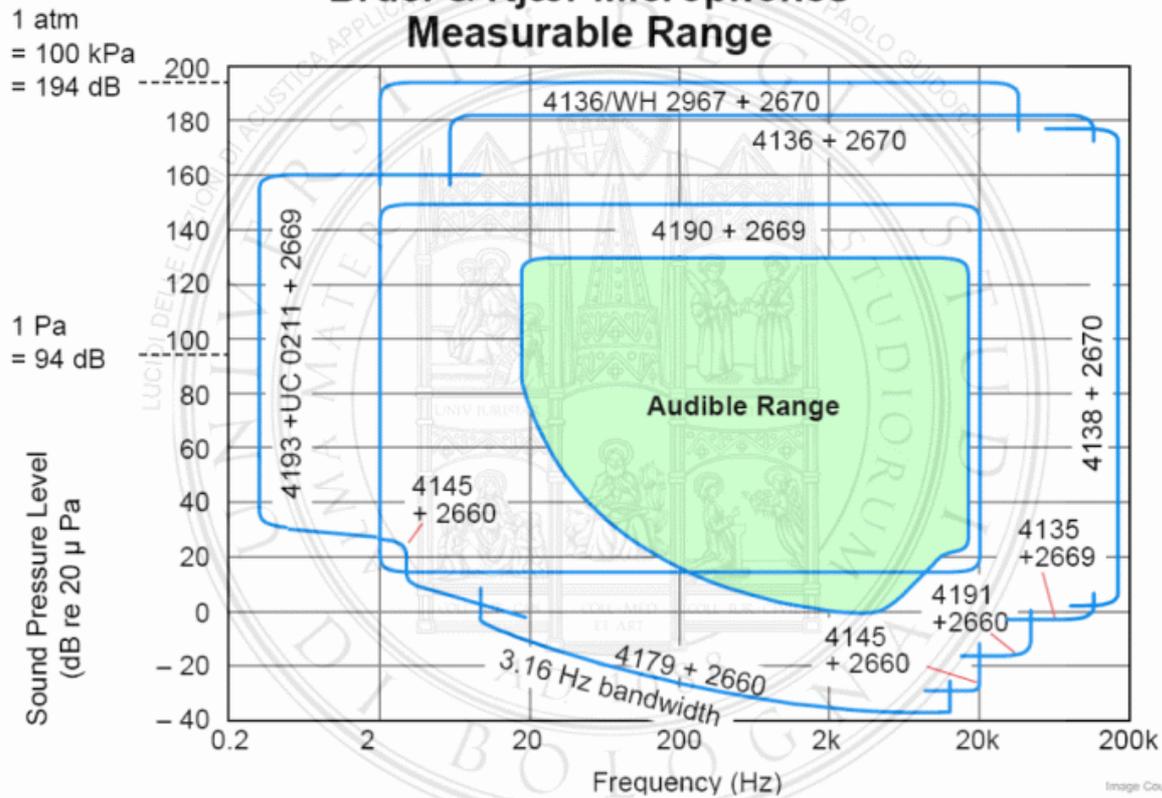
**Altre tipologie di microfono:**

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

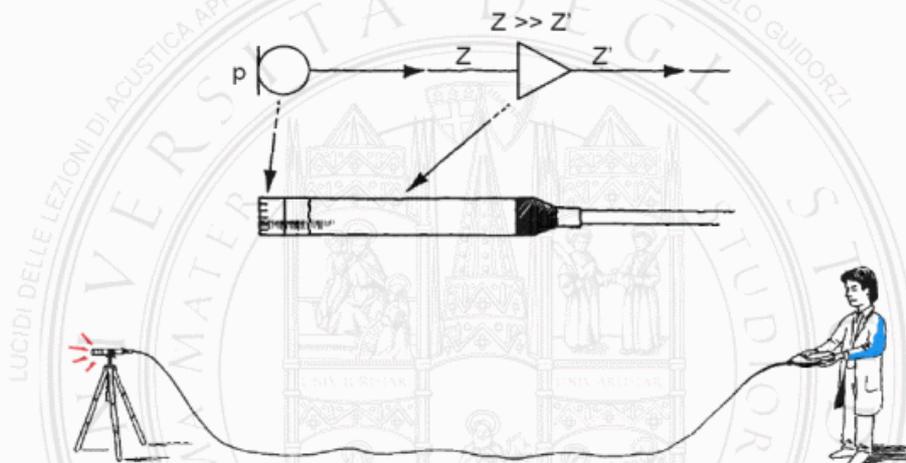
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>

Image Courtesy of Brüel & Kjær

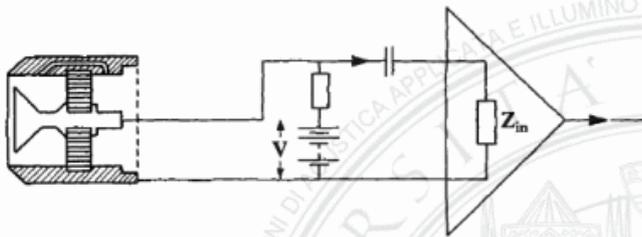
## Brüel & Kjær Microphones Measurable Range



## MOVIMENTO DEL DIAFRAMMA IN SEGUITO A UNA VARIAZIONE DI PRESSIONE

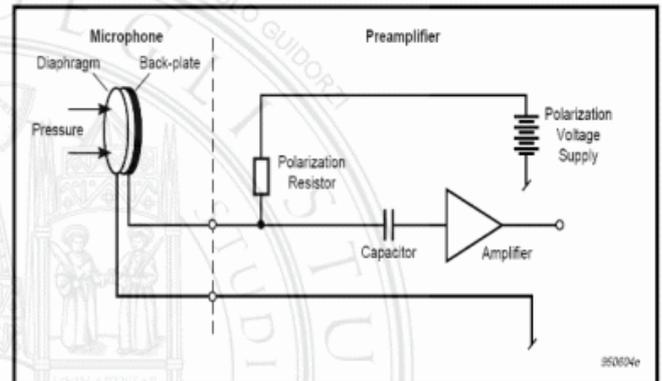


Il microfono a condensatore converte le variazioni di pressione acustica in segnale elettrico. La capsula microfonica è connessa a un preamplificatore, posto molto vicino alla capsula stessa. Il compito del preamplificatore è soprattutto quello di convertire l'uscita ad alta impedenza del microfono in una linea a bassa impedenza, tale da permettere l'utilizzo di cavi lunghi ed essere il più possibile immune da disturbi elettrici ed elettromagnetici.



$$\left. \begin{aligned} Q &= CV \\ C &= \epsilon \frac{A}{d} \end{aligned} \right\} \rightarrow V = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{\epsilon A} d \rightarrow \Delta V = \frac{Q}{\epsilon A} \Delta d$$

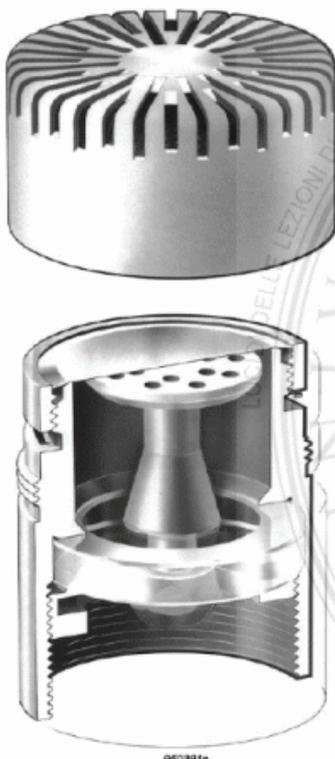
Q: carica sul piatto posteriore  
 C: capacità del microfono  
 V: tensione di polarizzazione  
 A: area del microfono  
 d: distanza tra diaframma e piatto  
 ε: costante dielettrica del vuoto



La capsula microfonica è formata da un sottile diaframma metallico molto vicino a un piatto posteriore. Questo è in pratica un condensatore, la cui capacità varia al variare della distanza dal piatto del diaframma, il quale è mosso dalle onde sonore. La carica  $Q$  viene mantenuta costante dalla tensione di polarizzazione; il variare di capacità dovuto alle onde sonore porta a un variare di differenza di potenziale, proporzionale alla variazione di pressione sonora.

Esistono anche microfoni a condensatore prepolarizzati, il cui principio di funzionamento è lo stesso ma non richiedono tensione di polarizzazione.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta d}{d}$$

For typical measurement microphone:

- diameter 12.5 mm
- thickness of diaphragm 5 μm
- distance between diaphragm and backplate 20 μm
- polarisation voltage 200 V
- sensitivity 50 mV/Pa

For 94 dB = 1 Pa the diaphragm moves

$$\Delta d = \frac{\Delta V \times d}{V} = \frac{50 \text{ mV} \times 20 \text{ } \mu\text{m}}{200 \text{ mV}} = 5 \text{ nm}$$

Diameter of diaphragm	Pressure (level re 20μPa)	Diaphragm's movement
12.5mm	1Pa (94dB)	5nm (5 × 10 <sup>-9</sup> m)
12.5mm	0.02Pa (60dB)	1 Å (10 <sup>-10</sup> m)
12500km (thickness of diaphragm 5km)	0.02Pa (60dB)	0.1m (10 <sup>-1</sup> m)
	0.0002Pa (20dB)	0.001m (10 <sup>-3</sup> m)

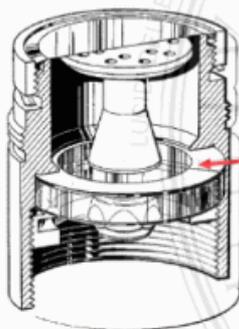
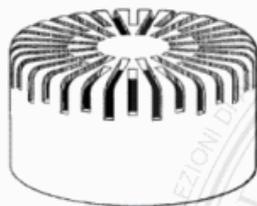
Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



Image Courtesy of Brüel & Kjær

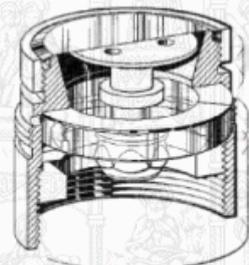
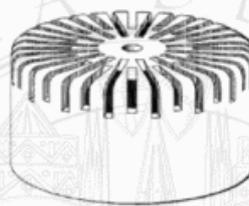


TIPOLOGIE DI MICROFONI

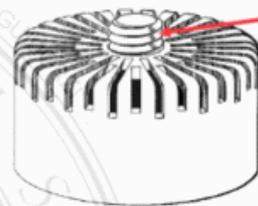


Vent resistance

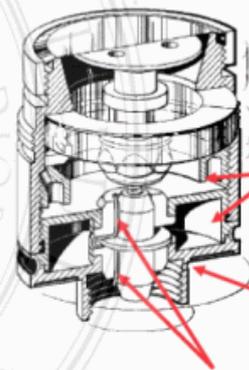
General Purpose



High Frequency



Spacer Mounting Thread



Cavities

External Vent Opening

Vent

Intensity

Image Courtesy of Brüel & Kjær

## SENSIBILITA' E RANGE DI FREQUENZA

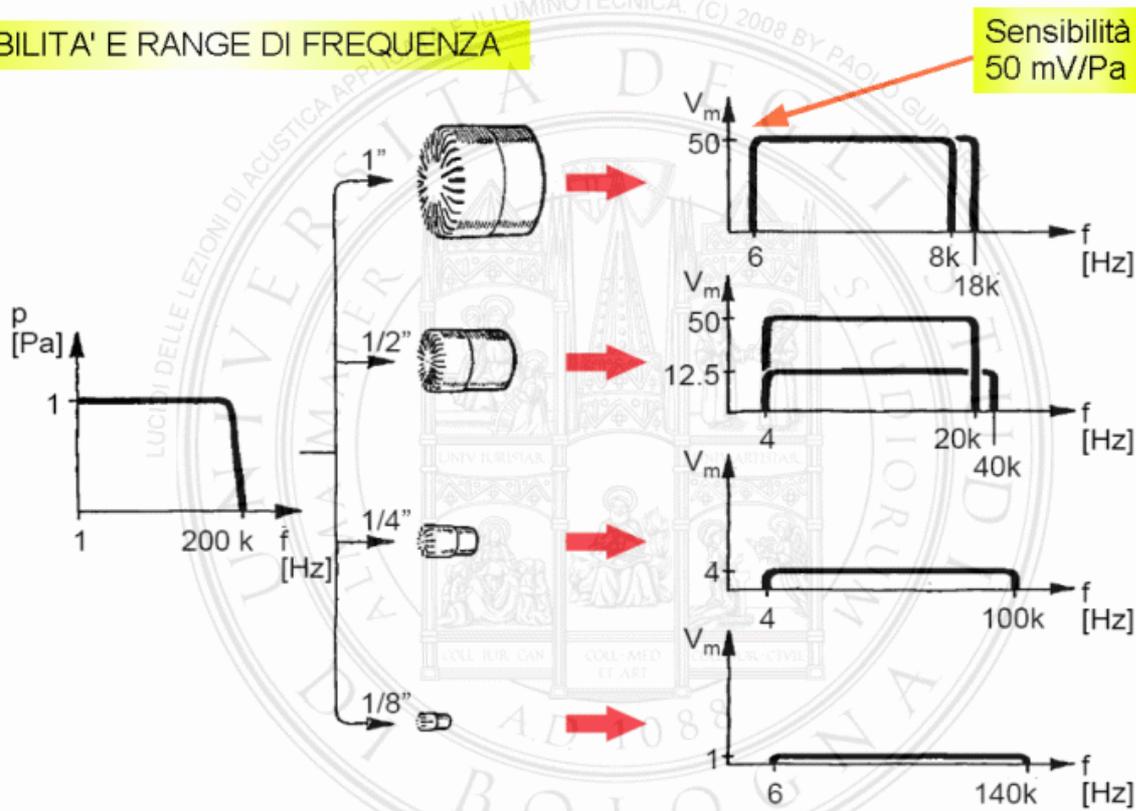
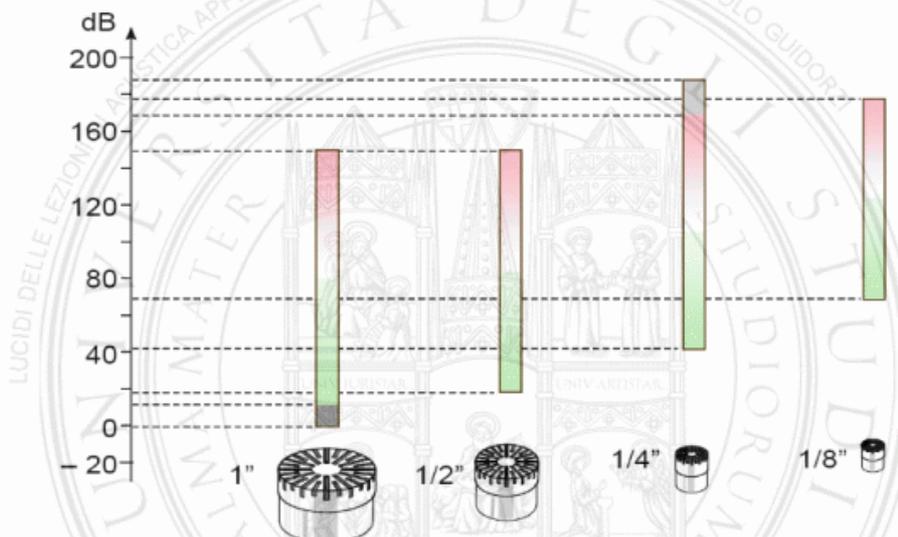


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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%

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## REGIONE OPERATIVA

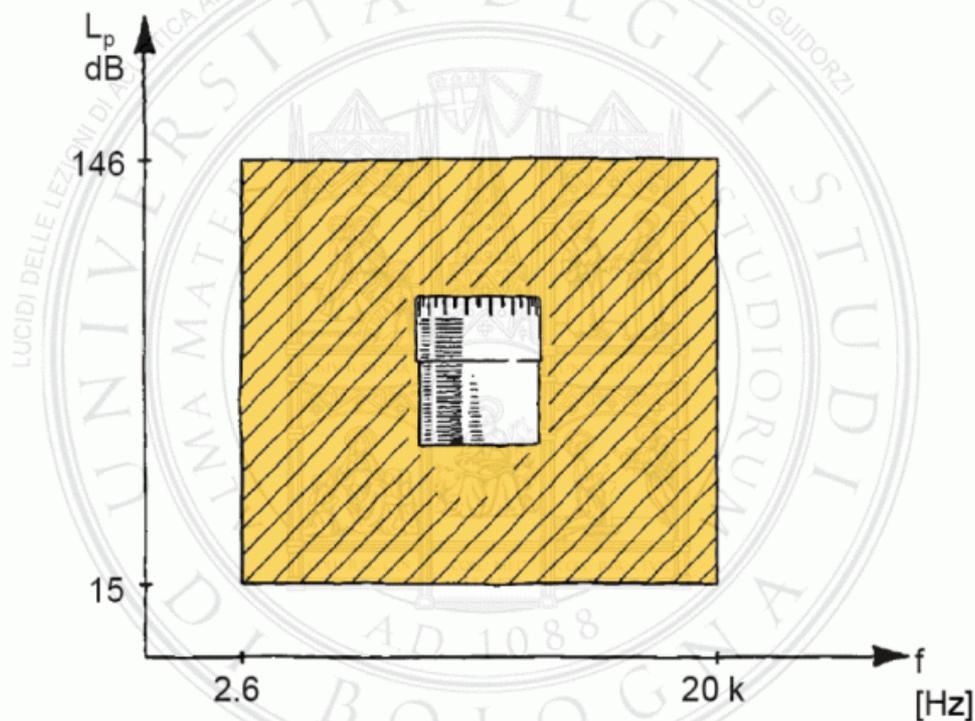
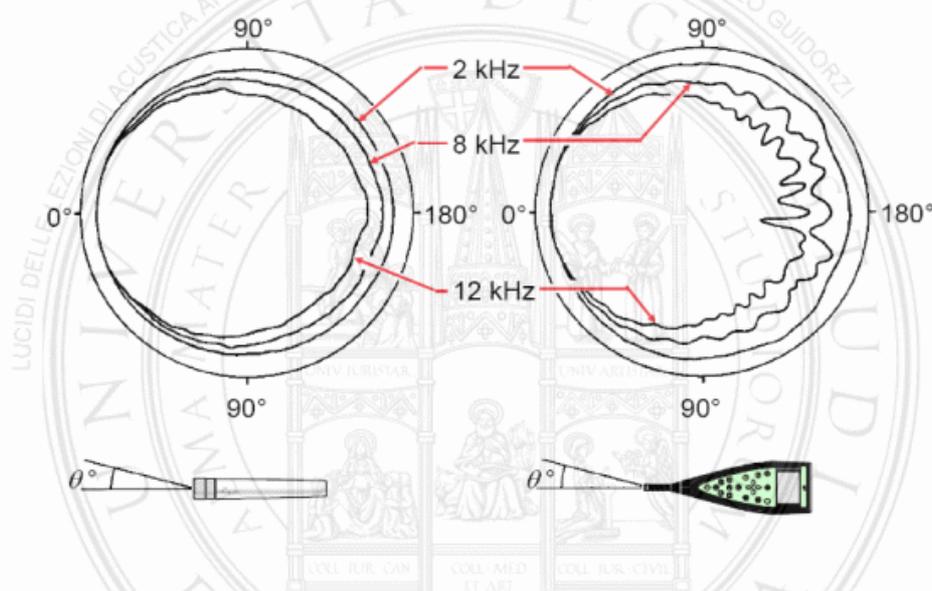


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## CARATTERISTICHE DIREZIONALI

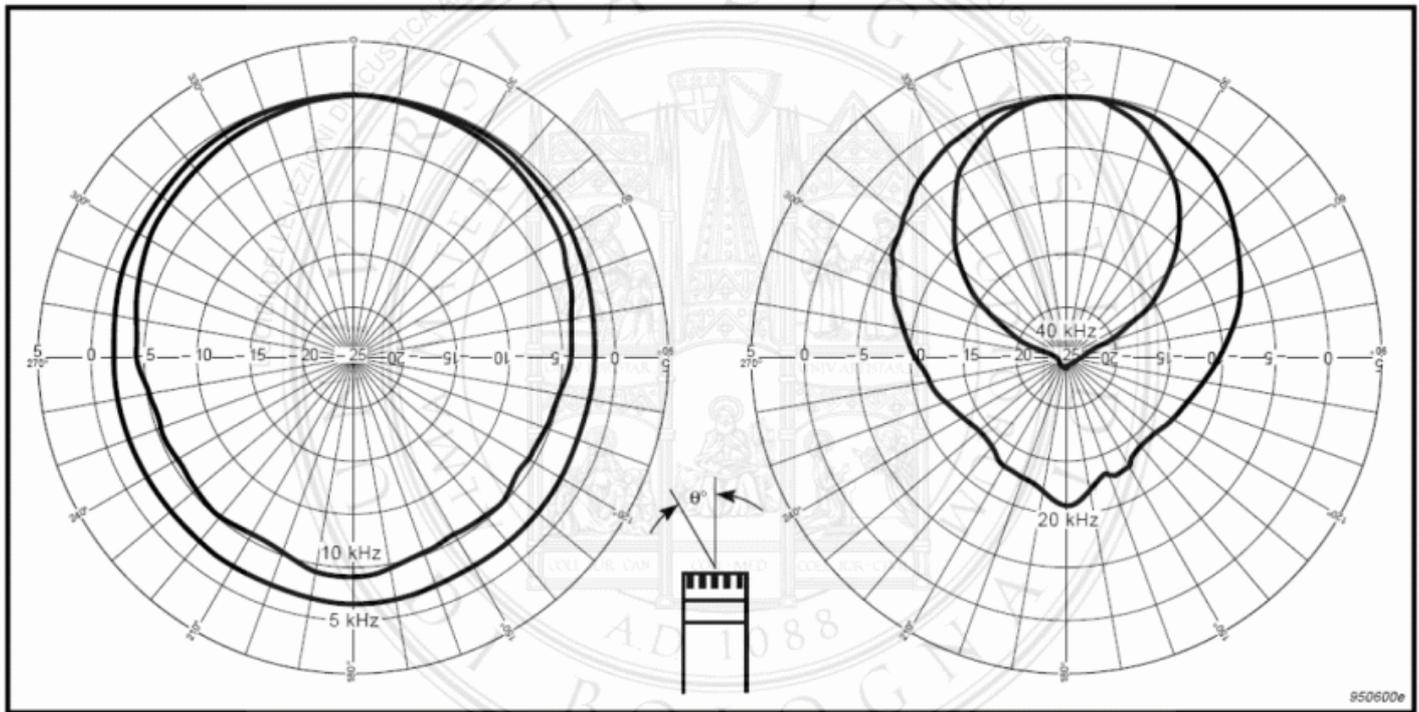
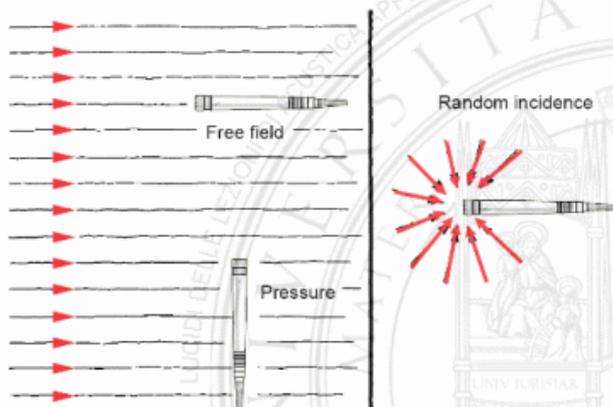


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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

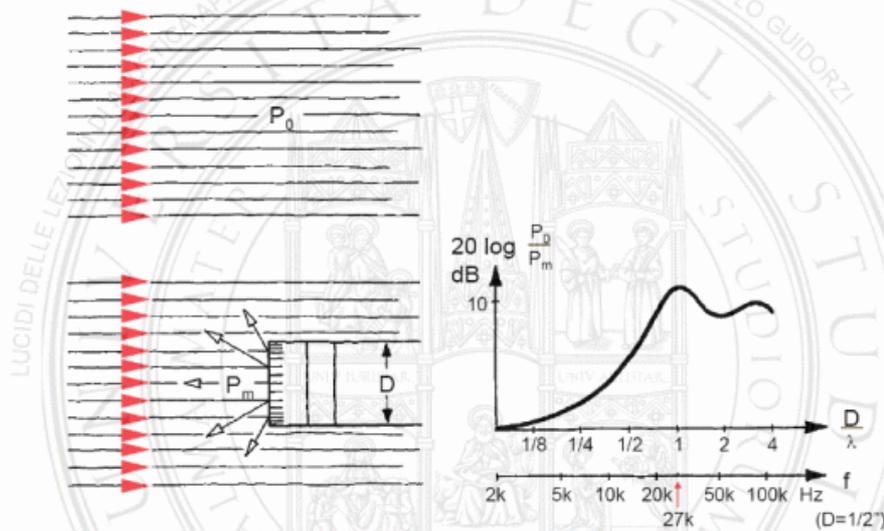
Il microfono **per campo libero** ha una risposta uniforme al campo sonoro che esisterebbe se il microfono non ci fosse. Va notato che ogni microfono disturba il campo acustico in cui è posto, ma il microfono per campo libero è progettato proprio per compensare la sua stessa presenza.

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**.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## CORREZIONE PER CAMPO LIBERO

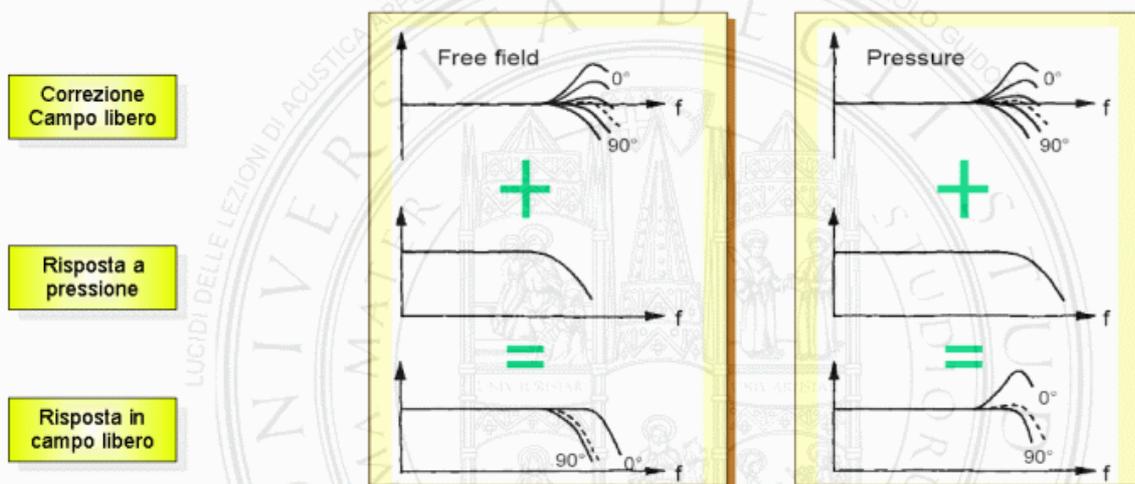


Quando un microfono è posto in un campo sonoro, lo modifica con la sua stessa presenza. Sia  $p_0$  la pressione acustica in un campo sonoro in assenza del microfono.

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.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## 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 alte frequenze, 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

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## CARTA DI CALIBRAZIONE

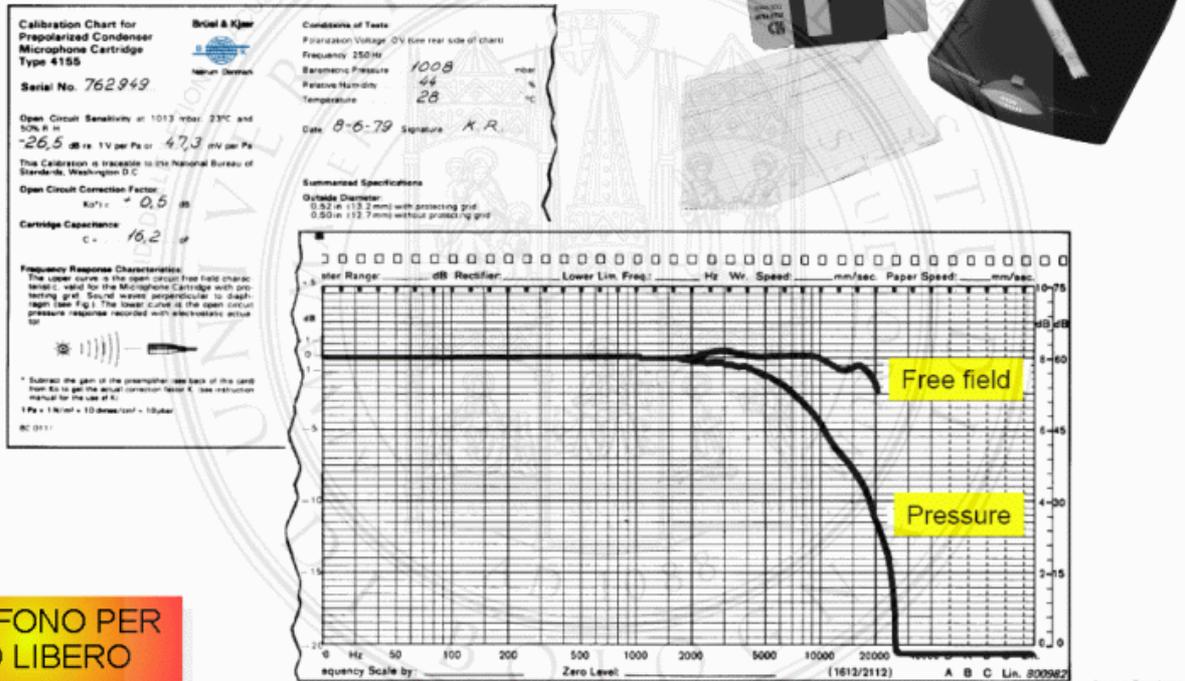
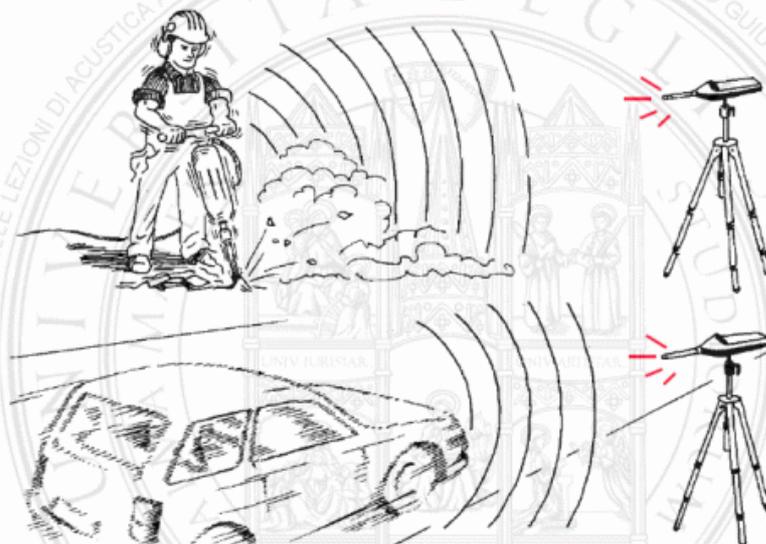
MICROFONO PER  
CAMPO LIBERO

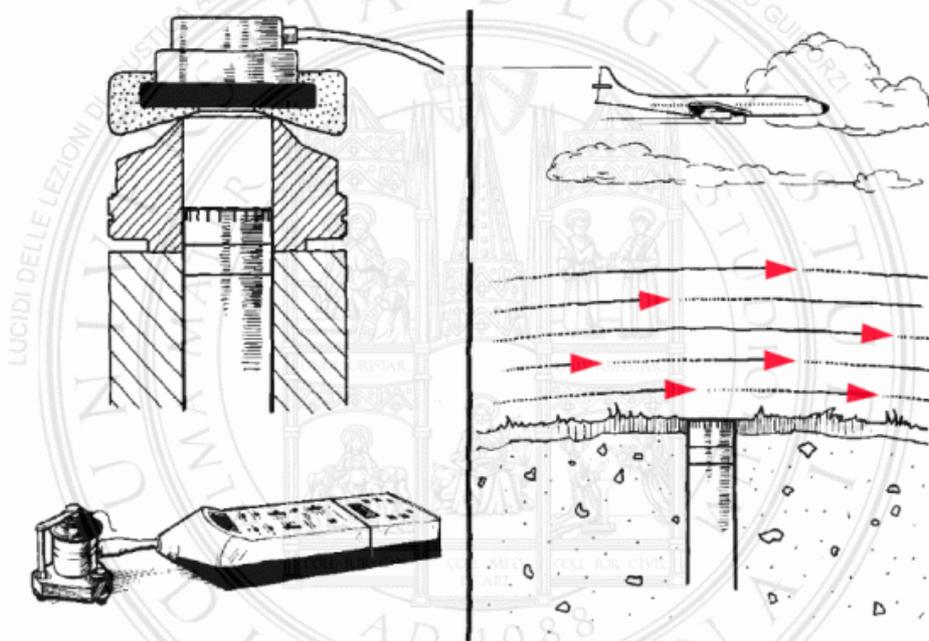
Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## MICROFONO PER CAMPO LIBERO

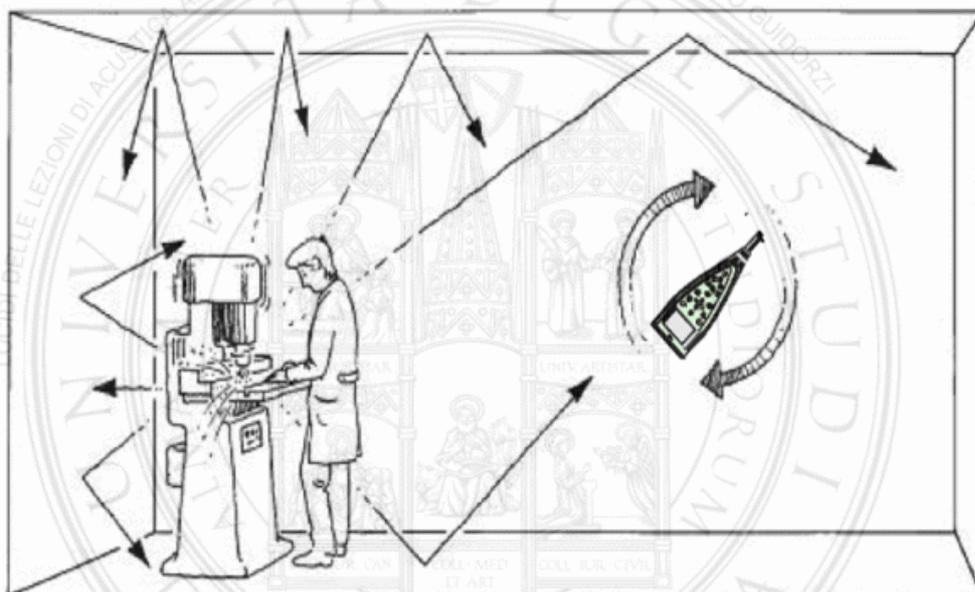


Il microfono per campo libero va usato nei casi in cui il suono arriva principalmente da una sola direzione, e va puntato verso la sorgente.  
Si utilizza per misure all'aperto o all'interno di edifici quando non sono presenti riflessioni del suono (per esempio in camera anecoica).

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**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. Image Courtesy of Brüel & Kjær

**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. Image Courtesy of Brüel & Kjær

## CONDIZIONI METEOROLOGICHE

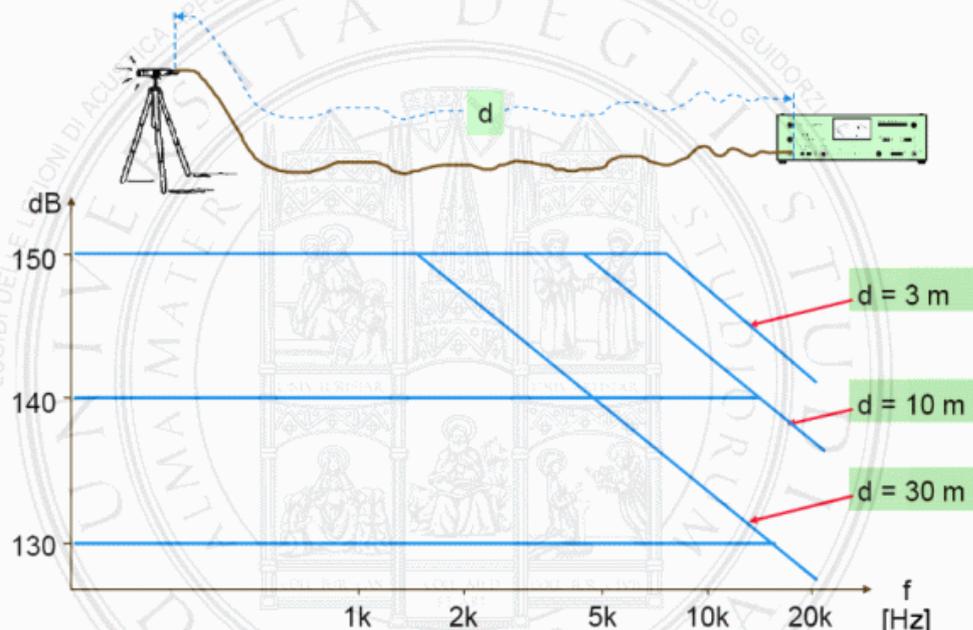


Il microfono deve resistere alle intemperie e all'umidità.

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"

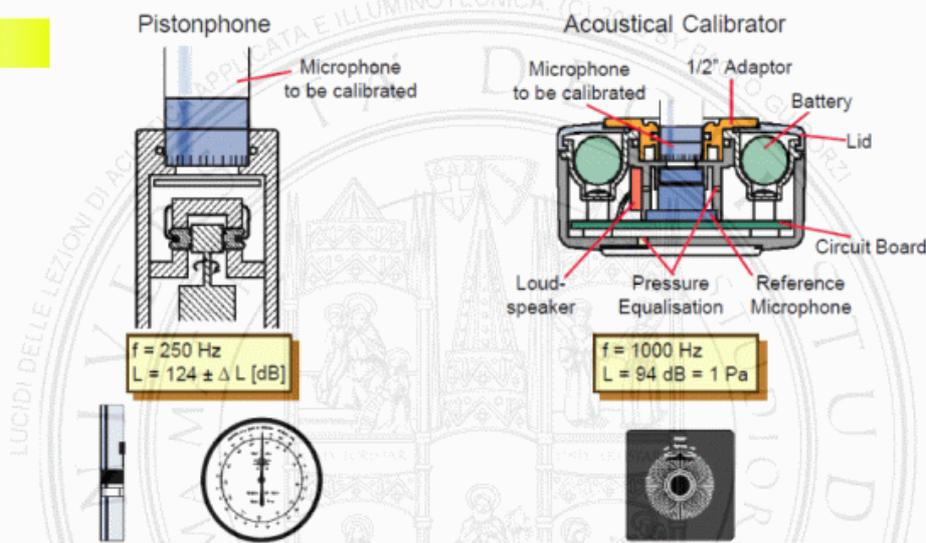
Image Courtesy of Brüel & Kjær

## LUNGHEZZA DEI CAVI



L'utilizzo di cavi eccessivamente lunghi può portare a una degradazione della risposta in frequenza

Image Courtesy of Brüel & Kjær

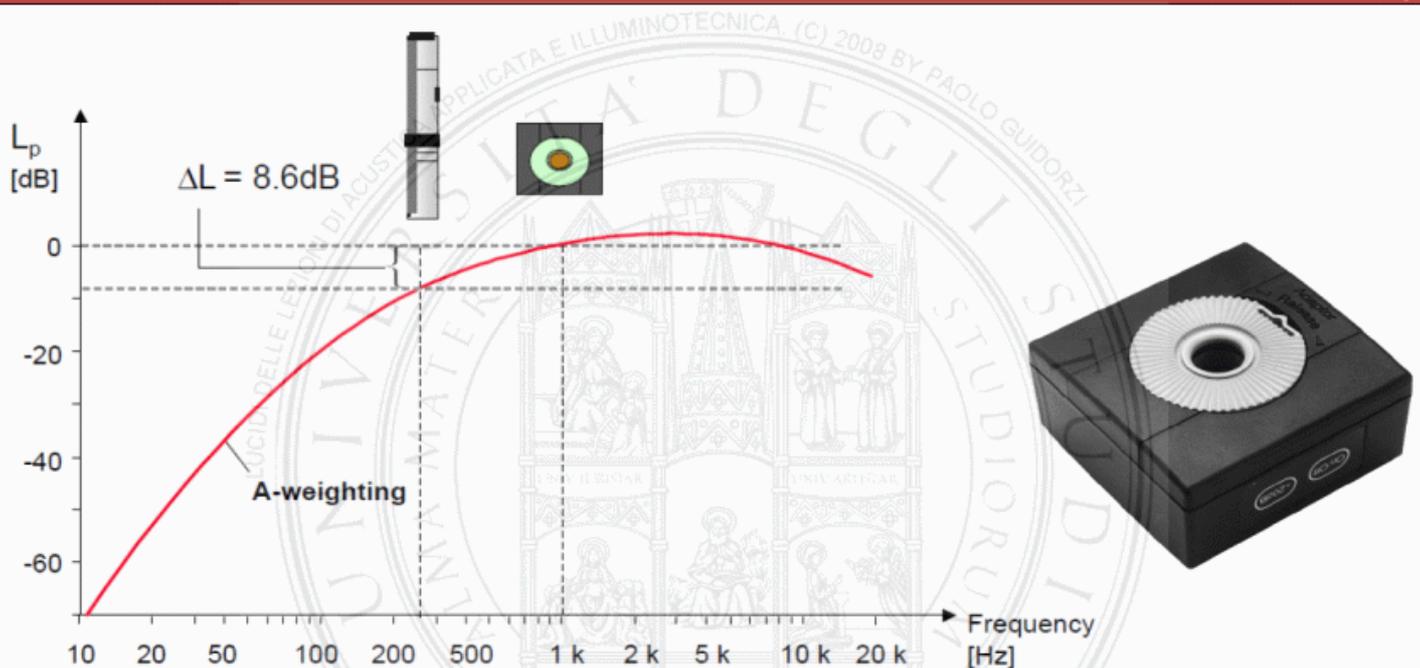
**CALIBRAZIONE**


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.

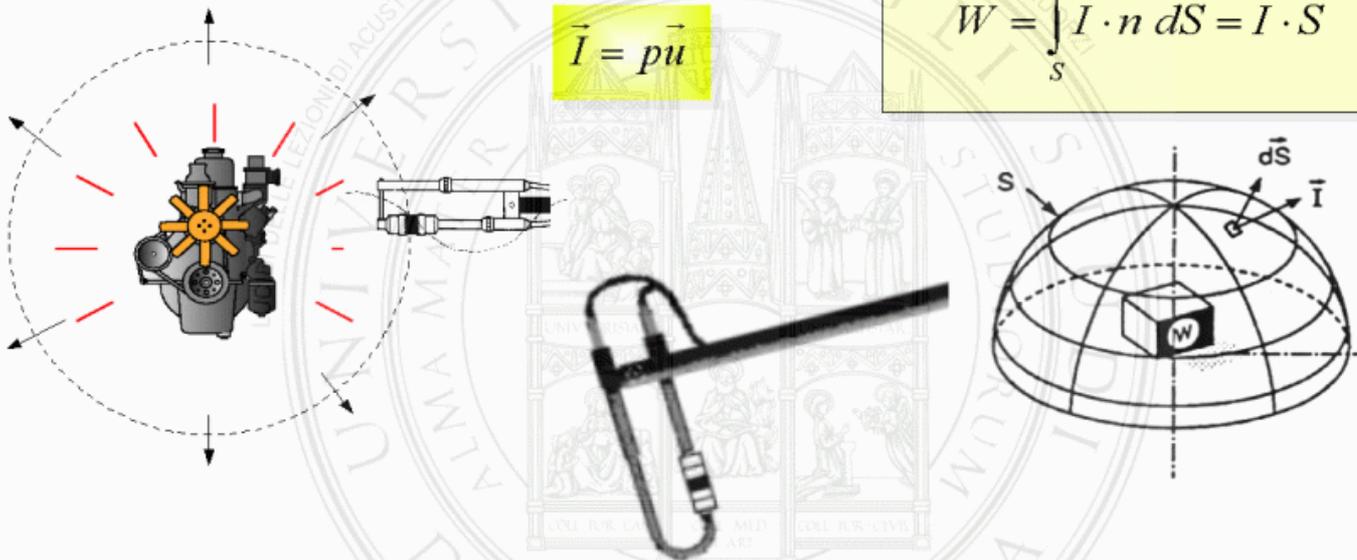
Image Courtesy of Brüel & Kjær



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

Image Courtesy of Brüel & Kjær

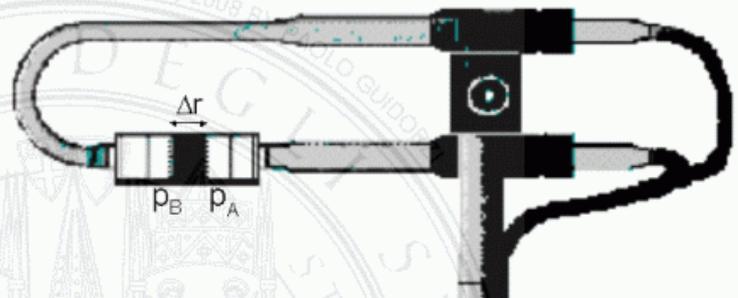
## MISURA DELL'INTENSITA'



La misura dell'intensità (grandezza vettoriale) richiede l'utilizzo di una sonda formata da 2 microfoni molto vicini.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

$$\langle I_r \rangle = \overline{p(t) \cdot u_r(t)}$$



## Newton

$$F = ma$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$u = \int \frac{F}{m} dt$$

## Eulero

$$a = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$u = -\int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

$$u = -\int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt$$



$$u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_B - p_A}{\Delta r} dt$$

$$p = \frac{p_A + p_B}{2}$$

$$I = p \cdot u$$

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho\Delta r} \int (p_B - p_A) dt$$

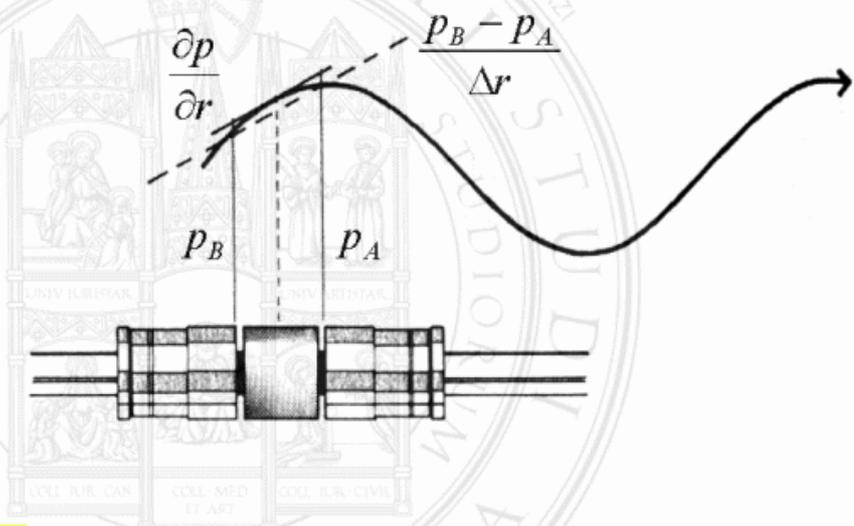
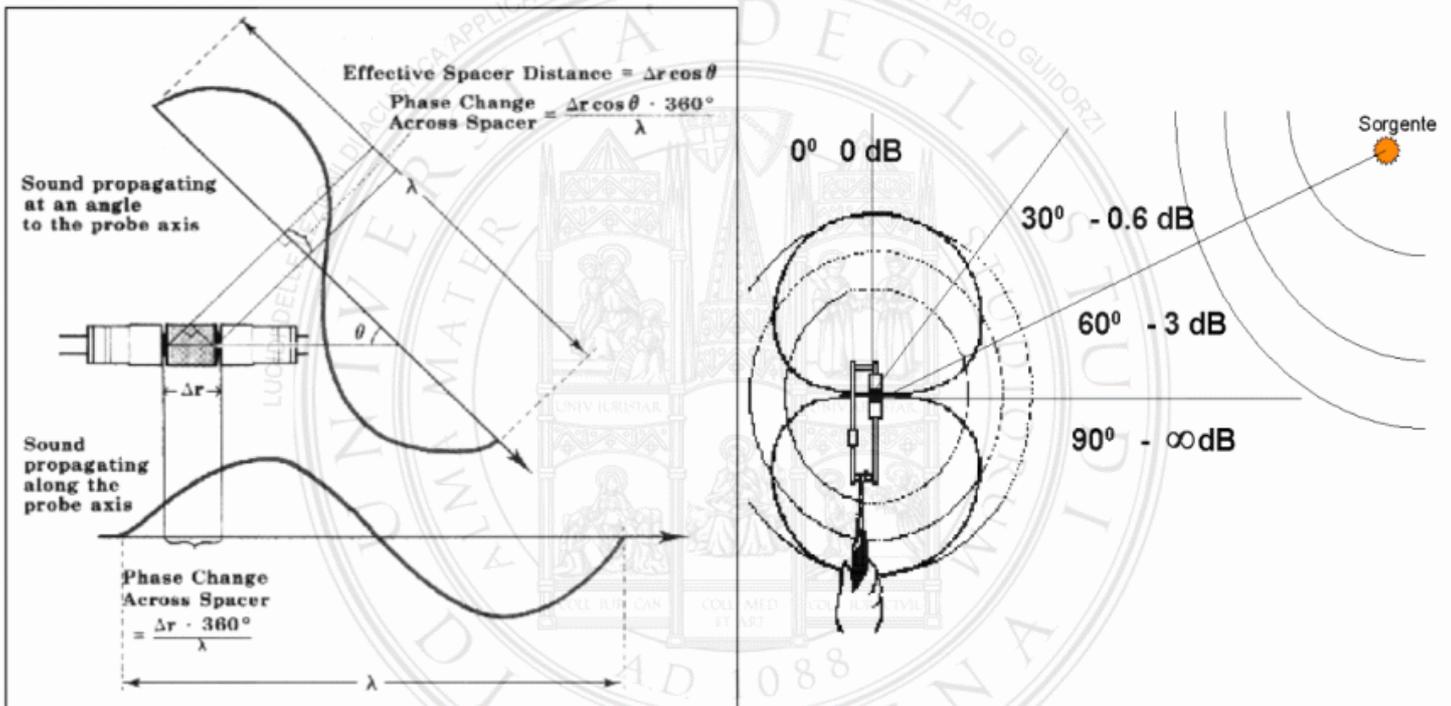
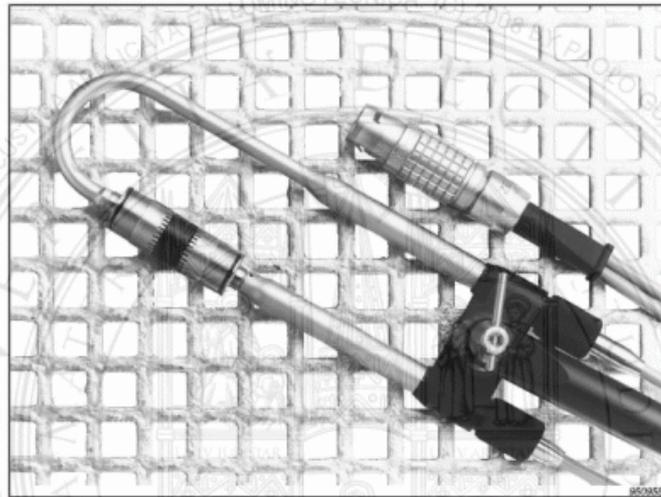


Image Courtesy of Brüel & Kjær



La sonda è direzionale. Si misura la componente dell'intensità in una certa direzione

Image Courtesy of Brüel & Kjær



La misura dell'intensità acustica richiede strumentazione molto precisa. Sono numerose le possibili cause di errore, in parte compensate da un'attenta calibrazione dello strumento di misura.

- errore dovuto all'approssimazione della differenza finita
- errore di disaccoppiamento di fase tra i due microfoni
- errore di misura

La calibrazione dello strumento per la misura intensimetrica è però piuttosto complicata

Image Courtesy of Brüel & Kjær

## Errore di Approssimazione della Differenza Finita

**Precisione entro 1 dB:**

Distanziale	Limiti
50 mm	fino a 1.25 kHz
12 mm	fino a 5 kHz
12 mm	fino a 10 kHz (*)

(\*) con correzione della risonanza alle alte frequenze

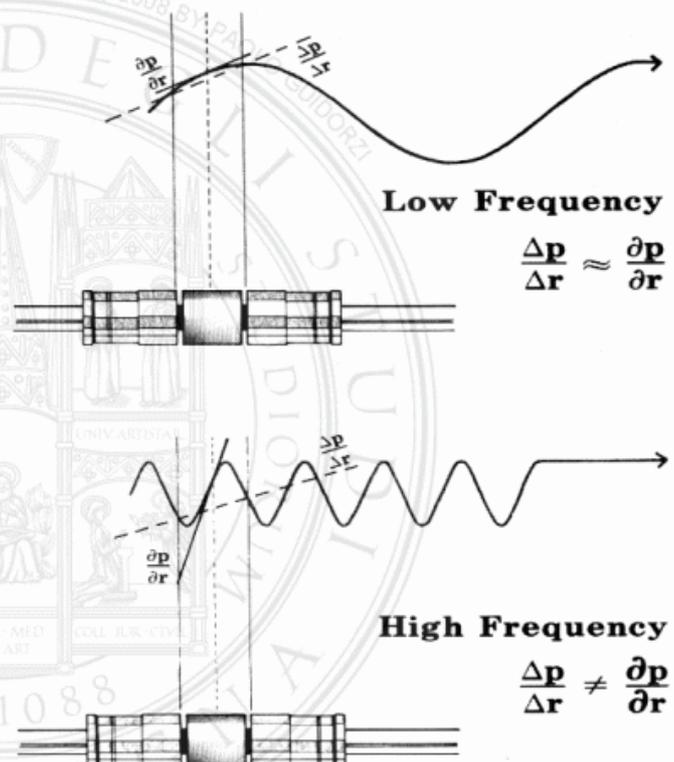


Image Courtesy of Brüel & Kjær

- **L'Intensità Sonora è proporzionale alla fase presente sul distanziale**
- Il disaccoppiamento di fase del sistema di misura (differenza tra le risposte in fase dei 2 microfoni, ad es.  $\pm 0,3^\circ$ ) introduce un errore sul valore calcolato di Intensità Sonora

Free Field Phase Change Over Spacer Distance

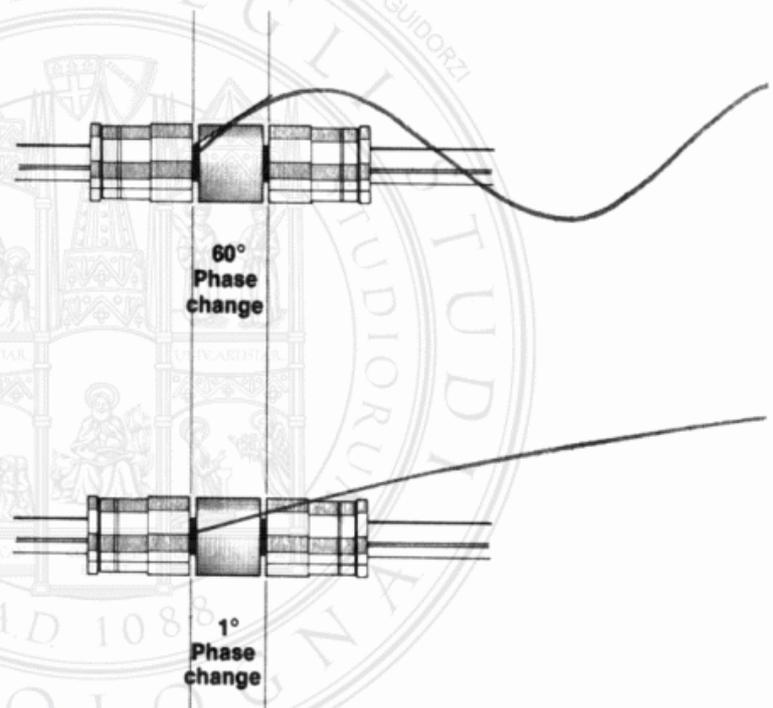
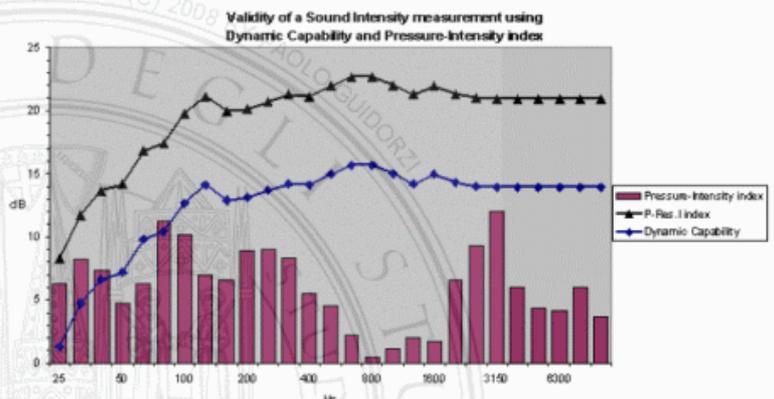


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**Il disaccoppiamento di fase è molto più critico alle basse frequenze.**



Una complicata procedura di calibrazione e verifica permette infine di effettuare la misura di intensità, tenendo conto dei limiti di dinamica dello strumento e di frequenza dovuti alla distanza tra i microfoni e alle differenze di risposta in fase degli stessi.

Va notato che la grandezza vettoriale intensità può avere componenti attive e reattive. La reattività del campo sonoro si descrive con l'indice pressione-intensità, definito dalla differenza tra livello di pressione e livello di intensità  $L_p - L_i$ .

In campo libero e per onde piane progressive si ha campo completamente attivo e quindi l'indice pressione-intensità tende a zero. Nel campo vicino a una sorgente e in ambienti riverberanti la reattività del campo acustico cresce (sfasamento tra  $u$  e  $p$ ), e di conseguenza l'indice pressione-intensità cresce. Per misurare livelli di intensità con errore minore di 1 dB, questo indice deve essere minore di 10 dB in tutte le bande di interesse.

La definizione dell'indice pressione-intensità come differenza tra  $L_p$  e  $L_i$  in realtà non è del tutto corretta perché potrebbe essere negativa e questo è assurdo da un punto di vista fisico (avrei un campo che si propaga più velocemente di un'onda piana progressiva); si definisce quindi più correttamente l'indice pressione-intensità come la differenza tra il livello di un'altro descrittore acustico (la densità sonora) col livello di intensità.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

Useful frequency range for an accuracy of 1 dB

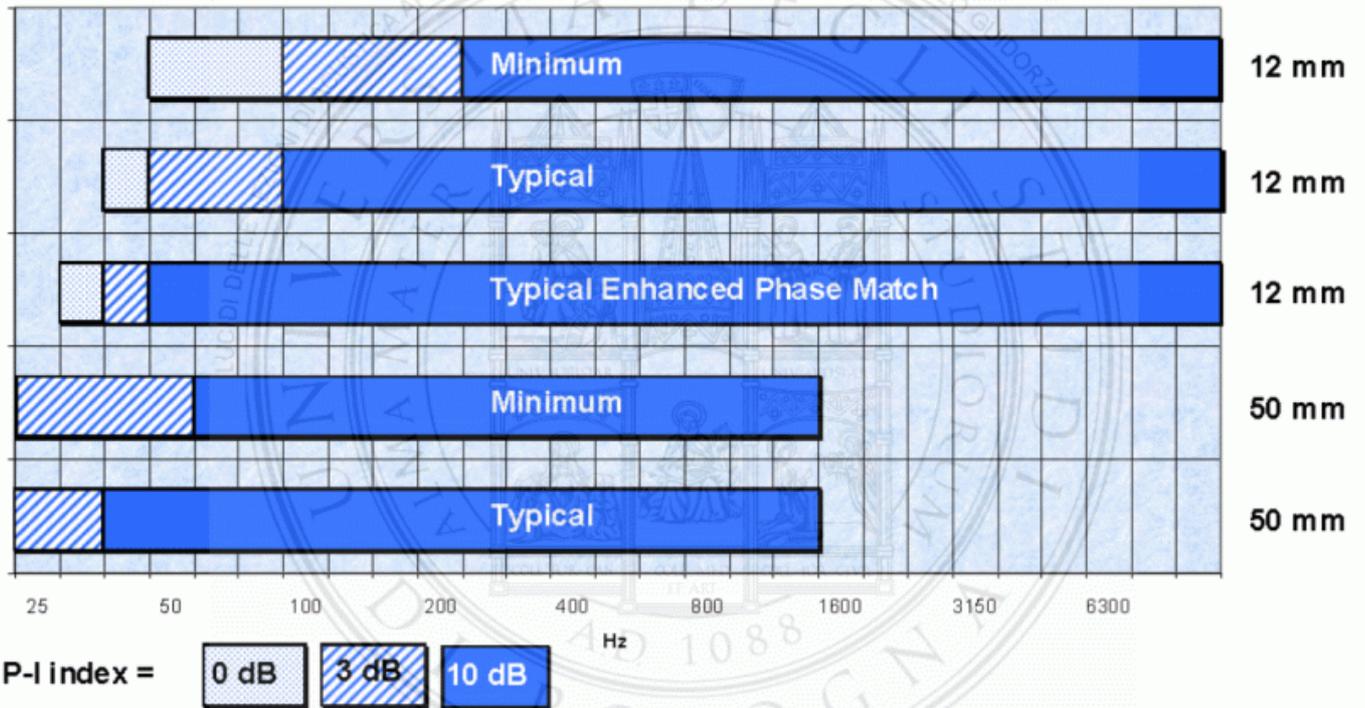
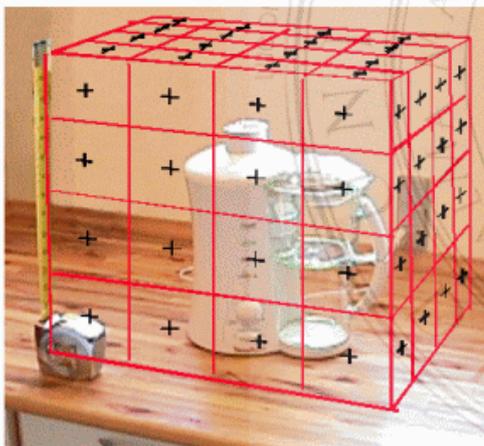
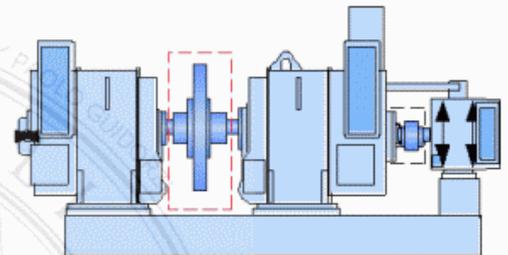


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Perché usare la tecnica intensimetrica ?

- Molto meno sensibile al rumore di fondo
- Offre contemporaneamente informazioni sulla direttività
- Consente la parzializzazione della sorgente sonora
- Con sorgenti complesse è in grado di disaccoppiare i vari elementi



Intensity (z)  
Flow: Pos  
Freq: 200-315Hz

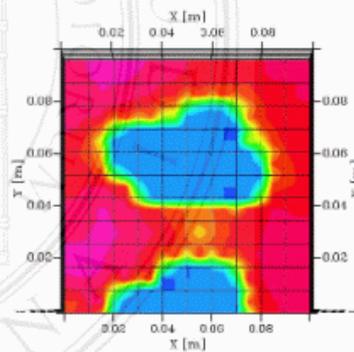
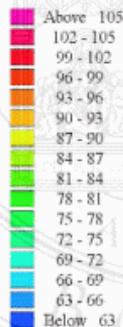


Image Courtesy of Brüel & Kjær

## LA TRASFORMATA DI FOURIER

$$x(t) \xrightarrow{F} X(f)$$

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

Trasformata **diretta**  
Tempo  $\rightarrow$  Frequenza

$$X(f) \xrightarrow{F^{-1}} x(t)$$

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

Trasformata **inversa**  
Frequenza  $\rightarrow$  Tempo

$$x(t) \xrightarrow{F} X(f)$$

$$x(t - t_0) \xrightarrow{F} X(f) e^{-jt_0 2\pi f}$$

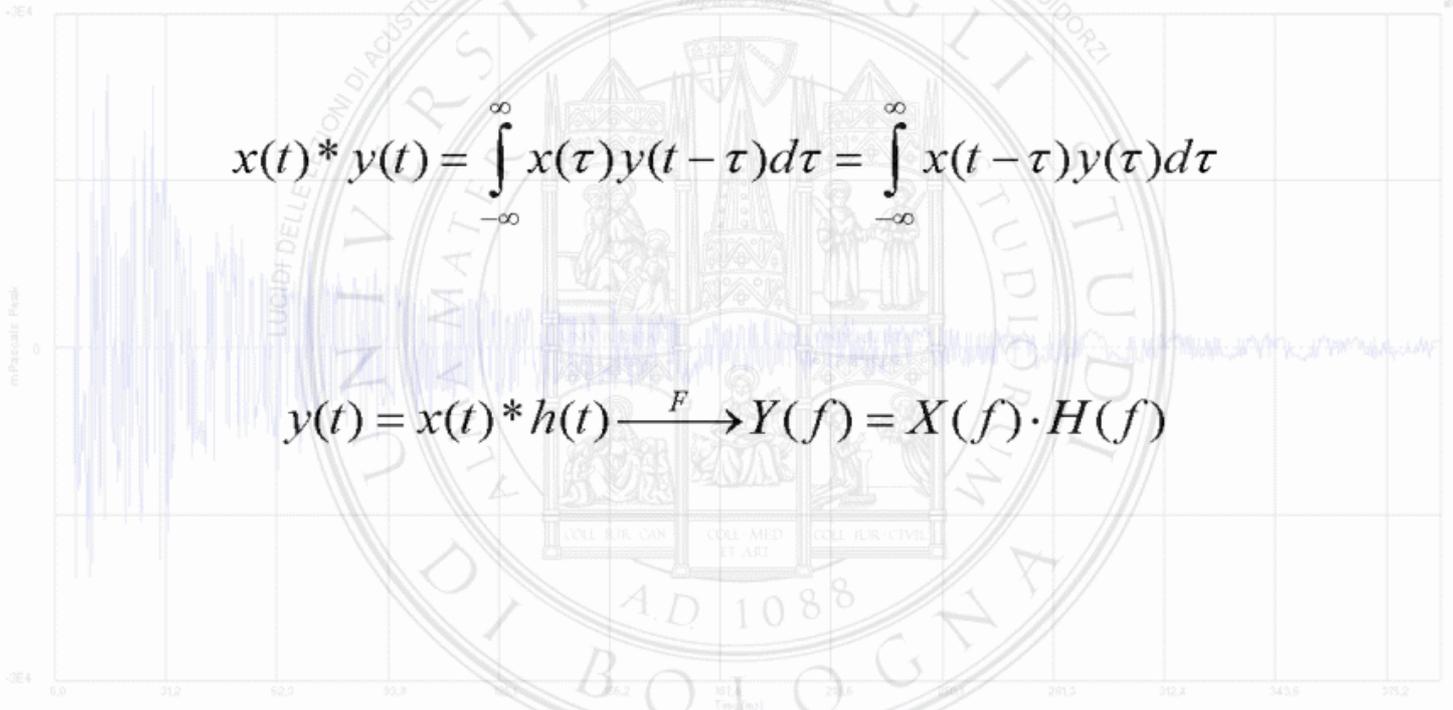
$$\dot{x}(t) \xrightarrow{F} j2\pi f \cdot X(f)$$

$$\int_{-\infty}^t x(t) \xrightarrow{F} \frac{1}{2\pi} \frac{X(f)}{jf}$$

## PRODOTTO DI CONVOLUZIONE

$$x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) y(\tau) d\tau$$

$$y(t) = x(t) * h(t) \xrightarrow{F} Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$



## LA DELTA DI DIRAC

$$D(t, \Delta) \xrightarrow{\Delta \rightarrow 0} \delta(t)$$

$$\delta(t) \xrightarrow{F} 1$$

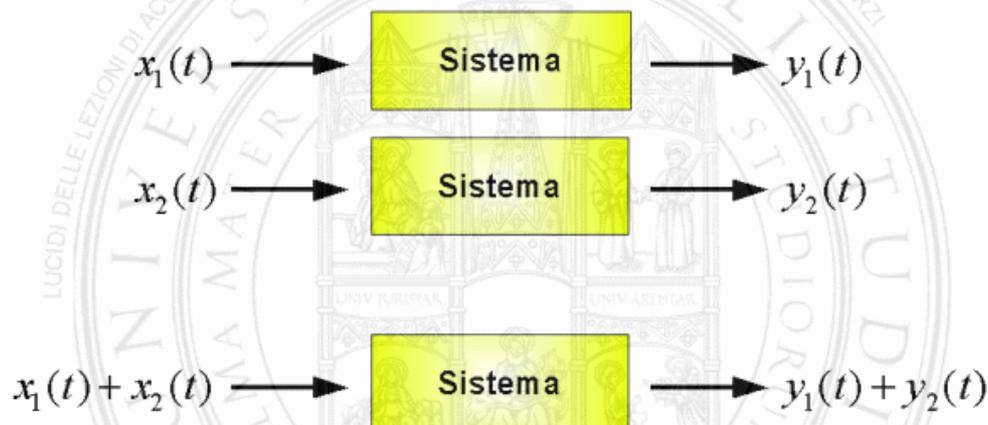
$$x(t) * \delta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau = x(t)$$

$$D(t, \Delta) \xrightarrow{F} \frac{\sin(\pi f \Delta)}{\pi f \Delta} e^{-j\pi f t}$$

$$\frac{\sin(\pi f \Delta)}{\pi f \Delta} e^{-j\pi f t} \xrightarrow{\Delta \rightarrow 0} 1$$

 $D(t, \Delta)$ 
 $\frac{1}{\Delta}$ 
 $0$ 
 $\Delta$ 
 $|F[D(t, \Delta)]|$ 
 $-\frac{1}{\Delta}$ 
 $\frac{1}{\Delta}$ 
 $\frac{2}{\Delta}$ 
 $f$ 

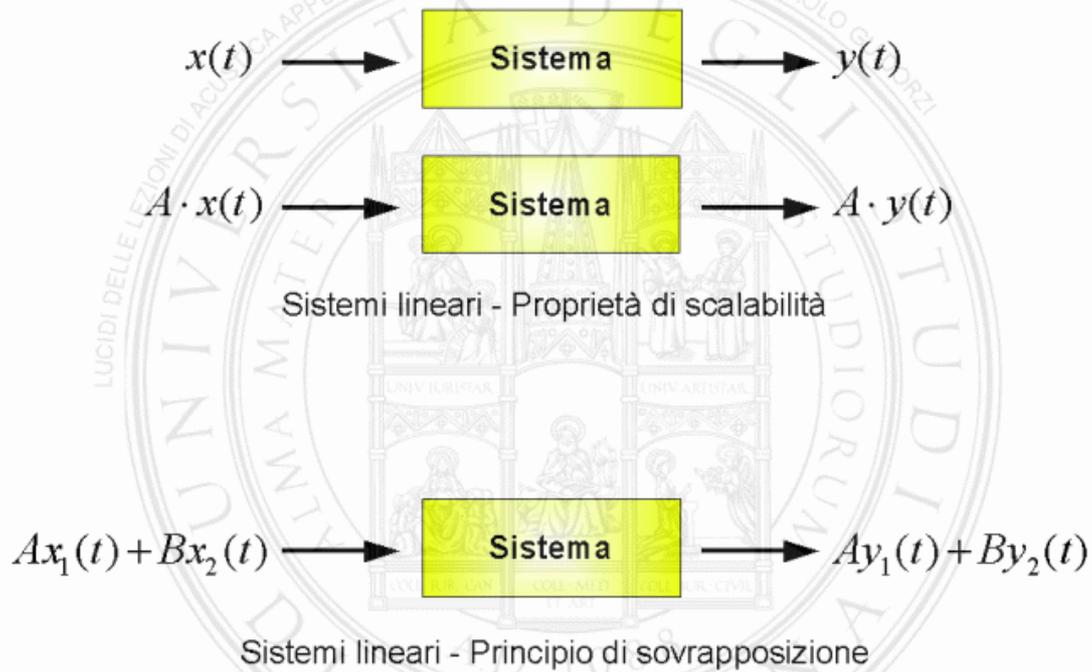
## SISTEMI LINEARI-STAZIONARI



Sistemi lineari - Proprietà di additività

A.D. 1088

BOLOGNA



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:

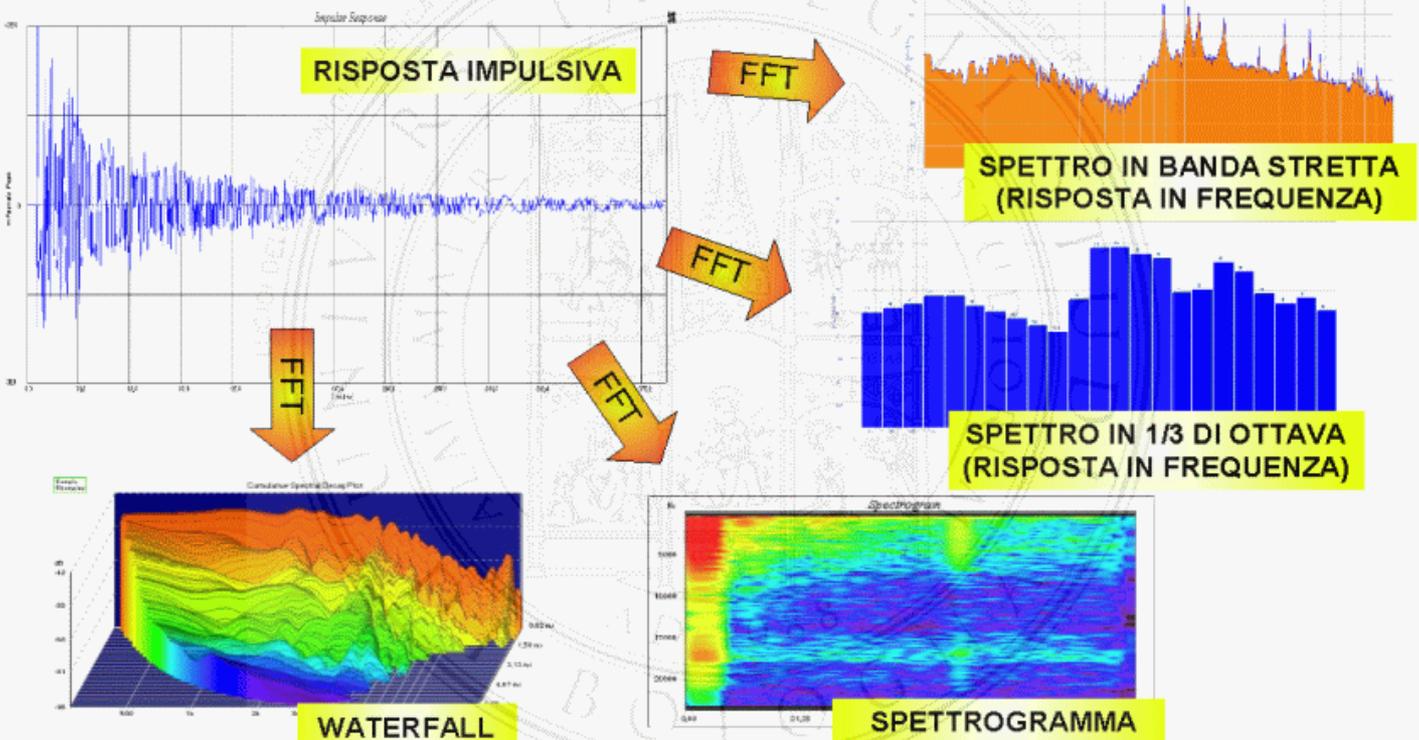
$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

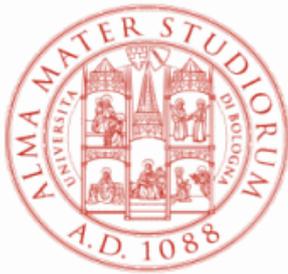
Questo risultato deriva direttamente dalla definizione di prodotto di convoluzione. Dunque risposta all'impulso e risposta in frequenza sono legate dalla trasformata di Fourier:

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

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

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

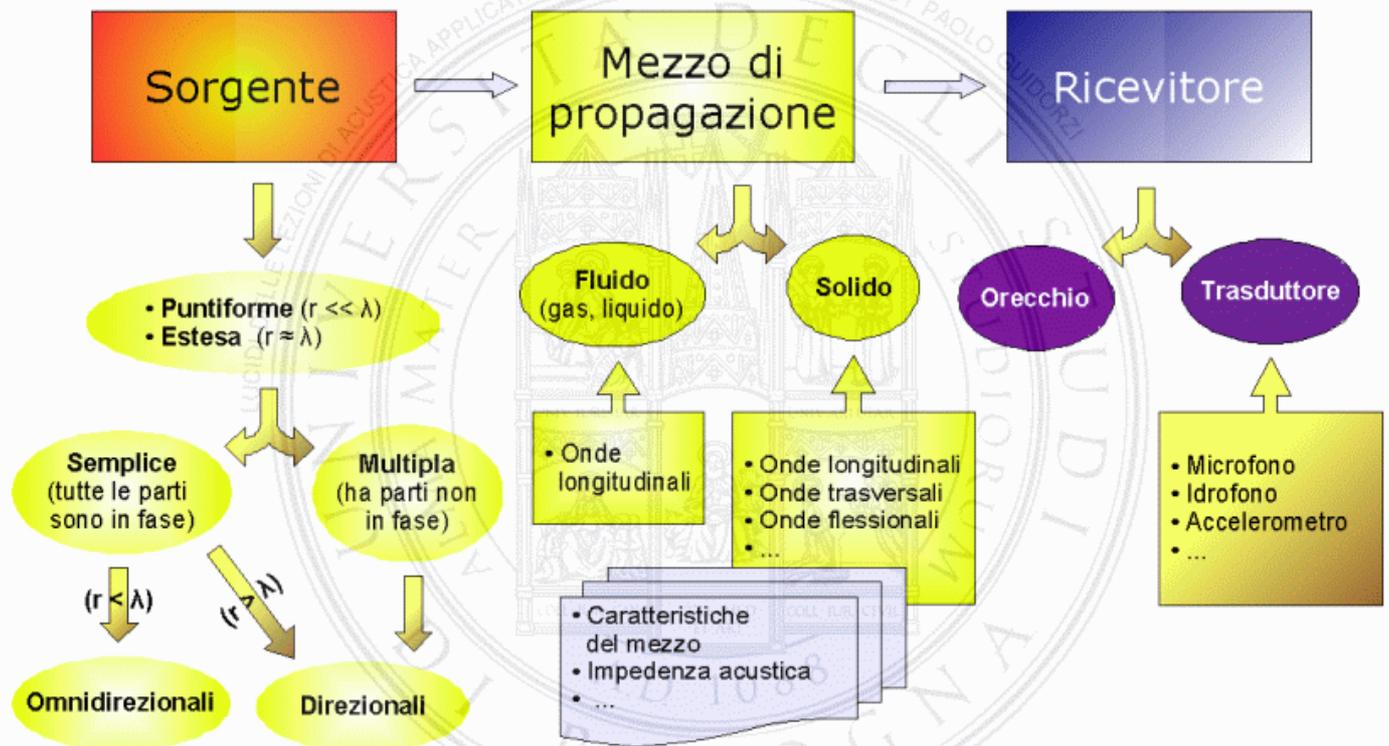
49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

***Indice***

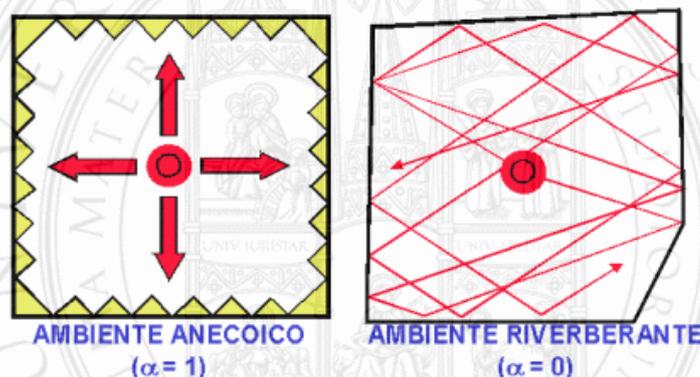
PROPAGAZIONE NEGLI SPAZI APERTI

Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - La propagazione in campo aperto - Sorgente puntiforme
- 3 - La propagazione in campo aperto - Sorgente lineare
- 4 - La propagazione in campo aperto - Sorgente piana
- 5 - La direttività della sorgente
- 6 - Attenuazioni aggiuntive
- 7 - Assorbimento dovuto all'aria
- 8 - Effetto del suolo
- 9 - La diffrazione
- 10 - Relazione di Maekawa
- 11 - Gradiente di temperatura e vento
- 12 - Altri effetti



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



**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.

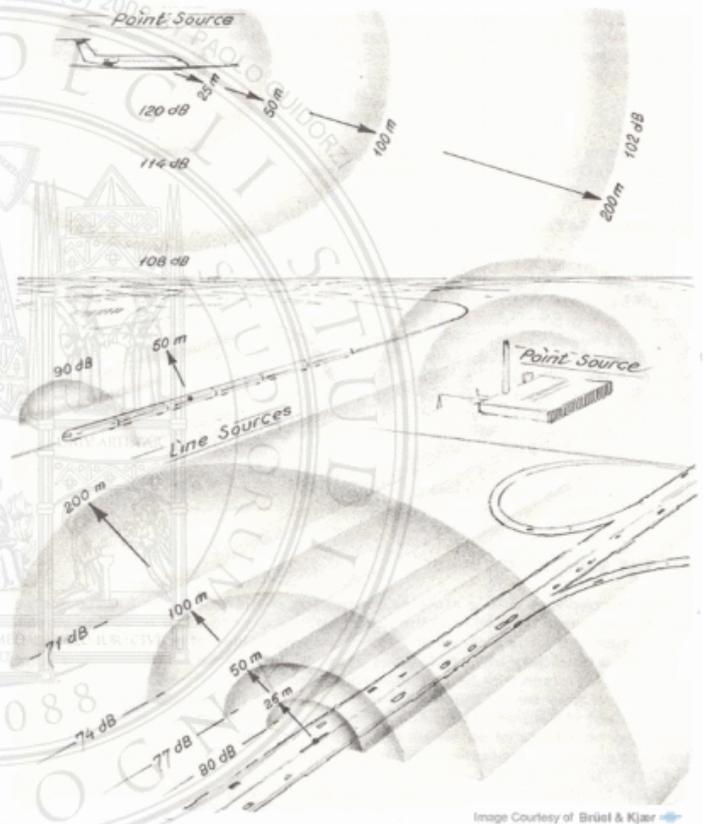
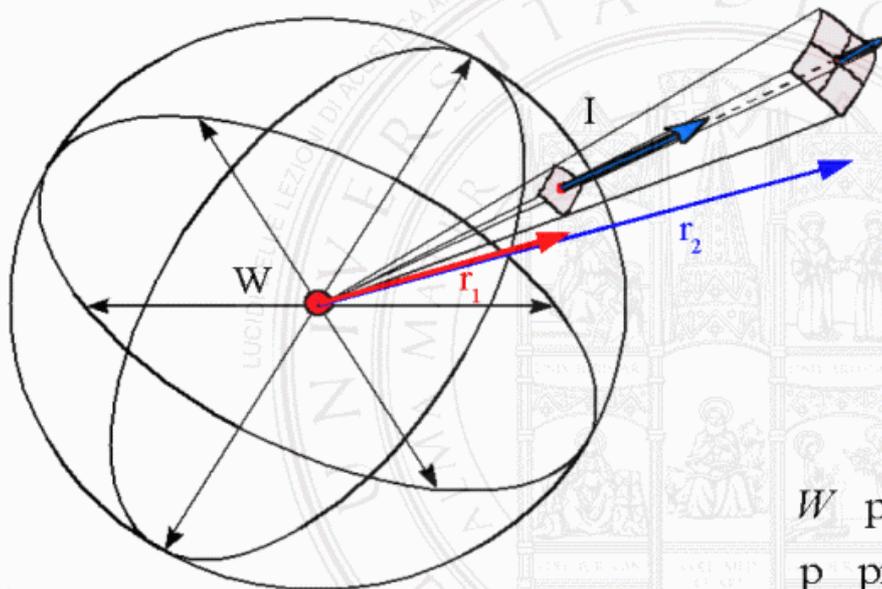


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**LA PROPAGAZIONE IN CAMPO APERTO - SORGENTE PUNTIFORME**

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

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

$W$  potenza acustica [W]

$p$  pressione acustica [Pa]

$I$  Intensità acustica [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

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

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

$$\begin{cases} I = \frac{W}{S} \\ S = 4\pi r^2 \\ I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \end{cases} \Rightarrow$$

$$W = \frac{p^2}{\rho_0 c} 4\pi r^2$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{1}{W_0} \frac{p^2}{\rho_0 c} \frac{p_0^2}{p_0^2} 4\pi r^2 \Rightarrow \frac{W}{W_0} = \frac{p^2}{p_0^2} r^2 \frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0}$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{1}{W_0} \frac{p^2}{\rho_0 c} \frac{p_0^2}{p_0^2} 4\pi r^2 \Rightarrow \frac{W}{W_0} = \frac{p^2}{p_0^2} r^2 \frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0}$$

$$10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) + 10 \log(r^2) + 10 \log \left( \frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0} \right)$$

$$10 \log \left( \frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0} \right) \Rightarrow 10 \log \left( \frac{4\pi \cdot 400 \cdot 10^{-12}}{\rho_0 c \cdot 10^{-12}} \right) \Rightarrow 10 \log(4\pi) + 10 \log \left( \frac{400}{\rho_0 c} \right)$$

$$\approx 11 \quad \rightarrow 0$$

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

$$W_0 = 10^{-12} \quad [\text{W}]$$

$$p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \quad [\text{Pa}]$$

$$I_0 = 10^{-12} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\rho_0 c = 400 \quad [\text{rayl oppure Pa s/m}]$$

(a 39 °C, 1 Atm)

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

Per onde piane:  $\vec{z} = \rho_0 c$

Impedenza caratt. Dell'aria (alla pressione di 1 Atm)			
Mezzo	c (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	z (rayl)
Aria 0°C	331	1,29	428
Aria 20°C	343	1,20	415
Aria 39°C	354	1,12	400

$$10 \log \left( \frac{400}{\rho_0 c} \right)$$

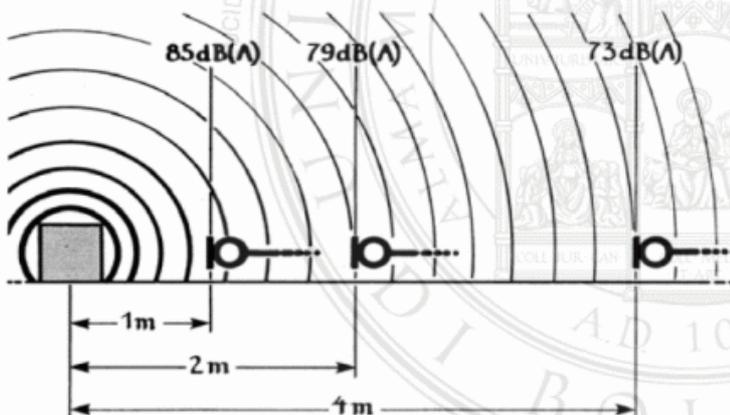


$$\left. \begin{array}{l} 0^\circ \text{C} \Rightarrow \left| 10 \log \left( \frac{400}{428} \right) \right| \approx 0,29 \text{ dB} \\ 20^\circ \text{C} \Rightarrow \left| 10 \log \left( \frac{400}{415} \right) \right| \approx 0,16 \text{ dB} \\ 39^\circ \text{C} \Rightarrow \left| 10 \log \left( \frac{400}{400} \right) \right| = 0 \text{ dB} \end{array} \right\}$$

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

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

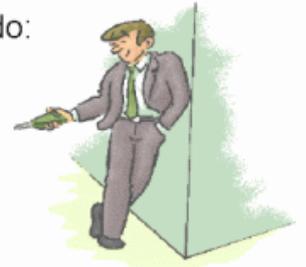
L'attenuazione per divergenza di onde sferiche  $\Delta L$  si calcola nel seguente modo:


 $r_1 \quad L_{p1}$ 
 $r_2 \quad L_{p2}$ 

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

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

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

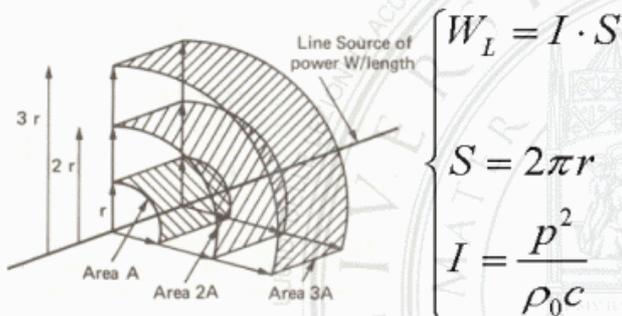


Nel caso di raddoppio della distanza si ottiene un'attenuazione di 6 dB.

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  $\frac{1}{4}$ , 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



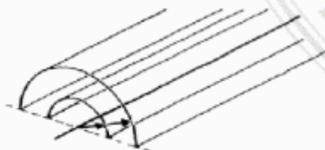
$$\left\{ \begin{array}{l} W_L = I \cdot S \\ S = 2\pi r \\ I = \frac{P^2}{\rho_0 c} \end{array} \right.$$

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

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

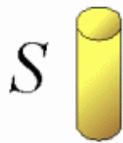
In assenza di ostacoli, il Livello di pressione cala di 3 dB al raddoppio della distanza

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**  $\Delta L$  si calcola nel seguente modo:



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

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

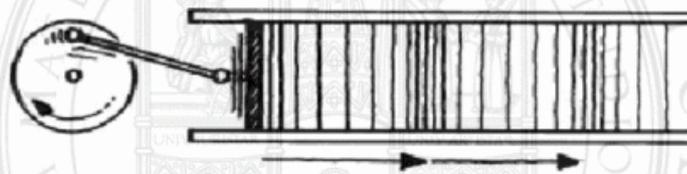
$$\Delta L = L_{p1} - L_{p2} = -10 \log r_1 + 10 \log r_2 = 10 \log \frac{r_2}{r_1}$$

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

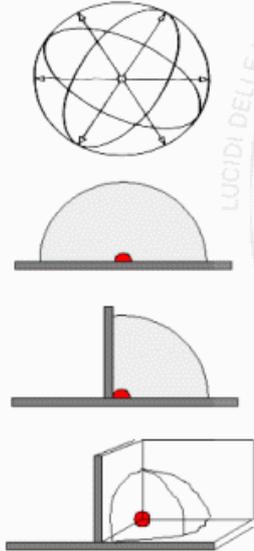


Un esempio di sorgente di onda piana può essere una lastra vibrante o la facciata di un edificio. La condizione di onda piana si perde vicino ai bordi o all'aumentare della distanza sorgente-ricevitore.

**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



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

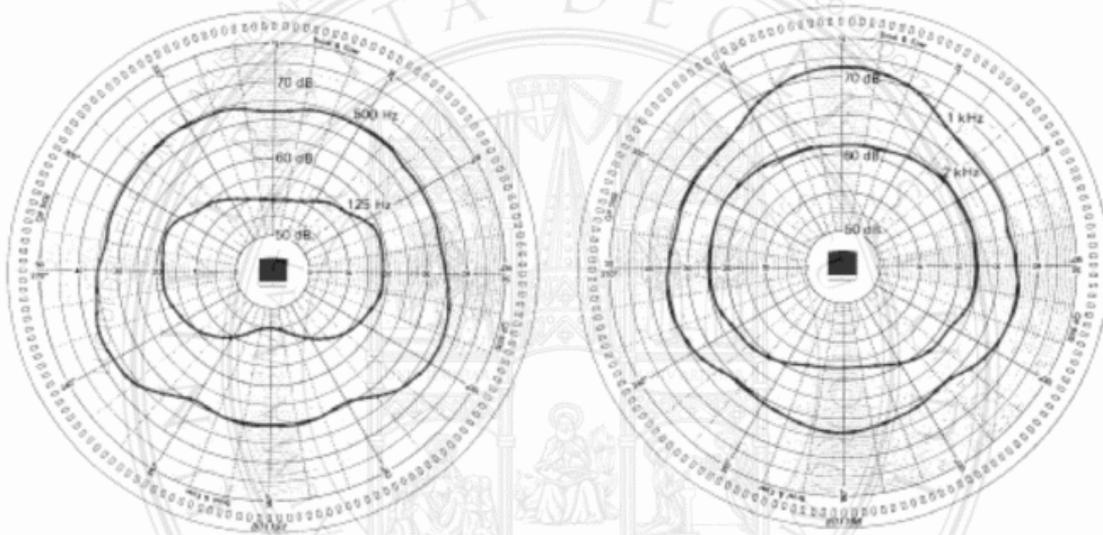
$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 \quad (\text{dB})$$



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

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

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.

## ATTENUAZIONI AGGIUNTIVE

Nella propagazione in atmosfera, oltre alla divergenza geometrica vanno tenuti in conto altri fattori di attenuazione. Considerando la formula per la sorgente puntiforme si aggiunge un ulteriore termine  $Att$ , che include vari contributi

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

- $DI$      $10 \log Q$     Indice di Direttività
- $Att_1$     $\alpha \cdot r$      $\alpha$  = coeff. assorbimento dell'aria dB/m;  $r$  = distanza
- $Att_2$     Effetto del suolo
- $Att_3$     Ostacoli, barriere acustiche
- $Att_4$     Condizioni meteorologiche
- $Att_5$     Effetto del fogliame e altre attenuazioni

## ASSORBIMENTO DOVUTO ALL'ARIA

L'attenuazione dell'intensità di un'onda piana in atmosfera (in dB/km) per effetto dei fenomeni di assorbimento, in funzione della temperatura e dell'umidità relativa.

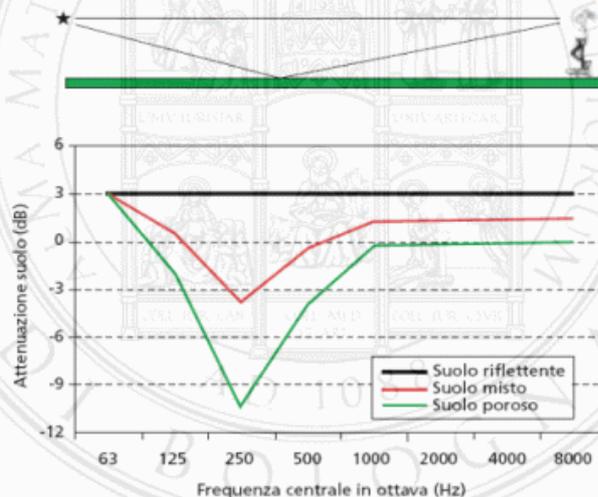
Temp. (°C)	Umidità $\varphi$ (%)	62,5 (Hz)	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1 (kHz)	2 (kHz)	4 (kHz)	8 (kHz)
0	10	0.424	1.300	4.00	9.25	14.0	16.6	19.0	26.4
	20	0.256	0.614	1.85	6.16	17.7	34.6	47.0	58.1
	30	0.219	0.469	1.17	3.73	12.7	36.0	69.0	95.2
	50	0.181	0.411	0.82	2.08	6.8	23.8	71.0	147.0
	70	0.151	0.390	0.76	1.61	4.6	16.1	55.5	153.0
	90	0.127	0.637	0.76	1.45	3.7	12.1	43.2	138.0
10	10	0.342	0.788	2.29	7.52	21.6	42.3	57.3	69.4
	20	0.271	0.579	1.20	3.27	11.0	36.2	91.5	154.0
	30	0.225	0.551	1.05	2.28	6.8	23.5	76.6	187.0
	50	0.160	0.486	1.05	1.90	4.3	13.2	46.7	155.0
	70	0.122	0.411	1.04	1.93	3.7	9.7	32.8	117.0
	90	0.097	0.348	1.00	2.00	3.5	8.1	25.7	92.4
20	10	0.370	0.775	1.58	4.25	14.1	45.3	109.0	175.0
	20	0.260	0.712	1.39	2.60	6.5	21.5	74.1	215.0
	30	0.192	0.615	1.42	2.52	5.0	14.1	49.5	166.0
	50	1.123	0.445	1.32	2.73	4.7	9.9	29.4	104.0
	70	0.090	0.339	1.13	2.80	5.0	9.0	22.9	76.6
	90	0.071	0.272	1.00	2.71	5.3	9.1	20.2	62.6
30	10	0.362	0.958	1.82	3.40	8.7	28.5	96.0	260.0
	20	0.212	0.725	1.87	3.41	6.0	14.5	47.1	165.0
	30	0.147	0.543	1.68	3.67	6.2	11.8	32.7	113.0
	50	0.091	0.351	1.25	3.57	7.0	1.7	24.5	73.1
	70	0.065	0.256	0.96	3.14	7.4	12.7	23.1	59.3
	90	0.051	0.202	0.78	2.71	7.3	13.8	23.5	53.3

L'aria non è un mezzo perfettamente conservativo, e una parte dell'energia meccanica dovuta alla propagazione dell'onda acustica viene trasformata in calore, ovvero dissipata. Questo crea un'attenuazione dell'intensità dell'onda sonora che si propaga. L'assorbimento dipende dalla **temperatura** e dall'**umidità relativa** dell'aria.

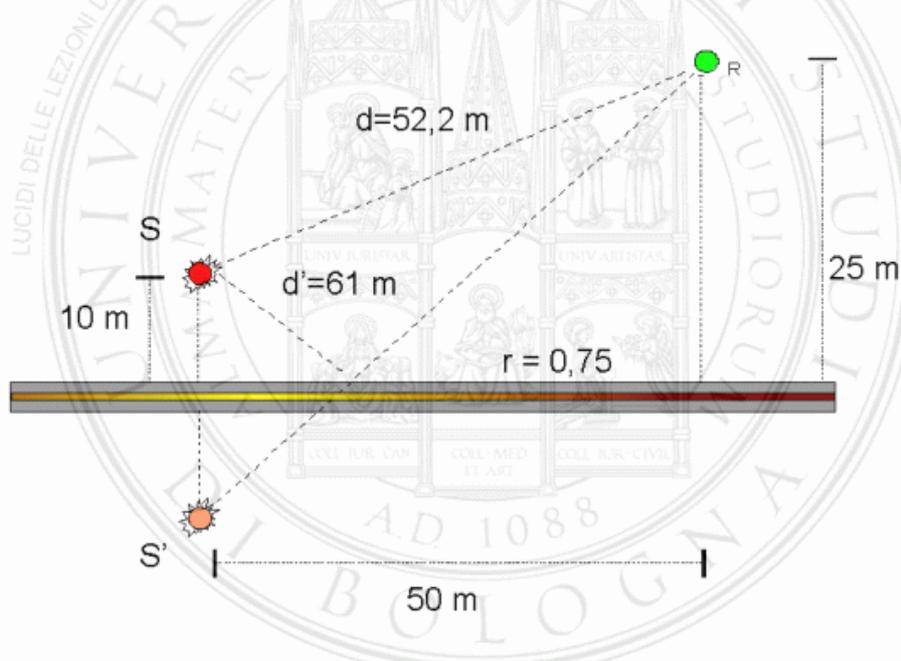
Da "Elementi di Fisica Tecnica Ambientale" Alessandro Cocchi

## EFFETTUO DEL SUOLO

Il suono riflesso dal terreno interagisce col suono che arriva al ricevitore direttamente dalla sorgente. L'effetto è diverso a seconda delle proprietà acustiche del terreno (assorbente, riflettente, misto...). Anche le precipitazioni (pioggia, neve, ecc.) possono condizionare l'attenuazione del terreno, quindi in generale è buona norma effettuare le misurazioni a terreno asciutto. Per calcolare il livello sonoro al ricevitore occorrerà quindi conoscere le proprietà del terreno e valutare anche se le onde dirette e riflesse sono tra loro coerenti o no.



Per calcolare il contributo dovuto alla riflessione sul terreno si può utilizzare il metodo delle "sorgenti virtuali". Si immagina cioè la presenza di una sorgente in posizione speculare rispetto a quella realmente presente, e con un livello di potenza diminuito (utilizzando il coefficiente di riflessione o di assorbimento del terreno). Si andrà quindi a sommare alla posizione del ricevitore i contributi dati dalla sorgente reale e da quella virtuale.



## IPOTESI 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.

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):

$f = 10$ 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

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

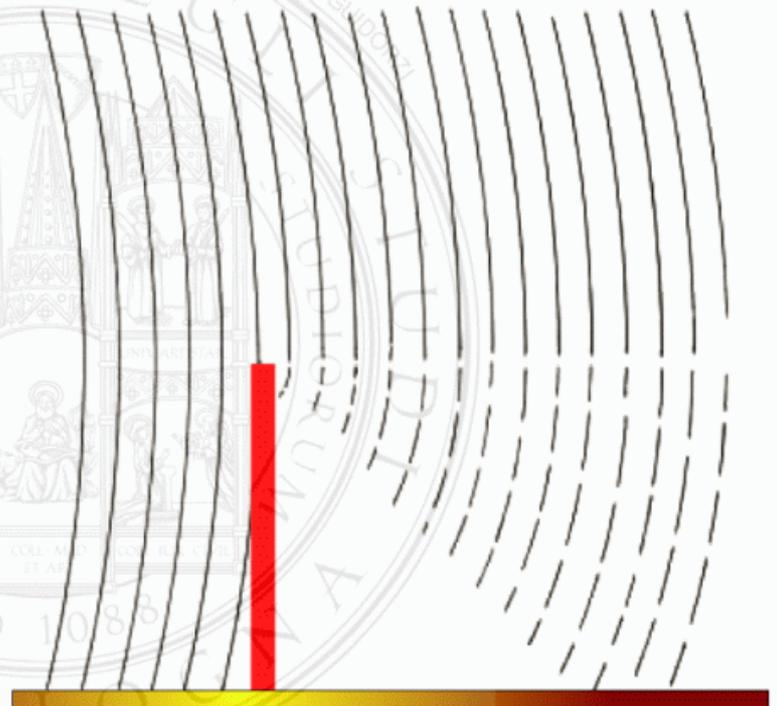
## LA DIFFRAZIONE

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.



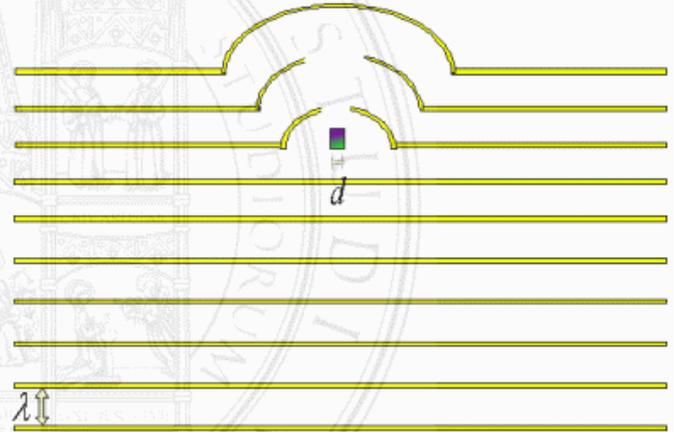
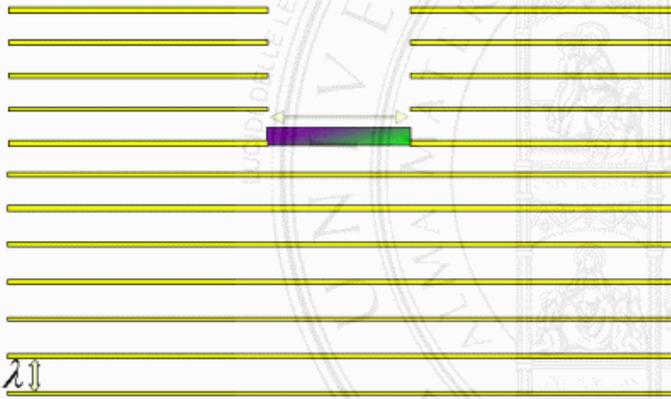
$d \gg \lambda \Rightarrow$  l'onda oltrepassa l'apertura  
e si propaga in una zona limitata

$d < \lambda \Rightarrow$  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.

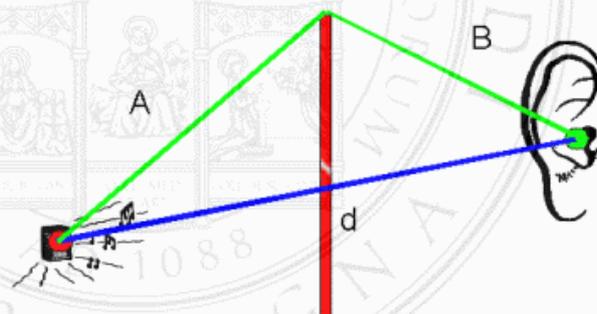
## RELAZIONE DI MAEKAWA

Lo studioso Maekawa ha trovato una relazione che ci permette di calcolare l'attenuazione dovuta a una barriera. Per attenuazione si intende la differenza tra il livello che si avrebbe senza barriera acustica e il livello in presenza della stessa. Questa grandezza si chiama più propriamente *Insertion Loss*.

L'attenuazione dovuta alla barriera dipende dalla lunghezza d'onda del suono  $\lambda$  e dalla differenza  $\delta$  tra il cammino diretto (che si avrebbe in assenza della barriera) e il cammino reale, percorso dall'onda che "scavalca" la barriera e viene diffratta dal suo bordo superiore. Si calcola il **numero di Fresnel**  $N$ .

$$\delta = A + B - d$$

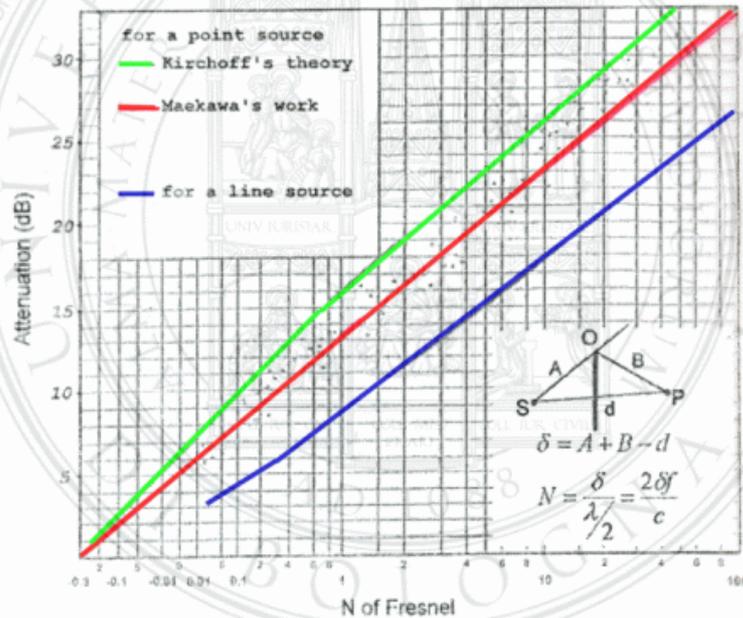
$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta f}{c}$$



Calcolato il numero di Fresnel N, l'attenuazione vale:

$$\Delta L = 10 \log[3 + 20N] \quad \text{sorgente puntiforme}$$

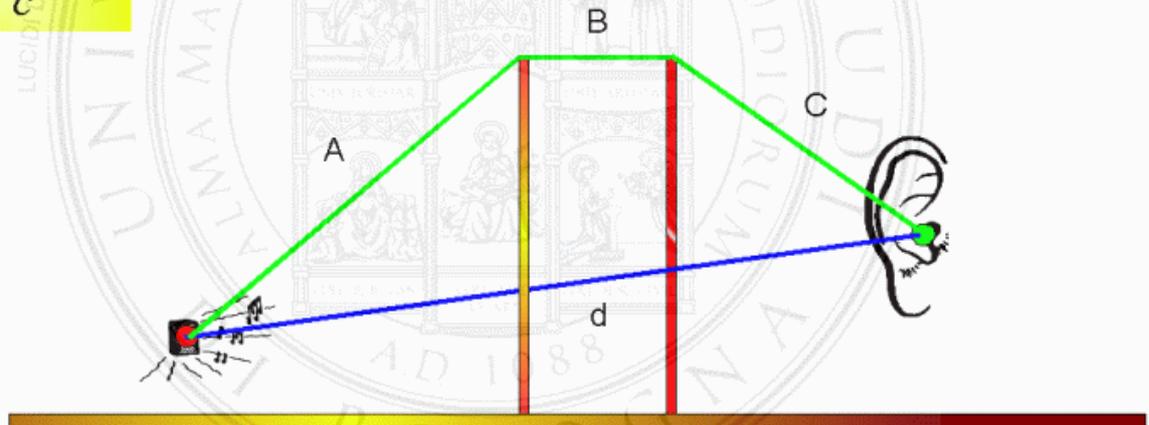
$$\Delta L = 10 \log[2 + 5,5N] \quad \text{sorgente lineare}$$



Nel caso di schermi non sottili, la differenza di percorso si calcola come mostrato in figura.

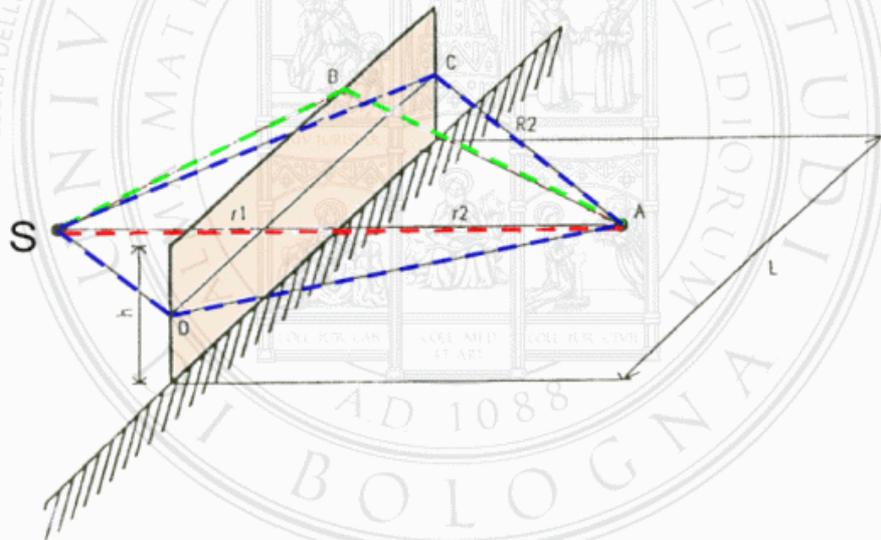
$$\delta = A + B + C - d$$

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta f}{c}$$



Se occorre valutare anche il suono che *scavalca* la barriera lateralmente, ovvero si considera la diffrazione attraverso i bordi laterali, si utilizza la seguente relazione, dove  $N_1$  e  $N_2$  sono i numeri di Fresnel relativi ai percorsi laterali:

$$\Delta L = \Delta L_{\text{bordo superiore}} - 10 \log \left( 1 + \frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2} \right) \quad N, N_1, N_2 > 1$$



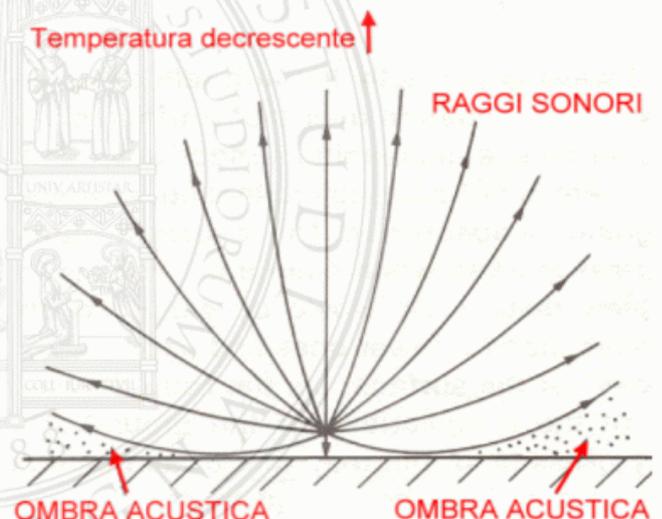
## GRADIENTE DI TEMPERATURA E VENTO

E' noto che la velocità del suono è legata alla temperatura dell'aria dalla formula (approssimata):  
 $c = 331 + 0,6T$  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.

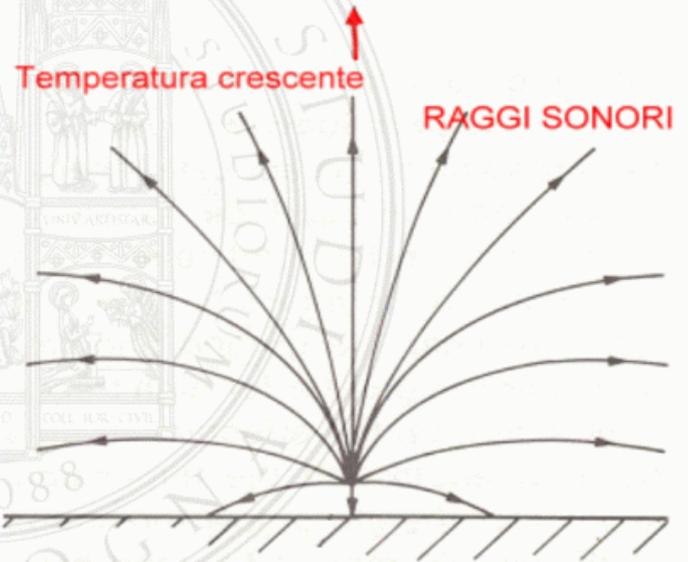
A causa della curvatura verso l'alto dei raggi sonori si formano delle vere e proprie zone d'ombra in cui il suono risulterà particolarmente attenuato o assente.



## CASO DI INVERSIONE TERMICA – NOTTE O NUVOLOSO

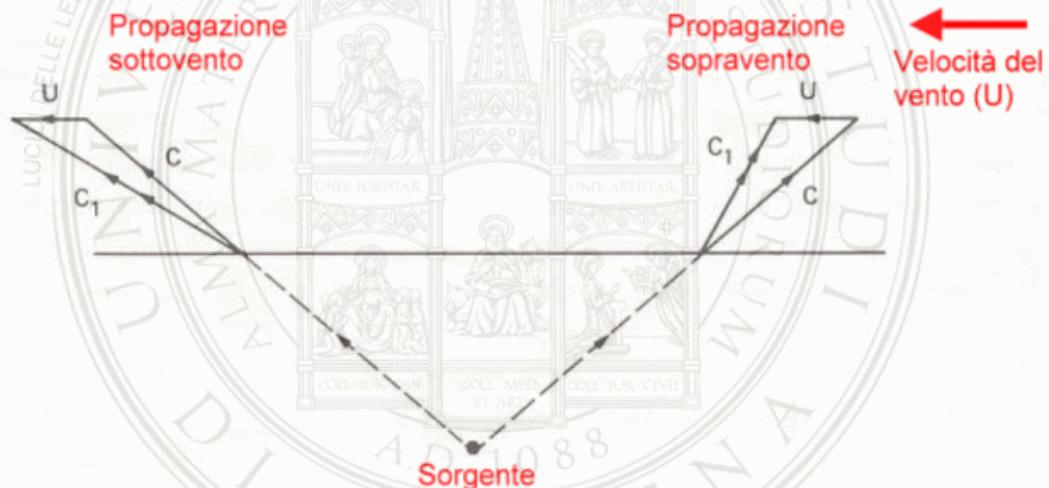
La temperatura cresce allontanandosi dal suolo. Ciò avviene solitamente di notte o in presenza di nuvole o in generale quando la temperatura al suolo è minore di quella dell'aria. In questo caso si ha la curvatura dei raggi sonori opposta rispetto al caso precedente: il suono può propagarsi più lontano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



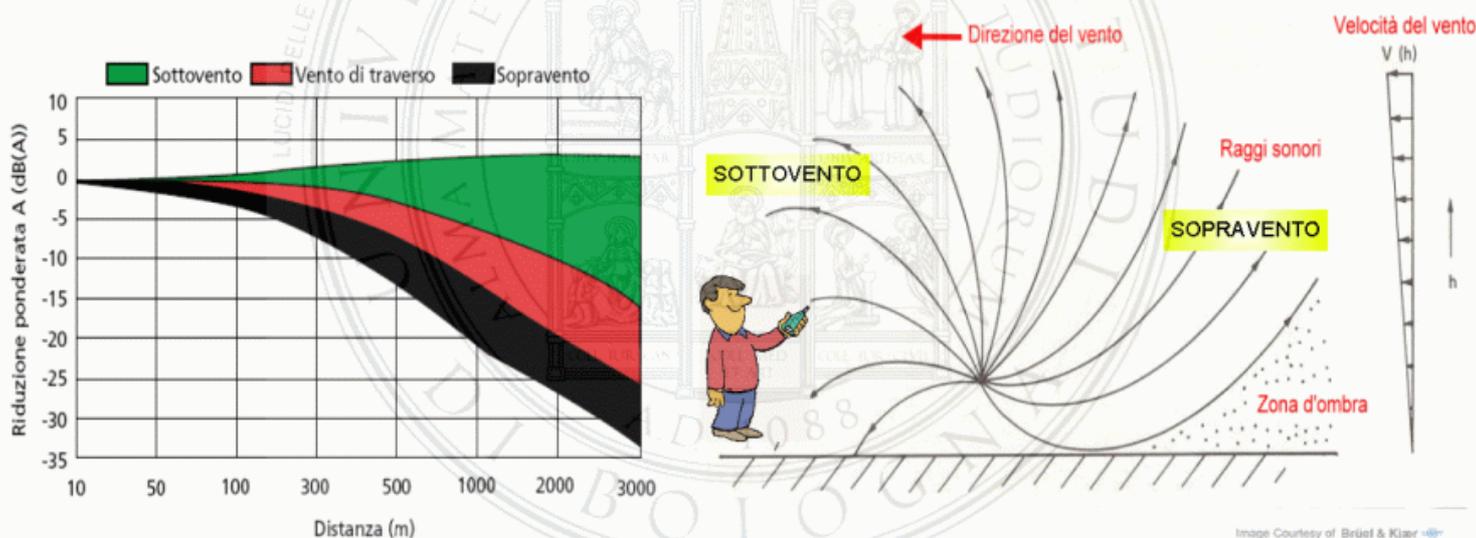
## EFFETTO DEL VENTO

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

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

## *Indice*

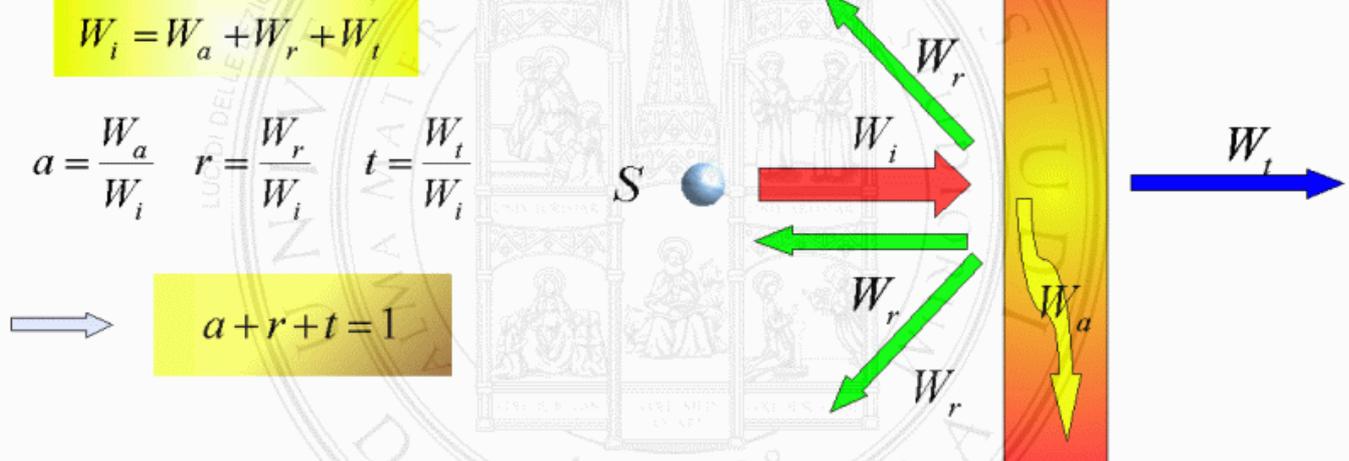
ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO

Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - Il coefficiente di assorbimento acustico apparente
- 3 - Materiali fonoassorbenti
- 4 - Materiali fonoassorbenti porosi
- 5 - Il risonatore di Helmholtz
- 6 - I pannelli forati
- 7 - I pannelli vibranti
- 8 - Misura del coeff. di assorbimento con vari metodi
- 9 - Misura nel tubo a onde stazionarie
- 10 - Misura in camera riverberante
- 11 - Misura con metodo a riflessione
- 12 - Il potere fonoisolante
- 13 - La legge di massa
- 14 - Deviazioni dalla legge di massa
- 15 - La frequenza di risonanza
- 16 - La frequenza critica
- 17 - Risonanza di una cavità
- 18 - Pareti doppie
- 19 - Misura in laboratorio del potere fonoisolante
- 20 - Misura in opera del potere fonoisolante
- 21 - Pareti composte - Elementi in parallelo
- 22 - Livello di rumore da calpestio

## 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.



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

## COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO APPARENTE

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

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

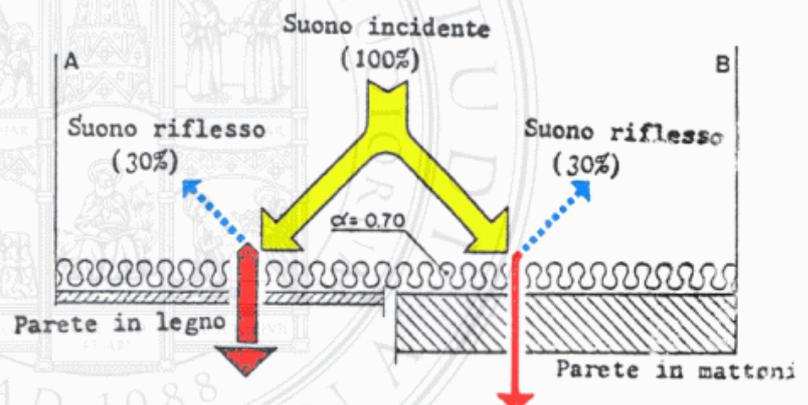
“Alfa” fisicamente include sia il contributo di energia assorbita dal materiale che il contributo di energia trasmessa, ovvero comprende tutto ciò che non è riflesso (1-r), da cui “apparente”.

Alcuni esempi:

$r = 0$ ;  $\alpha = 1$ ;  
 materiale perfettamente assorbente  
 Es: finestra aperta (assorbitore ideale).

Materiali con alto  $\alpha$ : materiali porosi,  
 lana di roccia, lana di vetro, poliuretano  
 espanso

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

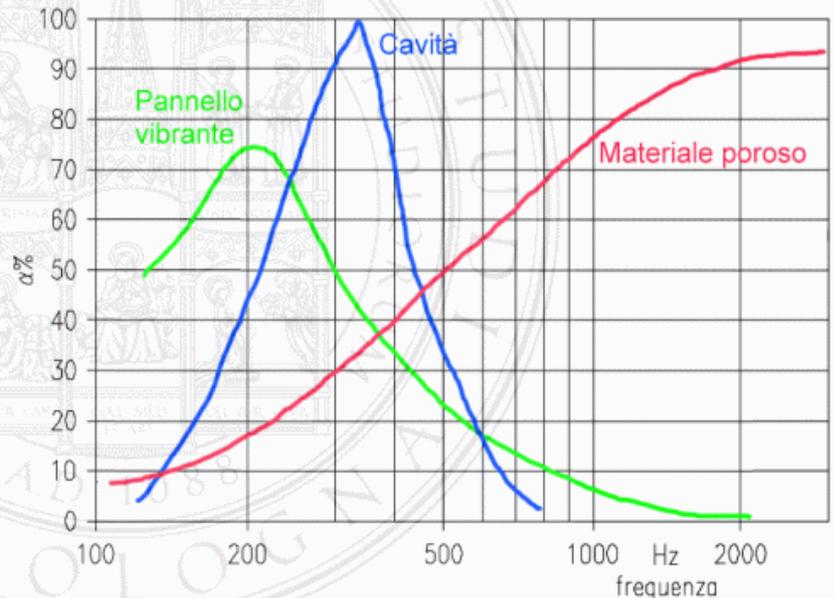
## MATERIALI FONOASSORBENTI

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
- risonatori 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.



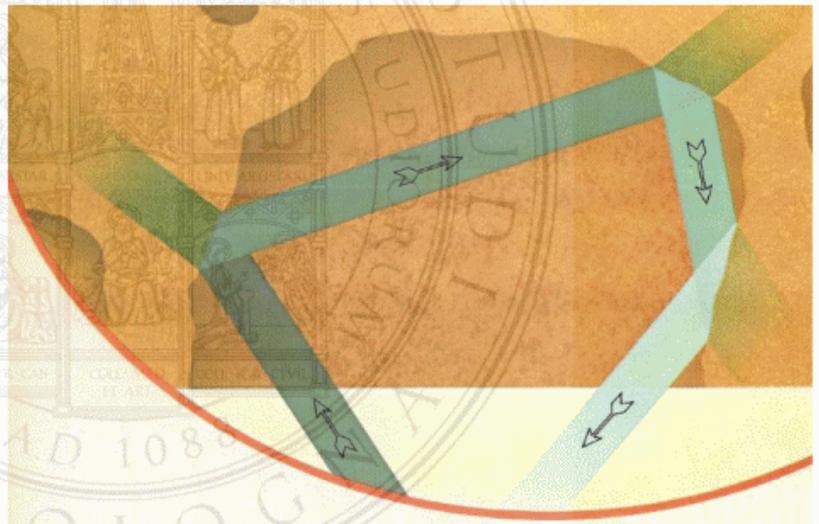
## MATERIALI FONOASSORBENTI POROSI

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



I parametri che influiscono sull'assorbimento acustico di un materiale fibroso sono i seguenti:

- Diametro delle fibre  $Es: d = 2 - 5 \mu m$  (lana minerale)
- Orientamento delle fibre
- Densità del materiale  $Es: \rho = 30 \sim 100 \text{ kg} / \text{m}^3$  (lana minerale)
- Spessore del pannello
- Porosità  $h = \frac{V_{pori}}{V_{tot}}$   $h = 90 \sim 95\%$  (lana minerale)

La porosità è uno scalare ed è definita come il rapporto tra il volume dei vuoti (pori) e il volume totale del materiale in esame.

In particolare, ha un ruolo essenziale la resistenza al flusso (ISO 9053 (1991) – UNI EN 29053):

- Resistenza al flusso

$$R = \frac{\Delta p}{Q_v} \quad [R] = \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^4 \cdot \text{s}}$$

La resistenza al flusso è definita come rapporto tra la differenza di pressione che si genera ai capi di un provino di materiale attraversato da un flusso d'aria e la portata del flusso stesso. Essa esprime la resistenza che un flusso d'aria incontra nel passaggio **attraverso** il materiale. Esiste un legame molto stretto tra questo parametro e l'assorbimento acustico. In generale la resistenza al flusso aumenta direttamente con densità e spessore del materiale e inversamente con il diametro delle fibre.

$$[Pa] = \frac{N}{m^2} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{m}{s^2}}{m^2} = \frac{\text{kg}}{m \cdot s^2} \quad [R] = \frac{\frac{\text{kg}}{m \cdot s^2} \cdot s}{m^3} = \frac{\text{kg}}{m^4 \cdot s}$$

Si definiscono anche:

### - Resistenza al flusso specifica

$$R_s = R \cdot A = \frac{\Delta p}{u}$$

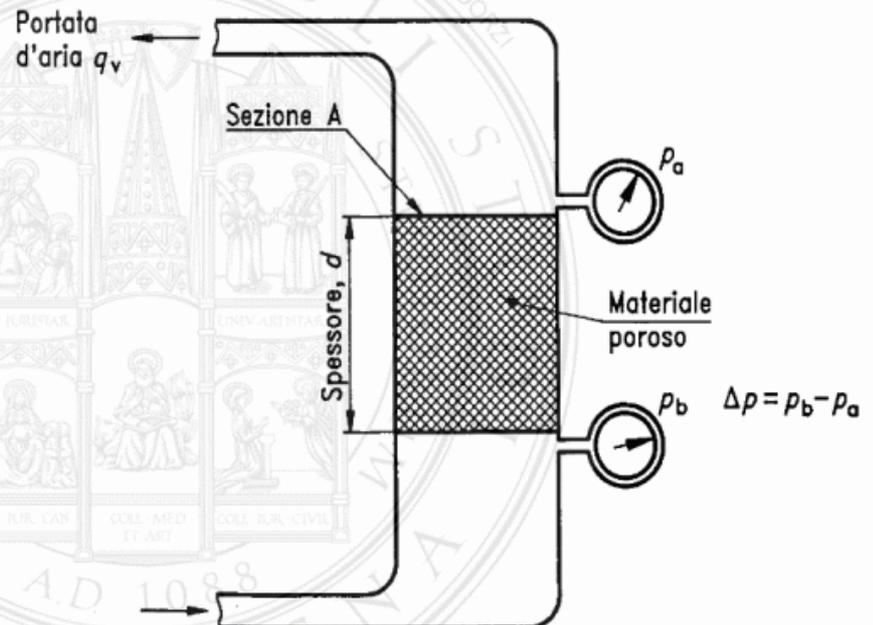
$$[R_s] = \frac{Pa \cdot s}{m} = \frac{kg}{m^2 \cdot s} = rayl$$

### - Resistività al flusso

$$r = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{u \cdot d} = \sigma$$

$$[r] = \frac{Pa \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m^3 \cdot s} = \frac{rayl}{m}$$

$$u = \frac{Q_v}{A} \quad [u] = \frac{m}{s} \quad (\text{velocità lineare del flusso})$$



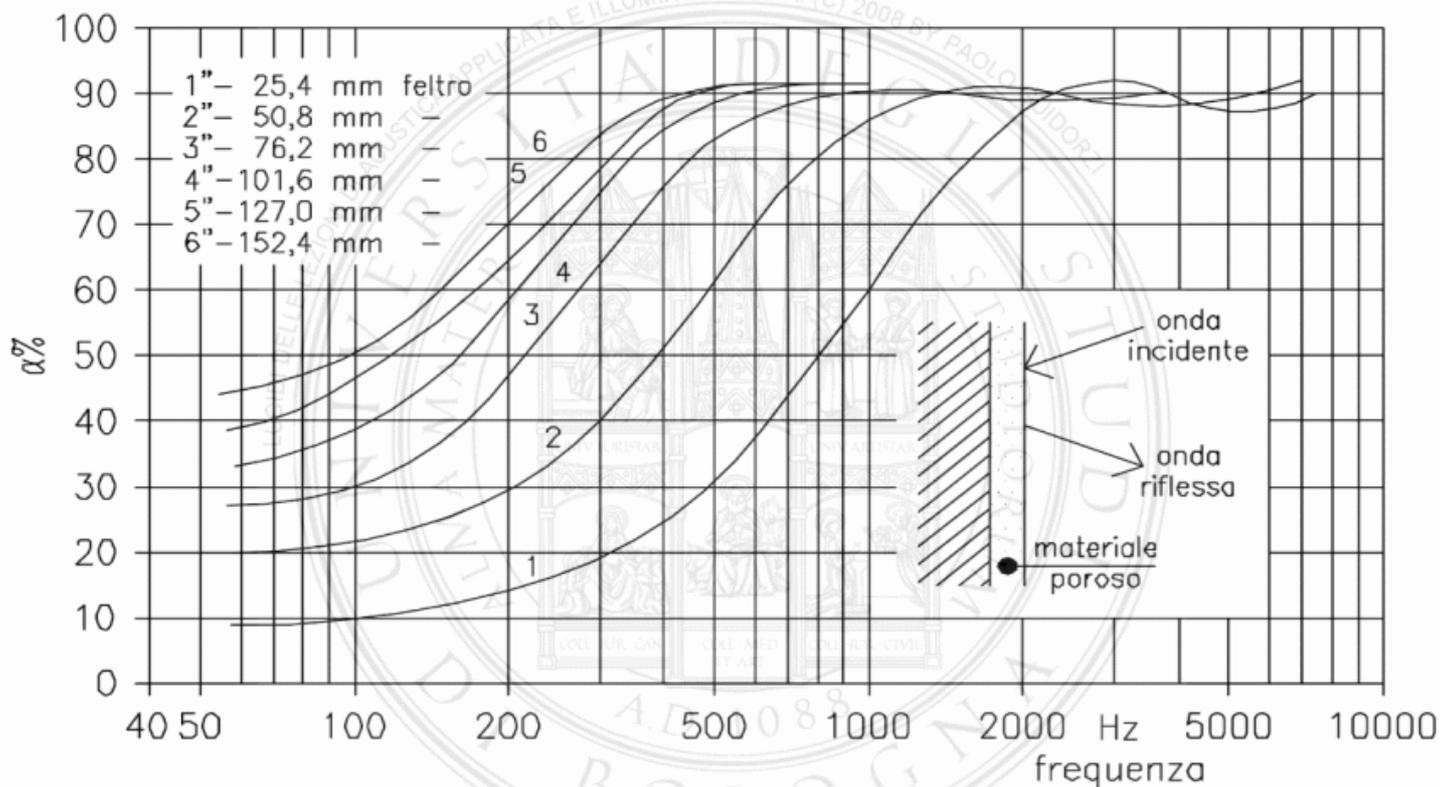
A partire dalla resistività al flusso e da altri parametri fisici caratteristici del materiale sono stati elaborati modelli matematici per la previsione del coefficiente di assorbimento (per incidenza normale) di un materiale fibroso (il più famoso è quello elaborato da Delany & Bazley).

- Il coefficiente di assorbimento di un materiale poroso varia con la **frequenza** e con l'**angolo di incidenza** del suono.

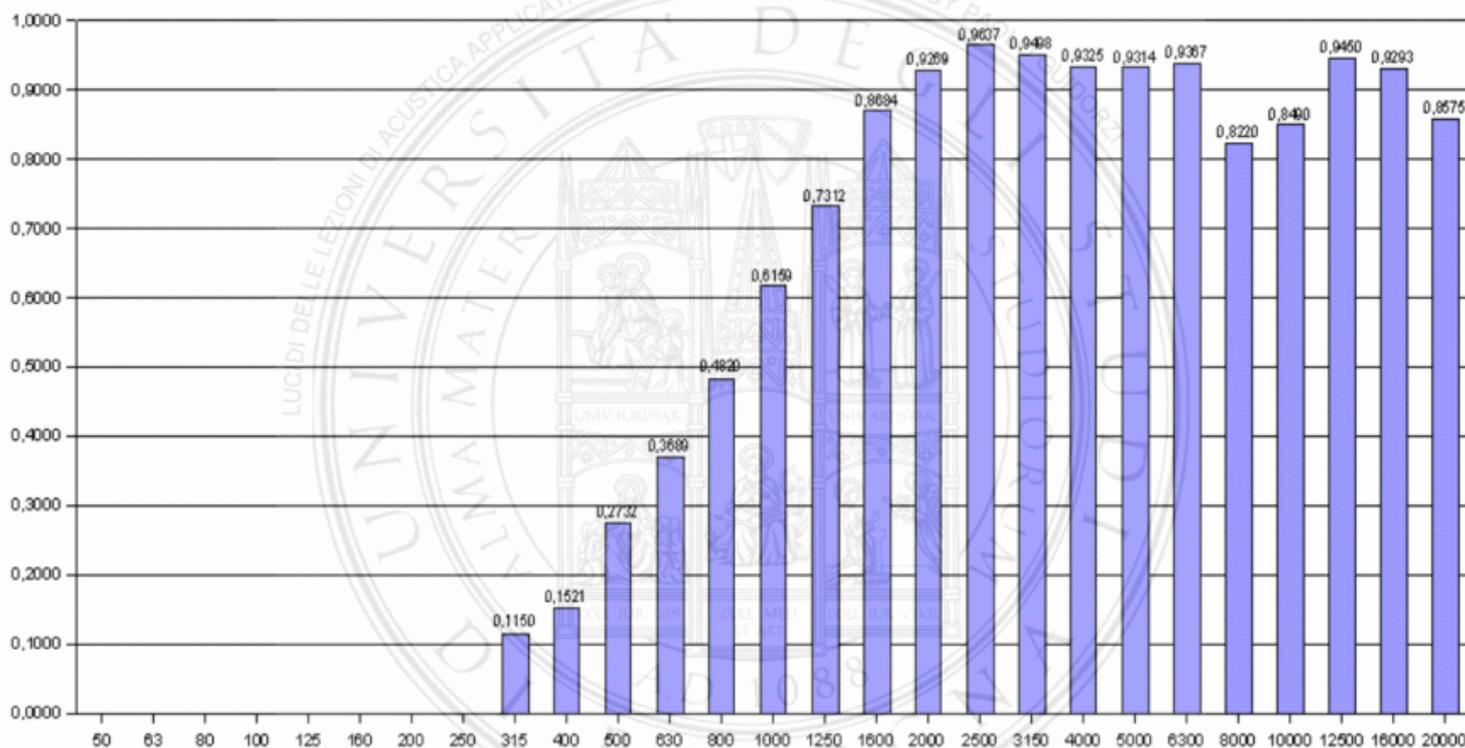
- Esistono numerosi metodi di misura del coefficiente di assorbimento, basati su diversi principi fisici e diverse metodologie.

- Tutti i metodi prevedono la sollecitazione del materiale in prova con un'onda sonora e la misura della sua reazione (ovvero della quantità suono riflesso). A seconda che il campo applicato sia diffuso (suono proveniente indistintamente da ogni direzione sul materiale) o a incidenza normale (onda piana che incide normalmente alla superficie) si misura il **coefficiente di assorbimento per incidenza random (o statistico)** oppure il **coefficiente di assorbimento per incidenza normale**.

Esiste una formula approssimata che permette di calcolare il coefficiente di assorbimento per incidenza random a partire da quello a incidenza normale. Questa formula si applica solo per una certa categoria di materiali, detti "localmente reagenti", cioè per i quali l'effetto di una sollecitazione puntuale non influenza le parti di materiale non sollecitate. I materiali porosi sono con buona approssimazione localmente reagenti.



Andamento del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  in funzione della frequenza e dello spessore del materiale



Esempio di andamento del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  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 <sup>3</sup> spessore 13 mm	0.11	0.40	0.90	0.90	0.82
Poliuretano espanso, 30 kg/m <sup>3</sup> 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

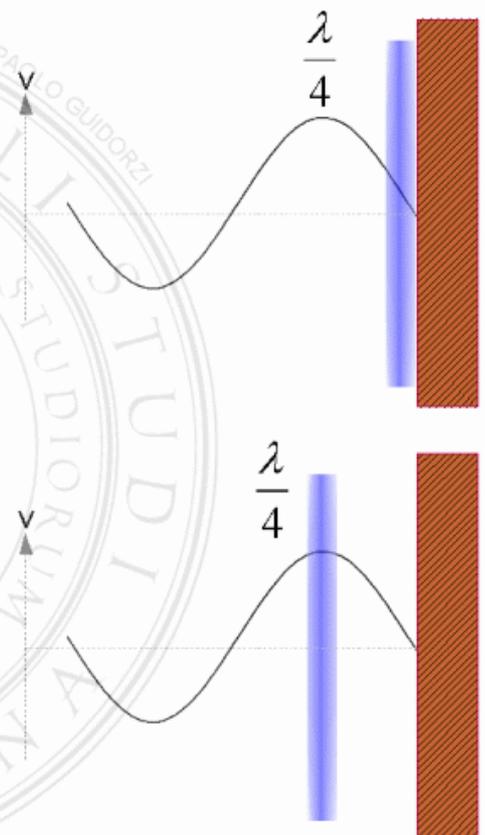
Valori del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  per alcuni materiali

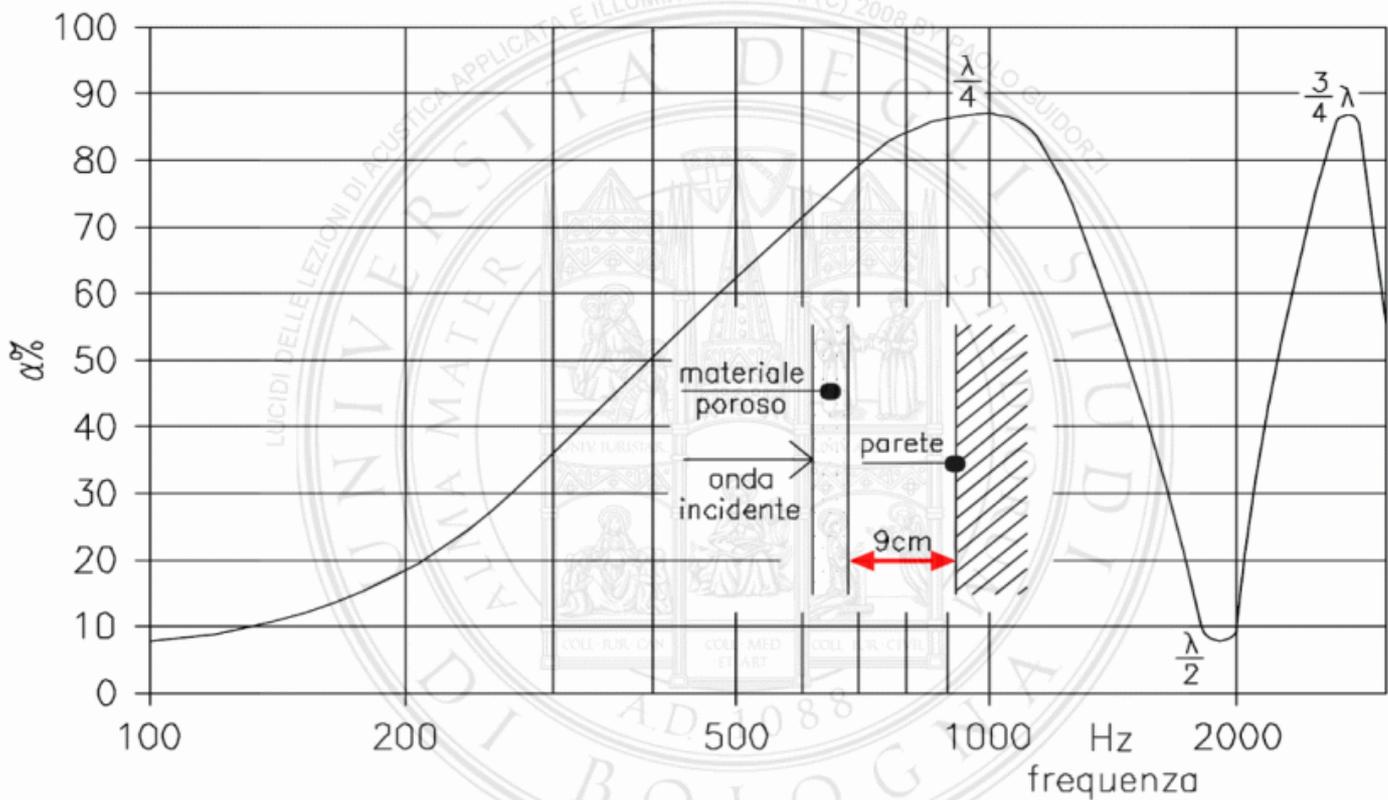
Quando un'onda sonora è riflessa da una parete rigida (idealmente con coefficiente di assorbimento nullo), a contatto con la parete la velocità delle particelle d'aria è nulla, mentre a distanza di  $\frac{1}{4}$  di lunghezza d'onda si ha un massimo di velocità.

Dato che il meccanismo dell'assorbimento nei materiali porosi consiste nella dissipazione dell'energia vibrazionale delle particelle d'aria per attrito con le superfici delle cavità, è chiaro che maggiore sarà la velocità di vibrazione maggiore sarà l'assorbimento e viceversa.

Un pannello di materiale assorbente può essere appoggiato alla parete o posto a una certa distanza da essa: a contatto con la parete (velocità nulla) l'assorbimento sarà minimo, mentre a distanza di  $\frac{1}{4}$  di lunghezza d'onda (o dei suoi multipli dispari) si ha la massima efficienza di assorbimento.

Questo ragionamento spiega perchè l'assorbimento dei materiali porosi aumenta con lo spessore del pannello e perchè è possibile avere alto assorbimento a una determinata frequenza ponendo un pannello sottile alla distanza di  $\frac{1}{4}$  di lunghezza d'onda da una parete rigida.





Effetto della distanza dalla parete del pannello di materiale poroso sul coefficiente di assorbimento  $\alpha$

## Area equivalente di assorbimento acustico

$$A_S = \alpha \cdot S$$

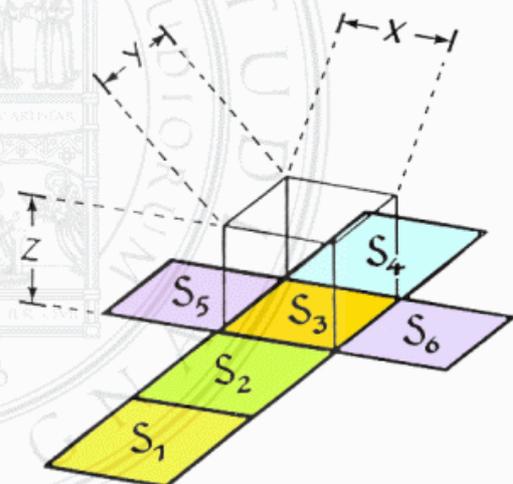
$\alpha$  : coefficiente di assorbimento acustico  
 $S$  : superficie frontale della parete

Nel caso la superficie sia costituita da zone di area  $S_i$  con **differente coefficiente di assorbimento** acustico  $\alpha$  l'area equivalente di assorbimento acustico si definisce:

$$A_S = \sum_i \alpha_i \cdot S_i$$

Unità di misura: **m<sup>2</sup> di finestra aperta**

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$



Si definisce:

**Coefficiente di assorbimento medio**

$$\bar{\alpha} = \frac{A_S}{S_T} = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot S_i}{S_T}$$

dove  $A_S$  è l'area equivalente di assorbimento acustico e  $S_T$  la superficie totale. E' utilizzato nel caso di un locale caratterizzato da diverse superfici.

Si definisce:

**Indice di fonoassorbimento del locale**

$$R_{IL} = \frac{\bar{\alpha} \cdot S_T}{1 - \bar{\alpha}}$$

L'utilizzo di questi indici sarà chiaro quando si tratterà l'acustica degli ambienti chiusi.

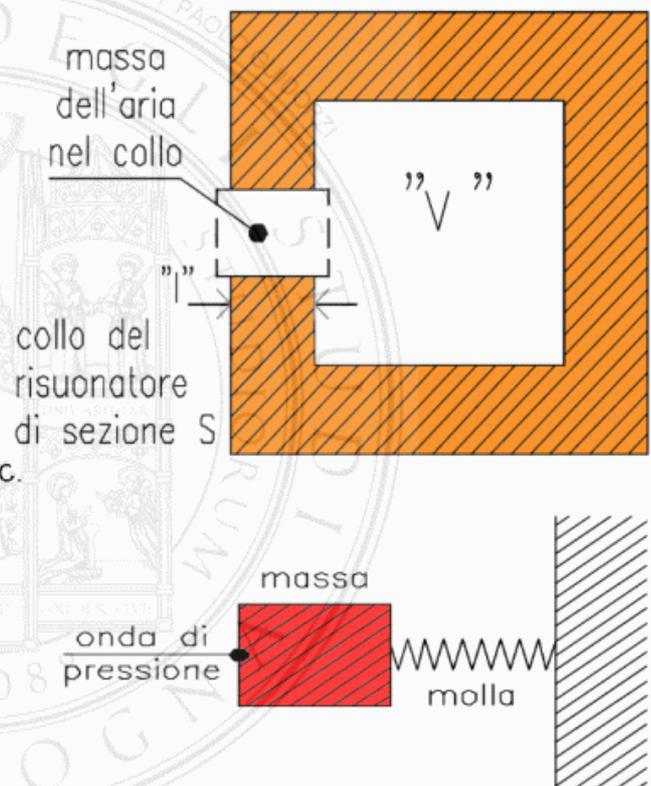
### RISUONATORE DI HELMHOLTZ

Il risonatore di Helmholtz è costituito da una cavità di volume  $V$  in comunicazione con l'esterno tramite un'apertura, detta collo, di lunghezza  $l$  e sezione  $S$ .

L'onda sonora incidente mette in vibrazione l'aria contenuta nel collo, che si comporta in modo simile a un sistema massa-molla (vedi figura), nel quale la massa corrisponde all'aria nel collo del risonatore e la molla è l'aria contenuta all'interno della cavità.

La dissipazione di energia che porta all'assorbimento del suono avviene per l'attrito viscoso dell'aria nel collo.

Si ha in particolare un picco di assorbimento in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema massa-molla.



La frequenza di risonanza del risonatore si può calcolare con la seguente formula:

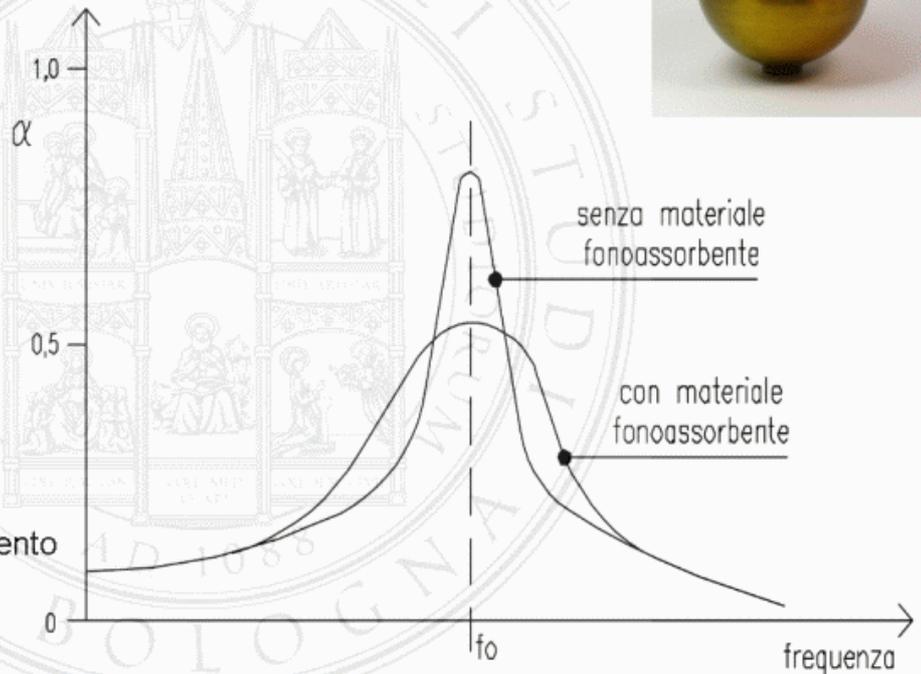
$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \cdot r^2}{V(l+1,6r)}}$$

$c$  velocità del suono [m/s]

$V$  volume della cavità [m<sup>3</sup>]

$r, l$  raggio e lungh. del collo [m]

Se la cavità è riempita con materiale fonoassorbente, la curva di assorbimento ha un picco meno marcato



### PANNELLI FORATI

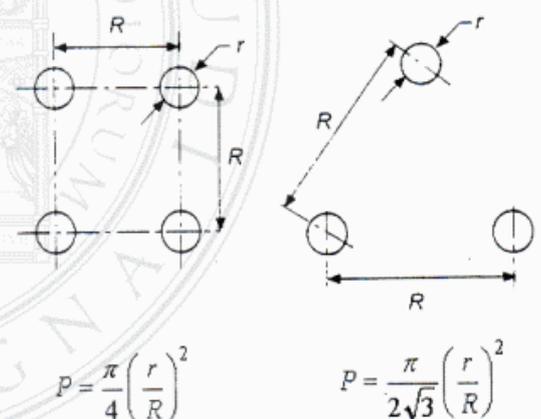
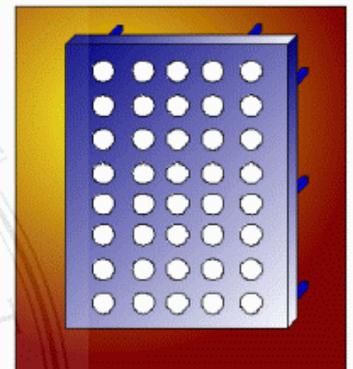
Un pannello forato può essere considerato come un insieme di risonatori di Helmholtz affiancati; il collo sono i rispettivi fori mentre la cavità è costituita dallo spazio tra il pannello e la parete. I pannelli forati però hanno uno spettro di assorbimento diverso da un singolo risonatore poiché si ha anche l'interazione tra i singoli risonatori e come conseguenza l'assorbimento avviene a frequenze diverse.

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{d \cdot t}}$$

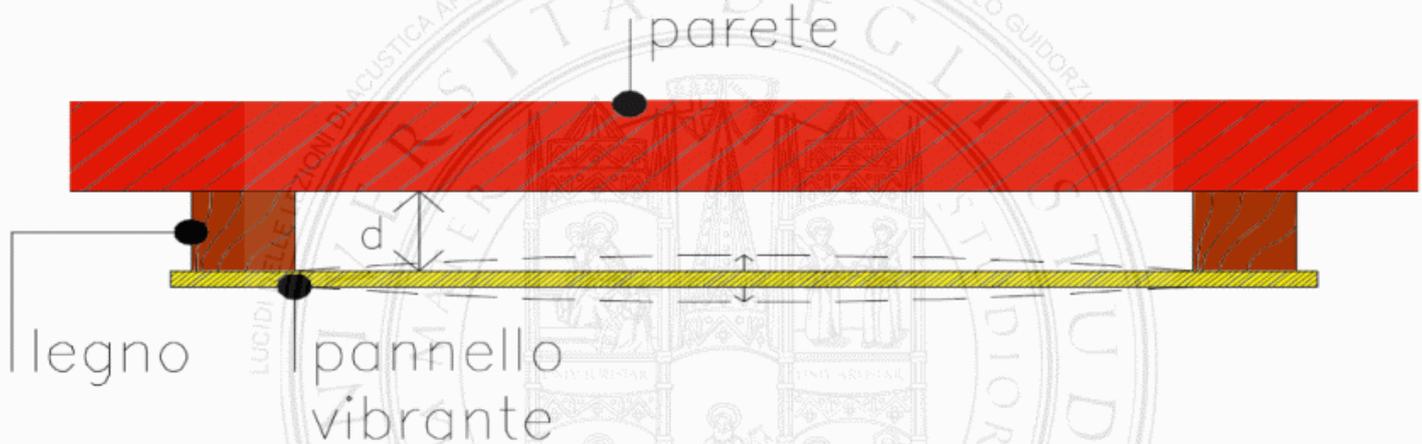
$P$  percentuale di foratura

$d$  distanza dalla parete [m]

$t$  spessore del pannello [m]



## PANNELLI VIBRANTI



I pannelli vibranti sono costituiti da pannelli di materiale elastico (legno, fibre di legno, membrane) e non poroso. Sono installate a una distanza  $d$  dalla parete e formano con questa un'intercapedine d'aria. L'assorbimento avviene grazie alla dissipazione dovuta alle vibrazioni flessionali del pannello.

Anche in questo caso il sistema può essere schematizzato come un sistema massa-molla. La massa è rappresentata dal pannello e la molla dall'aria contenuta nell'intercapedine.

La frequenza fondamentale di risonanza dipende dalla massa per unità di superficie del pannello, dalla sua rigidezza e dalla distanza dalla parete. Aumentando la massa del pannello e la dimensione dell'intercapedine si riduce la frequenza di risonanza.

$$f_{res} = \frac{60}{\sqrt{\sigma \cdot d}}$$

$\sigma$  massa superficiale del pannello [ $\text{kg/m}^2$ ]

$d$  distanza pannello-parete [m]

Esempio di calcolo:

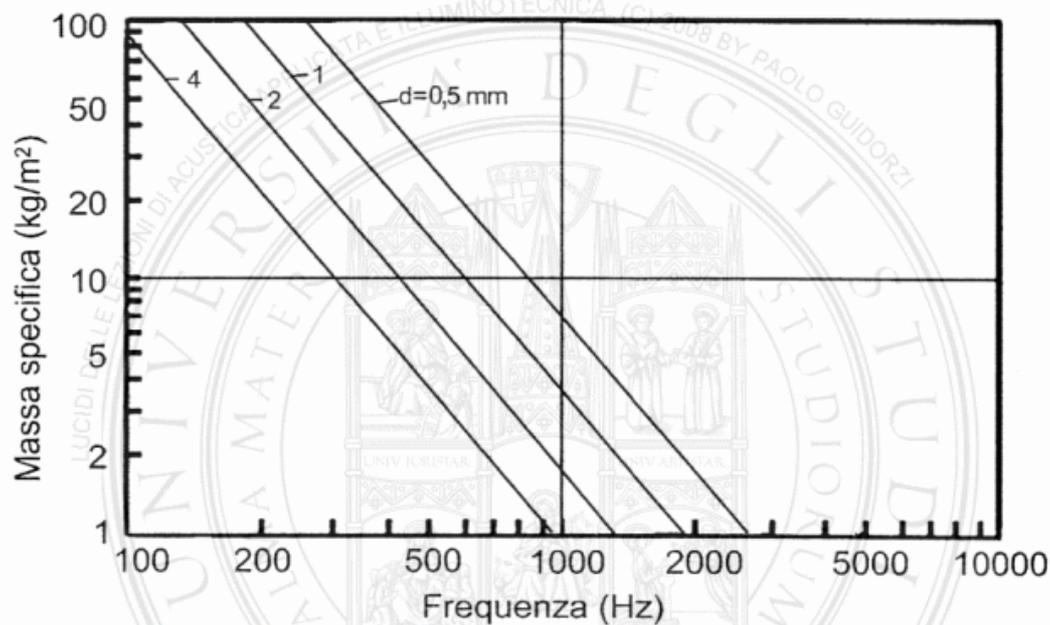
- Legno compensato di spessore 5 mm con densità  $600 \text{ kg/m}^3$
- Distanza parete-pannello 10 cm

$$\sigma = 600 \cdot 0,005 = 3 \text{ kg/m}^2$$

$$f_{res} = \frac{60}{\sqrt{3 \cdot 0,1}} \approx 109 \text{ Hz}$$

In realtà è difficile prevedere esattamente la frequenza di risonanza visto che è difficoltoso conoscere il grado di smorzamento meccanico del pannello e altri parametri secondari. Quindi di solito si utilizzano risultati sperimentali, utilizzando la formula solo per avere un'idea dell'ordine di grandezza.

In ogni caso i pannelli vibranti (tra i quali vanno incluse le superfici vetrate di grandi dimensioni) hanno una buona efficienza in bassa frequenza.



Si può osservare in questa figura come la frequenza di risonanza di un certo pannello diminuisce con l'aumentare della sua densità e all'aumentare della distanza parete-pannello (cioè con il volume dell'intercapedine).

Anche in questo caso, riempiendo l'intercapedine con materiale assorbente poroso è possibile allargare lo spettro di assorbimento, diminuendo però l'efficienza massima del sistema.

## MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO CON DIVERSI METODI

Misura nel tubo a onde stazionarie

$\alpha$  a incidenza normale

Misura in camera riverberante

$\alpha$  a incidenza random

Misura con metodo a riflessione

$\alpha$  a incidenza normale

Ogni metodo di misura è basato su una diversa metodologia. Non è dato per scontato che i risultati della misura del coefficiente di assorbimento di uno stesso materiale con metodi diversi siano uguali, anzi spesso ciò non accade.

Si distinguono comunque metodi che permettono di misurare il coefficiente di assorbimento a incidenza random da quelli che permettono la misura a incidenza normale o ad angoli di incidenza arbitrari.

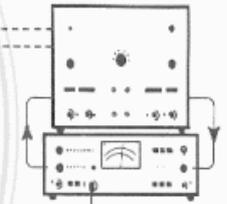
**MISURA NEL TUBO A ONDE STAZIONARIE**
**Misura di  $\alpha$  a incidenza normale**
**Metodo "classico", ISO 10534-1:**

- Generazione di onde piane all'interno di un condotto, ad un'estremità del quale è posto un provino del materiale
- Misura delle ampiezze e posizioni dei nodi e dei ventri delle onde stazionarie che vi si formano
- Calcolo dell'impedenza superficiale del materiale e da questa i coefficienti di riflessione e assorbimento

Generatore di segnali



Analizzatore



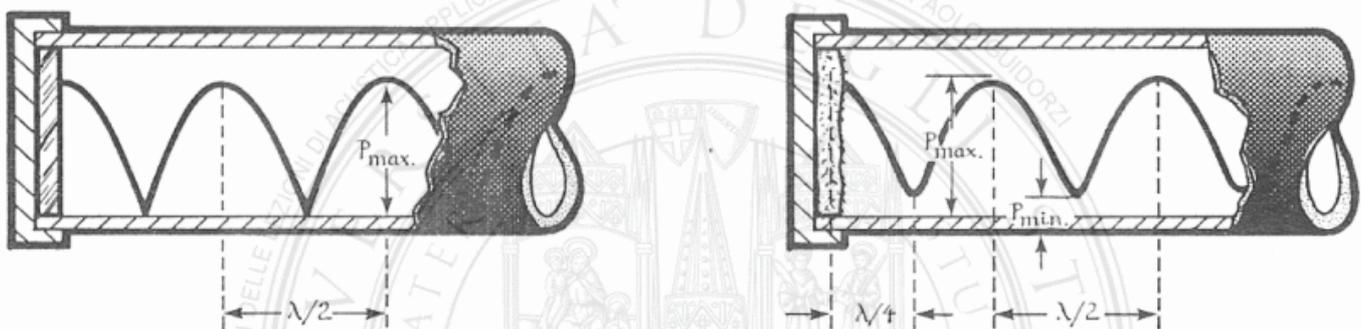
Tubo rigido



Microfono

Sorgente di onde sinusoidali

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



$$SWR = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} \quad \alpha = 1 - \left( \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right)^2$$

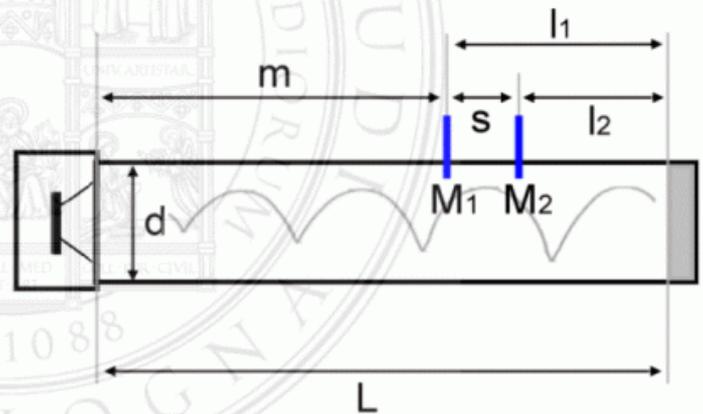
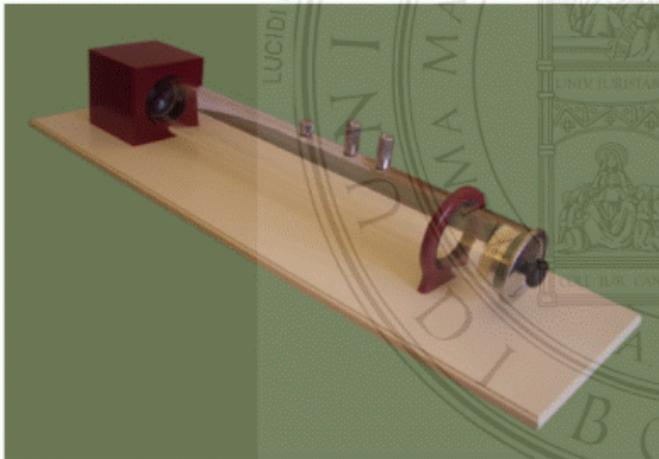
 In genere  $\alpha_n$  è inferiore rispetto al valore di  $\alpha$  misurato in camera riverberante

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**Metodo "moderno" ISO 10534-2:**

- Calcolo del coefficiente di riflessione complesso (e da questo il coefficiente di assorbimento) a partire dalla misura della funzione di trasferimento tra 2 microfoni posti a una distanza nota sul fianco del tubo

Questa metodologia permette tempistiche rapide essendo basata su una misura in larga banda dei segnali ai microfoni e sulla loro trasformazione in tempo reale nel dominio delle frequenze, senza parti meccaniche in movimento.



**MISURA IN CAMERA RIVERBERANTE**

**Misura di  $\alpha$  a incidenza random**

**Misura secondo normativa UNI-ISO 354**

ANTICIPAZIONE: Tempo di riverberazione

All'interno di un ambiente chiuso allo spegnimento di una sorgente stazionaria si crea una "coda sonora". Il tempo impiegato dal livello di pressione sonora per decadere di 60 dB viene detto **tempo di riverberazione**. Esistono varie formule che permettono di calcolare tale tempo in funzione del volume dell'ambiente e del suo assorbimento. La più semplice è la formula di Sabine:

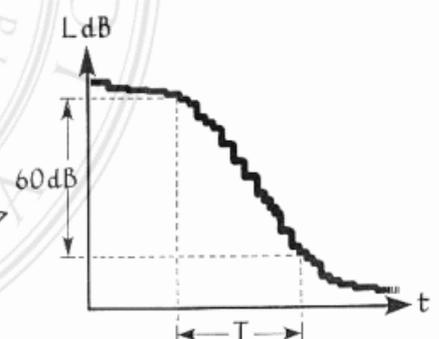
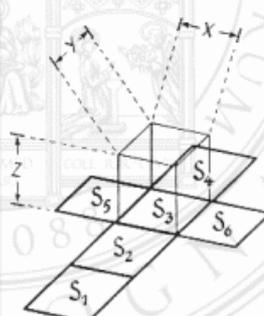
$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A}$$

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

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

Sabine

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



La misura si svolge all'interno di una camera detta "riverberante", con determinate caratteristiche, specificate nella normativa UNI-ISO 354. Si effettuano due misurazioni di tempo di riverberazione, una con la camera vuota e una con la camera all'interno della quale è stato inserito il campione.

- $\alpha_0$  : coefficiente di assorbimento della camera vuota
- $\alpha_x$  : coefficiente di assorbimento medio del campione
- $V$  : volume della camera di prova
- $S_0$  : superficie totale della camera
- $S_x$  : superficie del campione in prova
- $T_x$  : tempo di riverberazione con il materiale
- $T_0$  : tempo di riverberazione senza il materiale



Camera riverberante dell'istituto Galileo Ferraris, Torino

$$T_0 = 0,163 \frac{V}{\alpha_0 S}$$



$$\alpha_x = 0,163 \frac{V}{S_x} \left( \frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right) + \alpha_0$$

$$T_x = 0,163 \frac{V}{\alpha_0 S - \alpha_0 S_x + \alpha_x S_x}$$

Questo metodo, pur essendo il più semplice e "antico" presenta molteplici problemi di ripetibilità e attendibilità. Ad esempio in caso di campo sonoro non perfettamente diffuso si possono avere valori di alfa maggiori di 1 (fisicamente assurdo).

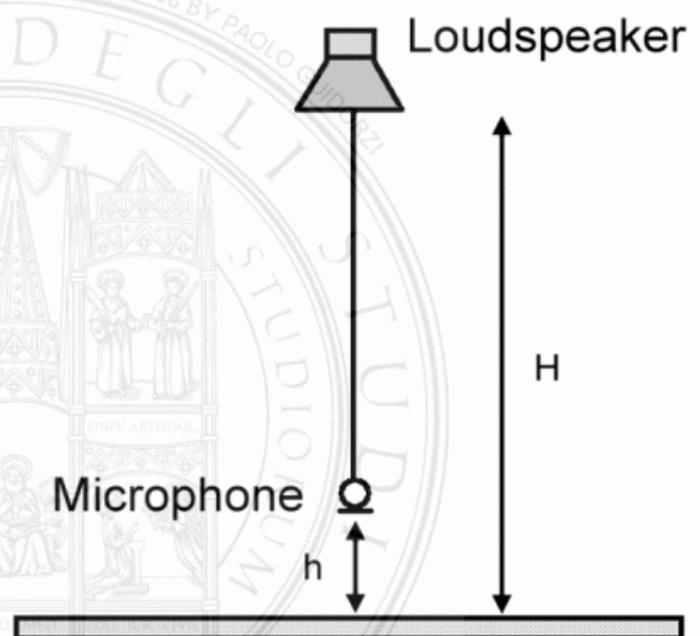
## MISURA CON METODO A RIFLESSIONE

### Misura di $\alpha$ a incidenza normale

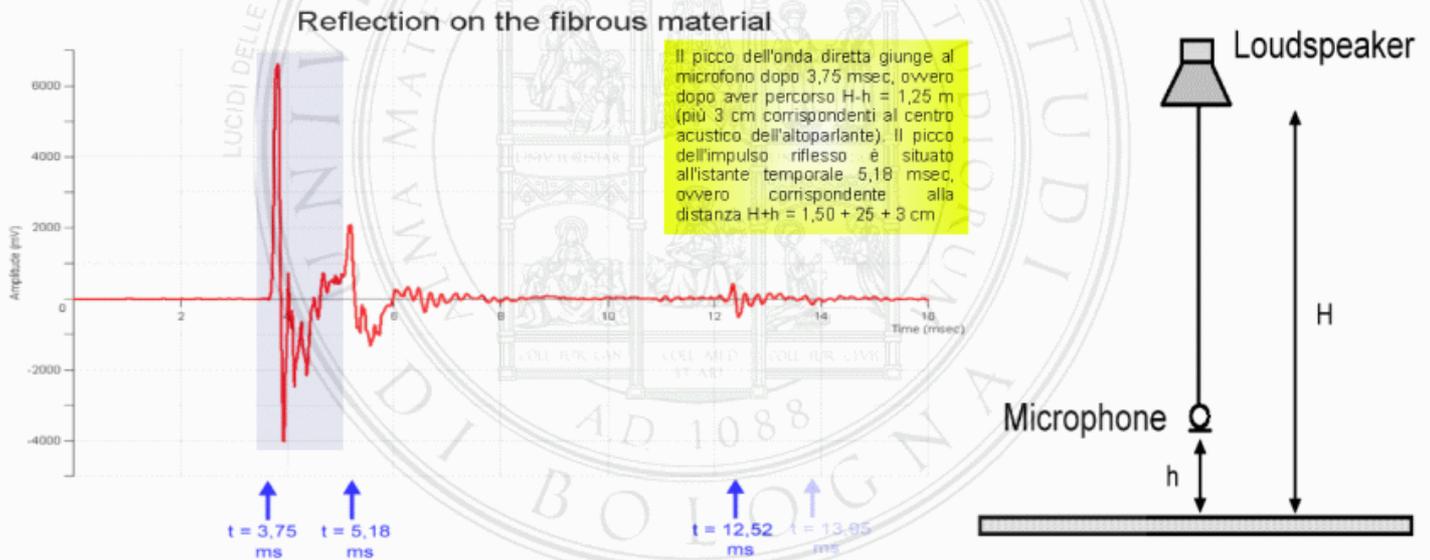
#### Misura secondo normativa ISO 13472-1

- permette di misurare il coefficiente di assorbimento di un materiale in situ
- una sorgente (altoparlante e relativa cassa acustica) viene sospesa sopra al materiale da testare
- un microfono è tra la sorgente e la superficie

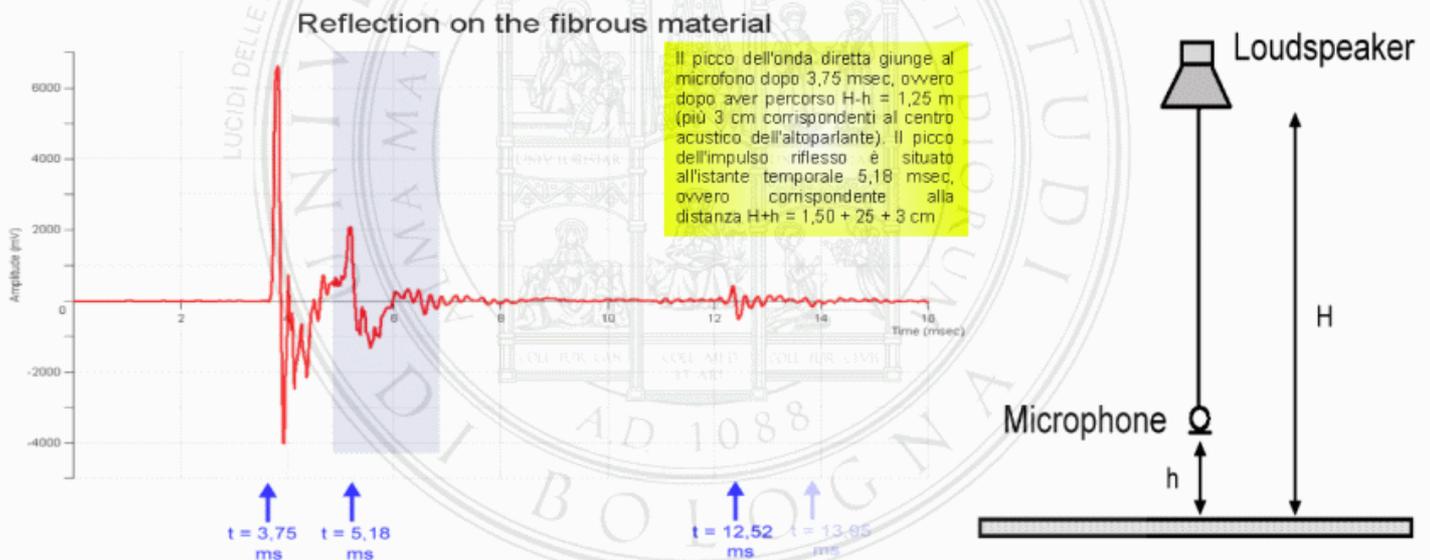
Il metodo consiste nella misura e analisi della risposta impulsiva composta del sistema. La misura della risposta impulsiva *anticamente* veniva effettuata utilizzando sorgenti impulsive quali pistole a salve, scoppio di palloni o scintille. Oggi invece esistono metodi elettronici digitali che con l'utilizzo di un semplice altoparlante permettono di effettuare la misura di risposta impulsiva in modo accurato e ripetibile.



La risposta impulsiva misurata presenta un primo picco, corrispondente all'arrivo del suono che parte dalla sorgente e giunge al microfono, dopo aver percorso uno spazio  $H-h$ . Questo primo picco contiene solamente informazioni spettrali relative al sistema di misura altoparlante-microfono-elettronica di supporto.



L'onda sonora, quindi percorre un'ulteriore cammino  $h$ , viene riflessa dal materiale in prova e percorre nuovamente lo spazio  $h$  per tornare a essere captata dal microfono. Si avrà quindi un secondo picco, separato dal primo da un intervallo di tempo corrispondente alla distanza  $2h/c$ . Il secondo picco (sovrapposto alla coda del primo) è stato *filtrato* dal materiale in prova e quindi dall'analisi e rapporto del contenuto spettrale delle due risposte impulsive, opportunamente finestrate, si ricavano le informazioni sull'assorbimento del materiale in funzione della frequenza.



Il coefficiente di assorbimento è calcolato utilizzando la formula:  $\alpha(f) = 1 - \frac{1}{K_r^2} \frac{|P_r(f)|^2}{|P_i(f)|^2}$

dove  $P_r$  e  $P_i$  sono i valori assoluti delle ampiezze della pressione complessa delle onde riflessa e diretta (calcolate a partire dalle trasformate di Fourier dell'onda riflessa e diretta rispettivamente);

$K_r$  è un fattore di correzione della divergenza sferica:  $K_r = \frac{H-h}{H+h}$



## POTERE FONOISOLANTE

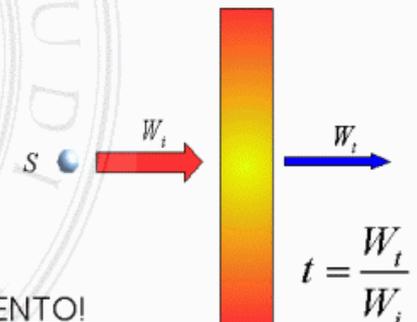
$\alpha \rightarrow 1$  Materiale fonoassorbente

$t \rightarrow 0$  Materiale fonoisolante

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

In acustica edilizia, oltre al cosiddetto coefficiente di assorbimento acustico apparente  $\alpha$ , 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.

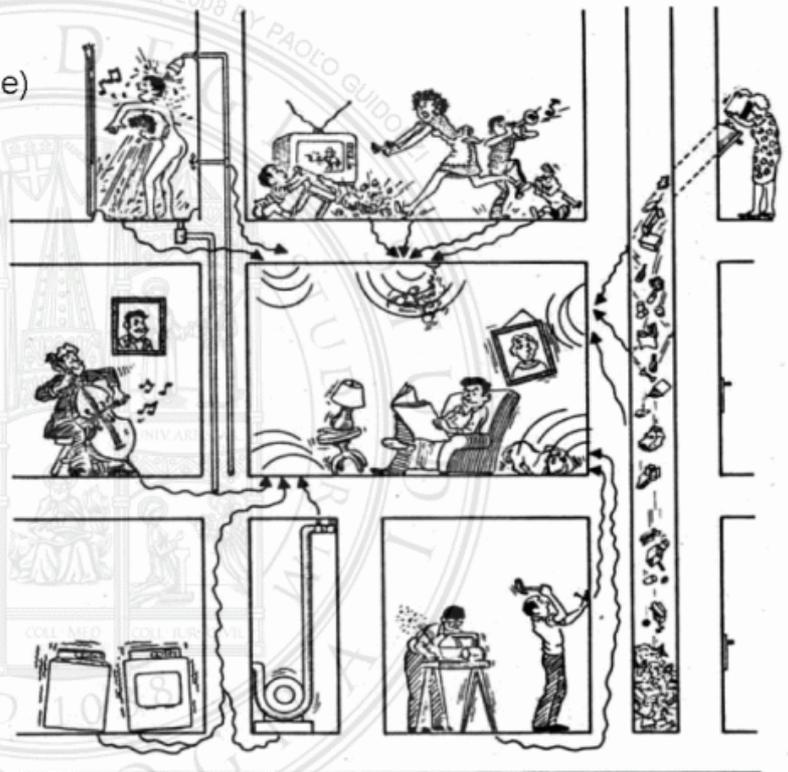


Image Courtesy of Brüel & Kjær

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 alla sollecitazioni, il campo sonoro costituito solo da onde piane, si giunge ad una relazione, nota come **legge di massa**:

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

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

Image Courtesy of Brüel & Kjær



**LA LEGGE DI MASSA**

Nel caso di incidenza normale ( $\theta = 0$ ) la relazione diventa:  $R \cong 20 \log(m \cdot f) - 42,5$  (dB)

Questa legge ci dice che R è proporzionale logaritmicamente alla massa superficiale e alla frequenza, quindi un raddoppio della frequenza o della massa porta un incremento di 6 dB del potere fonoisolante. Quest'ultima relazione vale solo nel caso particolare di onde piane incidenti normalmente sulla parete. Nel caso più realistico di onde provenienti da tutte le direzioni (campo diffuso), la relazione diventa:

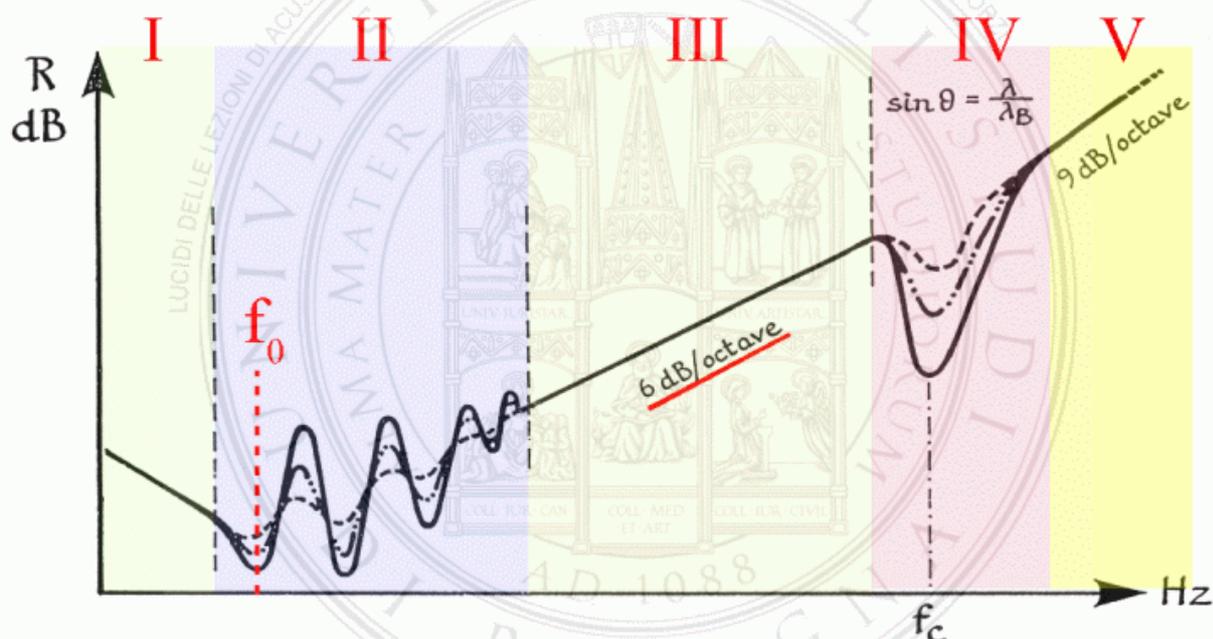
**CAMPO SONORO PERFETTAMENTE DIFFUSO** (onde provenienti da angoli da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ )

$$R_c \cong R - 10 \log(0,23 \cdot R) \quad (\text{dB})$$

**CAMPO SONORO MEDIAMENTE DIFFUSO** (onde provenienti da angoli da  $0^\circ$  a  $78^\circ$ )

$$R_p = R - 5 \quad (\text{dB})$$

Tuttavia se si effettuano misure sperimentali su una parete (sempre omogenea e isotropa) si trova un grafico di R in funzione della frequenza che rispetta le relazioni citate solo in un ristretto range di frequenze (zona III del grafico in pagina seguente).

**DEVIAZIONI DALLA LEGGE DI MASSA**

## ZONA I – EFFETTO DI RIGIDITA'

Questo effetto si manifesta nel caso di pareti sottili, rigide e di bassa massa. In questa zona il potere fonoisolante cresce al diminuire della frequenza. R cala con una pendenza di circa 6 dB per ottava e incrementa di circa 6 dB raddoppiando la rigidezza.

Nei pavimenti e nelle pareti il fenomeno si verifica per valori di frequenza inferiori a una frequenza  $f_0$  detta frequenza fondamentale, di solito compresa tra 10 e 20 Hz. Quindi solitamente nella pratica questo effetto può essere ignorato.

## ZONA II – EFFETTO DI RISONANZA

Considerando una parete piana incastrata ai bordi, eccitando tale parete, essa entra in vibrazione ad una certa frequenza  $f_0$ , detta **frequenza fondamentale naturale**, che dipende dalla massa e dalla rigidità flessionale della struttura. Quando ad una parete giunge un'eccitazione alla frequenza fondamentale naturale, essa vibra con oscillazioni di ampiezza massima, ovvero entra in risonanza. La frequenza fondamentale cresce direttamente con lo spessore (rigidità) e inversamente con la massa superficiale; generalmente è compresa tra 1 e 100 Hz. Alla frequenza di risonanza si ha un sensibile calo del potere fonoisolante e quindi delle prestazioni di isolamento della parete.

La frequenza  $f_0$  corrisponde al primo modo naturale di vibrazione della parete. I modi superiori di vibrazione della parete portano altrettanti "buchi" di isolamento, alle frequenze  $f_n$  (si veda la zona II del grafico precedente).

La **frequenza di risonanza** per una lastra piana (dotata di elasticità e inerzia) può essere calcolata usando questa formula:

$$f_{res(n,m)} = 0.45 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[ \left(\frac{n}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 \right]} \quad [\text{Hz}]$$

$h$  spessore della parete [m]

$\rho$  densità del materiale [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

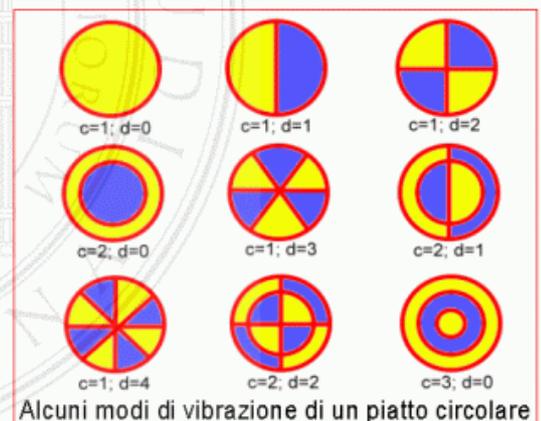
$E$  modulo di Young [ $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ ]

$x, y$  dimensioni della lastra [m]

$n, m$  numeri interi

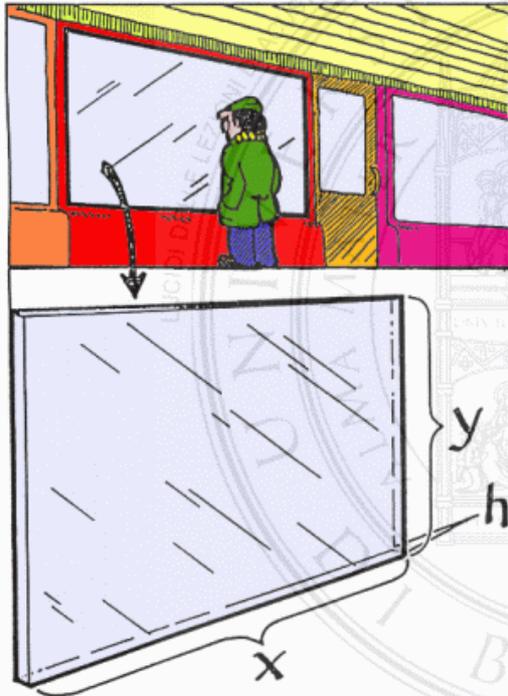
Tra queste frequenze, le più efficaci solo le prime, molto basse: al crescere della frequenza cala l'efficienza di radiazione del pannello. La più bassa di queste frequenze ( $n=m=1$ ) si dice **frequenza naturale**.

Materiale	Dimensioni (m)	Fr. naturale (Hz)	Fr. critica (Hz)
Piombo	3 x 3 x 0,001	0,13	55135
Vetro	3 x 4 x 0,01	9,7	1270
Calcestruzzo	3x 3 x 0,1	30	206



Alcuni modi di vibrazione di un piatto circolare

$$f_{res} = 0,45h \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[ \left( \frac{n}{x} \right)^2 + \left( \frac{m}{y} \right)^2 \right]}$$



$$h = 0,01 \text{ m}$$

$$x = 3 \text{ m}$$

$$y = 4 \text{ m}$$

$$n = m = 1$$

$$E = 6,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 2,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\therefore f_{res} = 9,7 \text{ Hz}$$

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## ZONA IV – EFFETTO DI COINCIDENZA

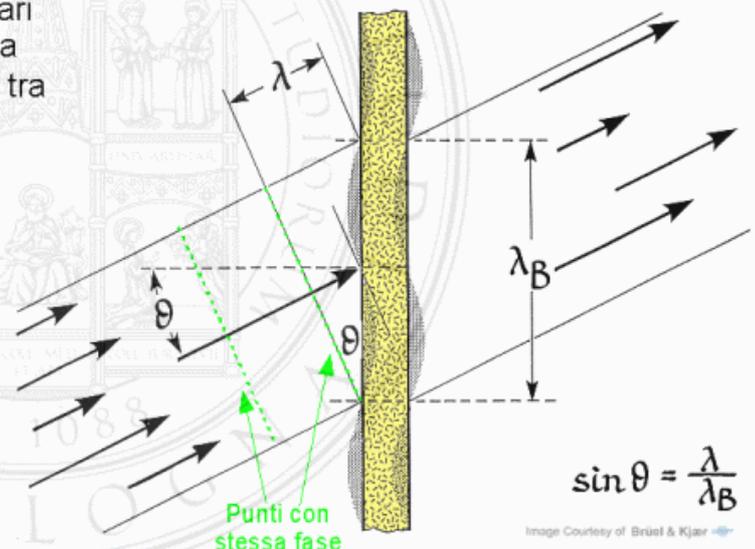
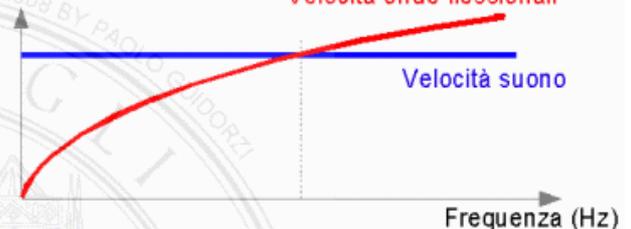
In una parete colpita da un'onda sonora incidente si formano onde flessionali la cui velocità varia con la frequenza. La velocità del suono in aria invece è costante. Esisterà quindi una frequenza alla quale queste due velocità coincidono. Se l'onda incidente giunge con un angolo  $\vartheta$  sulla parete, questa originerà un'onda flessionale forzata di lunghezza d'onda pari a  $\lambda / \text{sen} \vartheta$ . Il fenomeno della coincidenza si ha quando, per un certo angolo  $\vartheta$  si ha l'uguaglianza tra la lunghezza d'onda indotta  $\lambda / \text{sen} \vartheta$  e la lunghezza d'onda naturale della parete  $\lambda_B$ .

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\text{sen} \vartheta}$$

La più bassa frequenza per cui ciò accade, detta **frequenza critica** (calcolabile conoscendo alcuni parametri strutturali della parete), si verifica quando l'angolo di incidenza è massimo ( $90^\circ$ ) ovvero quando la velocità delle onde flessionali è uguale a quella del suono in aria oppure equivalentemente quando  $\lambda = \lambda_B$ .

Velocità delle onde

Velocità onde flessionali



$$\text{sen} \vartheta = \frac{\lambda}{\lambda_B}$$

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

La frequenza critica per una lastra omogenea risulta:

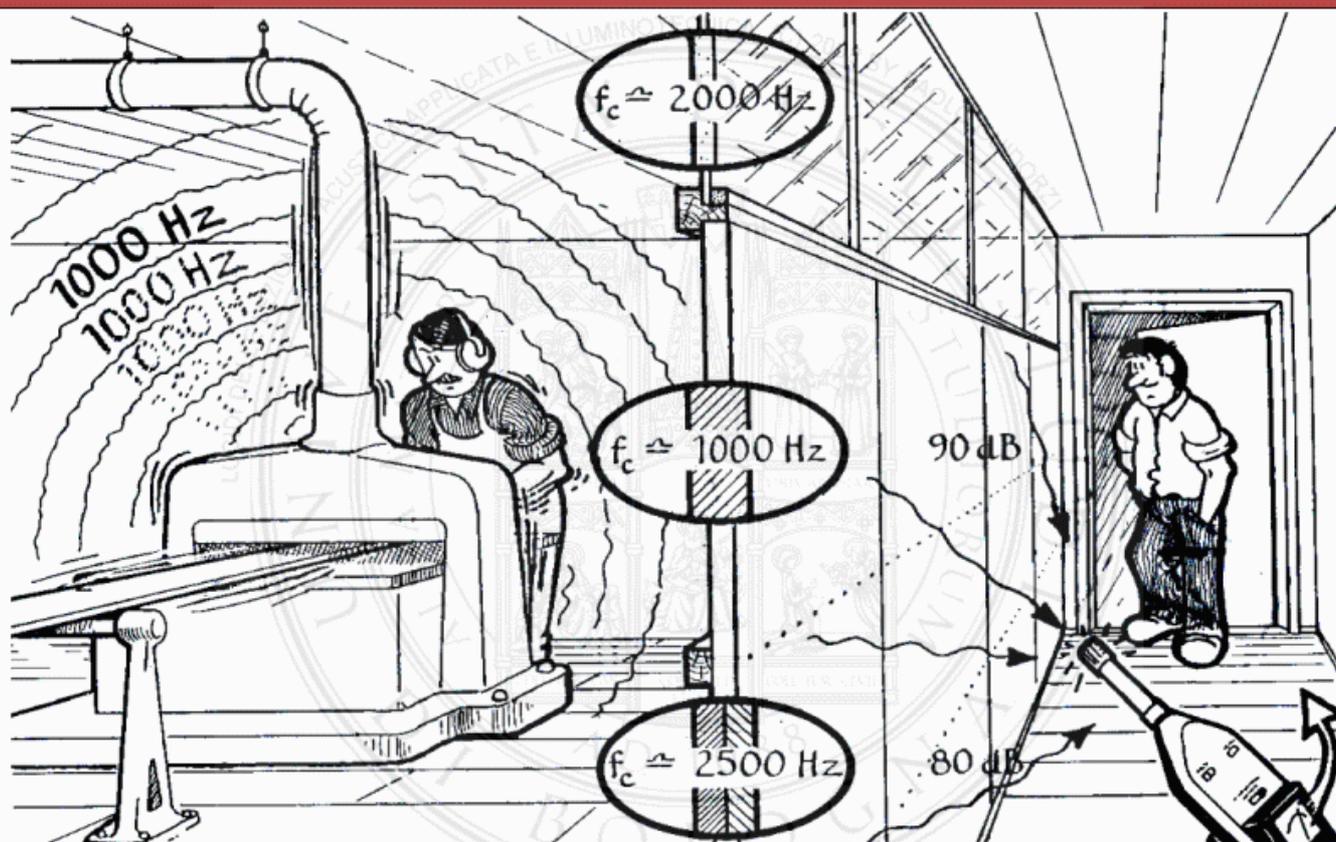
$$f_c = \frac{c^2}{\pi \cdot s} \sqrt{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}]$$

- $c$  velocità del suono [m/s]
- $s$  spessore della parete [m]
- $\rho$  densità del materiale [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $E$  modulo di Young [ $\text{Pa}=\text{N/m}^2$ ]
- $\nu$  coefficiente di Poisson [adim]

Fissato il materiale, la frequenza critica aumenta al diminuire dello spessore del pannello.

Materiale	Spessore (mm)	Frequenza critica (Hz)
Vetro	3	4800
Cartongesso	13	3150
Compensato	13	2000
Cemento	50	630
Cemento	150	200

Nella zona  $\nabla$  del grafico, al di sopra della zona della coincidenza,  $R$  tende ad aumentare con una legge simile alla legge di massa, ma con una pendenza di 9 dB/ottava.



Esempio di influenza del fenomeno della coincidenza

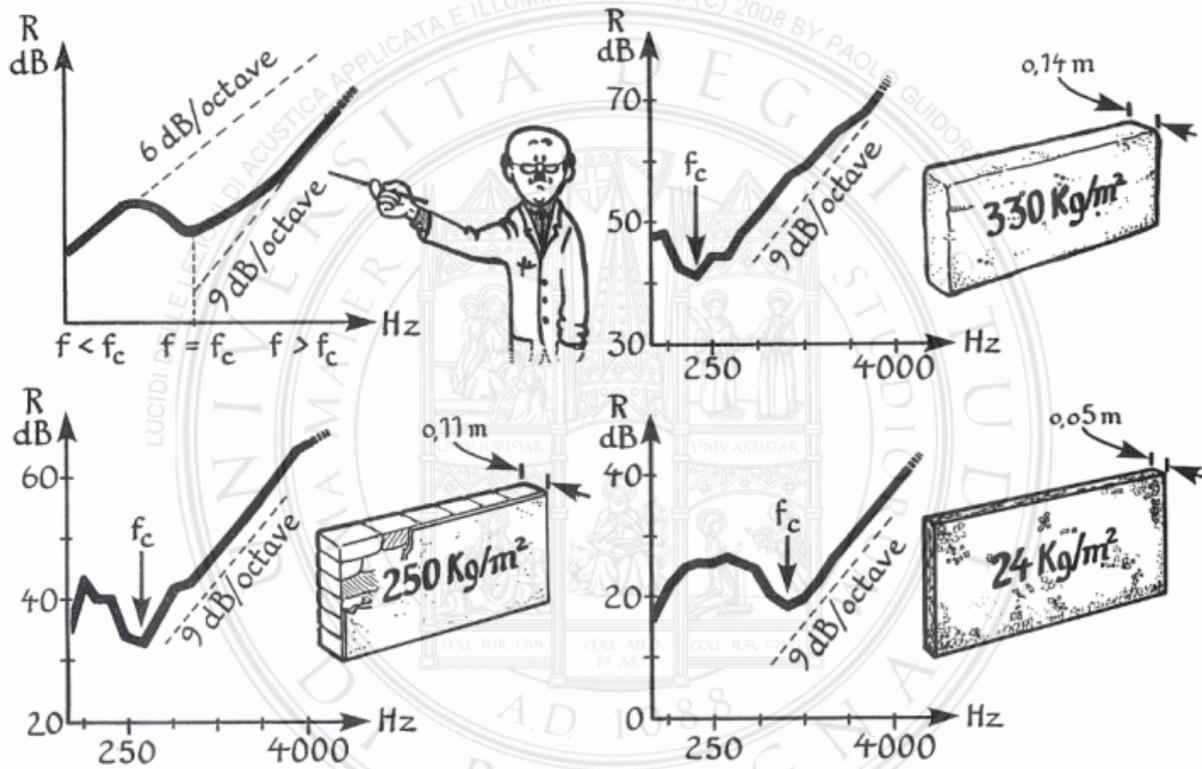
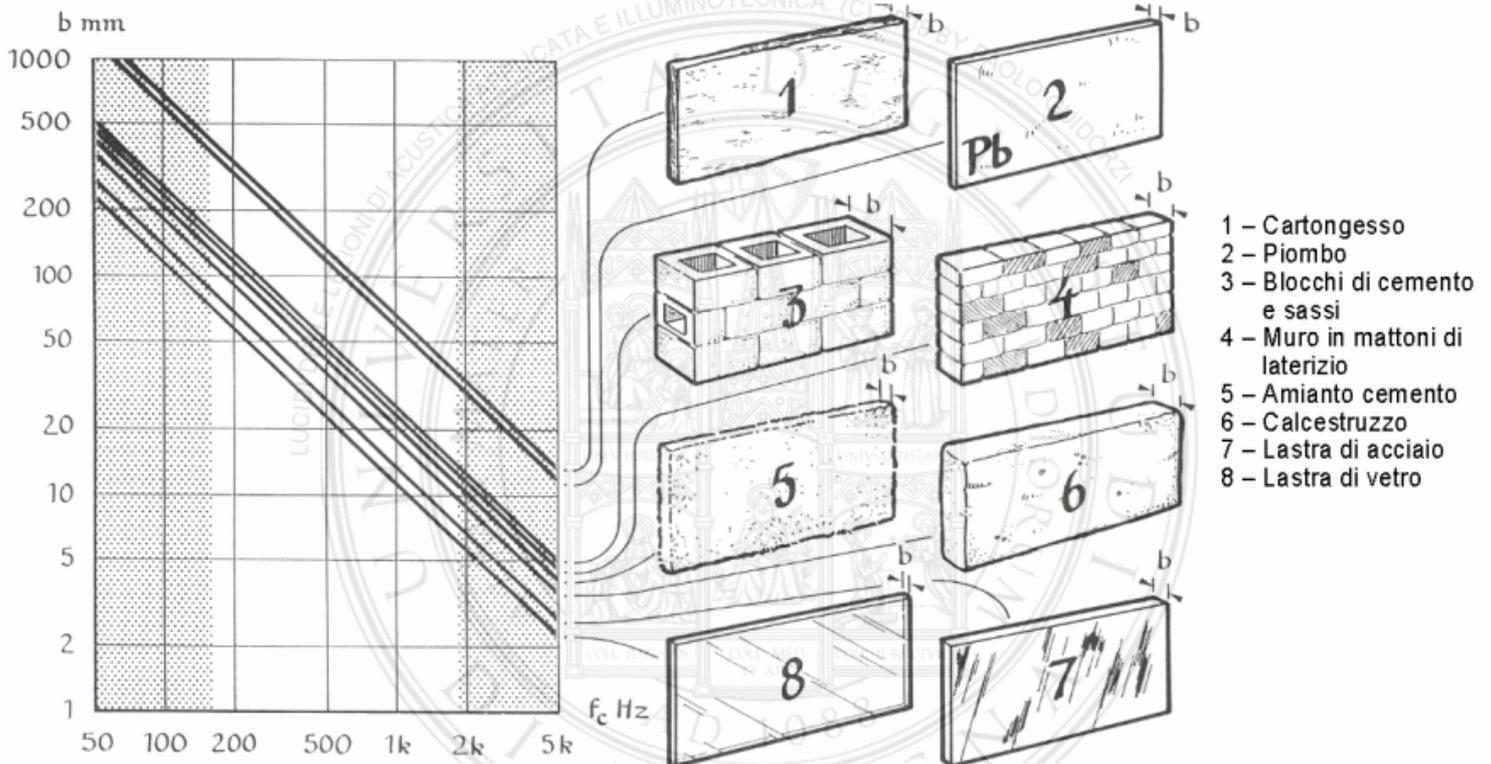


Image Courtesy of Brüel & Kjaer

Andamento del potere fonoisolante nell'intorno della frequenza critica per vari materiali



Frequenza critica per vari materiali e spessori

Image Courtesy of Brüel & Kjaer

**Modulo di Young** o modulo di elasticità:  
 è un parametro che caratterizza la  
 resistenza del solido alla deformazione

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{N/m}^2]$$

**Sforzo nominale:**  
 forza applicata / area di appl.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [\text{Pa} = \text{N/m}^2]$$

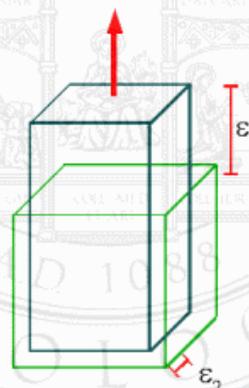
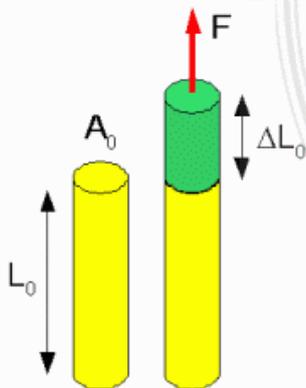
**Deformazione nominale**  
 o allungamento relativo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

**Coefficiente di Poisson:**

misura, in presenza di una sollecitazione monodirezionale longitudinale, il grado in cui il campione di materiale si restringe o si dilata trasversalmente.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{trasy}}}{\varepsilon_{\text{long}}}$$



### RISONANZA DI UNA CAVITA'

Considerando un'onda sonora all'interno di una cavità, ed essendo acusticamente riflettenti le due pareti interne, a causa dell'interferenza dell'onda diretta e di quella riflessa si ha la formazione di onde stazionarie, ovvero di onde che non si propagano ma hanno nodi e ventri nelle medesime posizioni. In particolare l'ampiezza di tali onde vale 0 nelle posizioni multiple dispari di  $\frac{1}{4}$  di lunghezza d'onda e ha valore massimo nelle posizioni multiple pari di  $\frac{1}{4}$  di lunghezza d'onda.

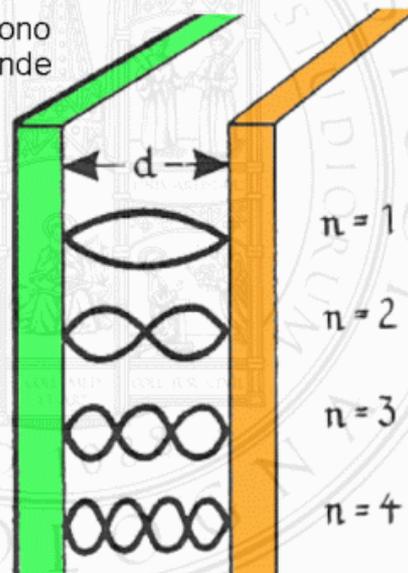
La frequenza delle onde stazionarie che si possono formare tra due superfici parallele riflettenti dipende dalla distanza tra le pareti stesse. La frequenza più bassa (cioè la fondamentale) vale:

$$f_0 = \frac{c}{2d} \quad (\text{Hz})$$

Le frequenze superiori risultano:

$$f_n = \frac{c}{2d} n \quad (\text{Hz}) \quad n=2, 3, 4, \dots$$

$$d = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{(\frac{c}{f})}{2} = n \frac{c}{2f} \Rightarrow f = \frac{c}{2d} n$$



Example  $d = 0,05 \text{ m}$

$$f = \frac{170n}{d}$$

$$f_1 = 850 \text{ Hz}$$

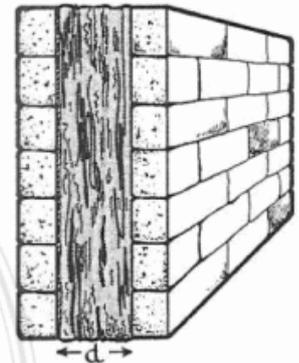
$$f_2 = 1700 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 2550 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 3400 \text{ Hz}$$

**PARETI DOPPIE**

Per lo studio dell'isolamento di una parete doppia occorre valutare il sistema completo, assimilabile a un sistema massa-molla-massa. La **frequenza di risonanza** di tale sistema risulta essere:



**PARETI FISSATE TRA LORO MEDIANTE MATERIALE ELASTICO:**

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz)}$$

**PARETI SEPARATE DA ARIA O FONOASSORBENTE:**

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,1}{d} \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \cong 50 \sqrt{\frac{1}{d} \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz)}$$

Per i materiali porosi comunemente usati per queste applicazioni, vale:

$$s' \cong \frac{0,1}{d} \text{ MN/m}^3$$

$s'$  rigidità dinamica superficiale dello strato elastico ( $\text{MN/m}^3$ )

$m'_1, m'_2$  massa superficiale dei materiali delle due pareti [ $\text{kg/m}^2$ ]

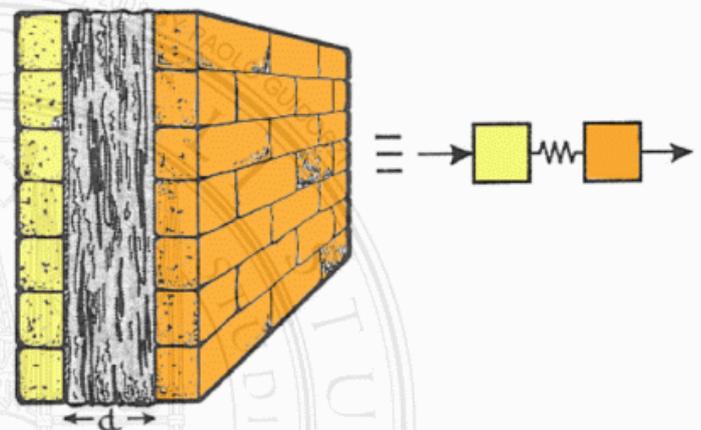
$d$  spessore dell'intercapedine [m]

La "rigidità dinamica" descrive la capacità di deformazione elastica di un materiale soggetto ad una sollecitazione di tipo dinamico.  
Cfr. UNI-EN 29052/1

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Nel caso generale, la **frequenza di risonanza** di un sistema massa-molla-massa vale:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_{\text{cavità}}}{d} \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz)}$$



**Esempio: doppio vetro**

$$\rho_{\text{aria}} = 1,21 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{\text{vetro}} = 2500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$x_1 = 4 \text{ [mm]}$$

$$x_2 = 7 \text{ [mm]}$$

$$d = 10 \text{ [mm]}$$



$$m'_1 = 2500 \cdot 0,004 = 10 \text{ kg/m}^2$$

$$m'_2 = 2500 \cdot 0,007 = 17,5 \text{ kg/m}^2$$

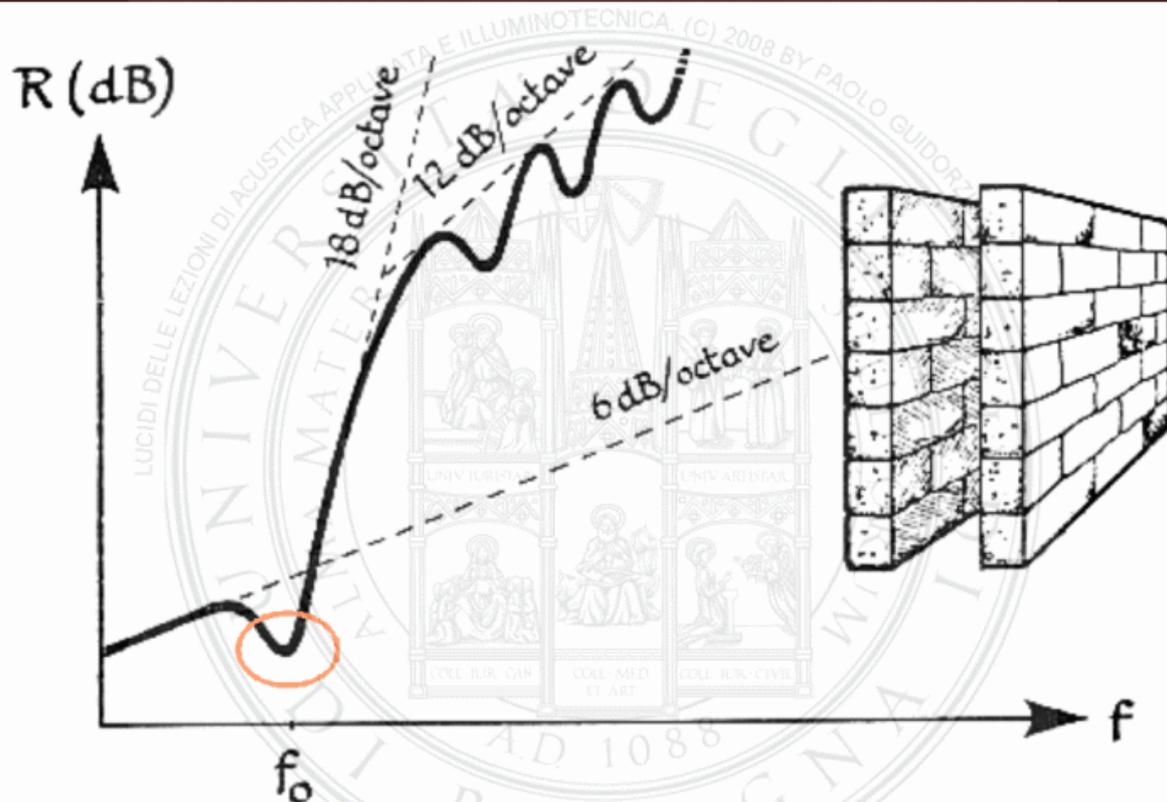
$$f_0 = \frac{340}{6,28} \sqrt{\frac{1,21}{0,01} \left( \frac{1}{10} + \frac{1}{17,5} \right)} \cong 236 \text{ Hz}$$

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Examples	$M_1$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$M_2$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$f_0$ [Hz]	$d$ [mm]
	100	25	< 75	32
	7,5	12,5	< 75	136
	100	21	< 75	26

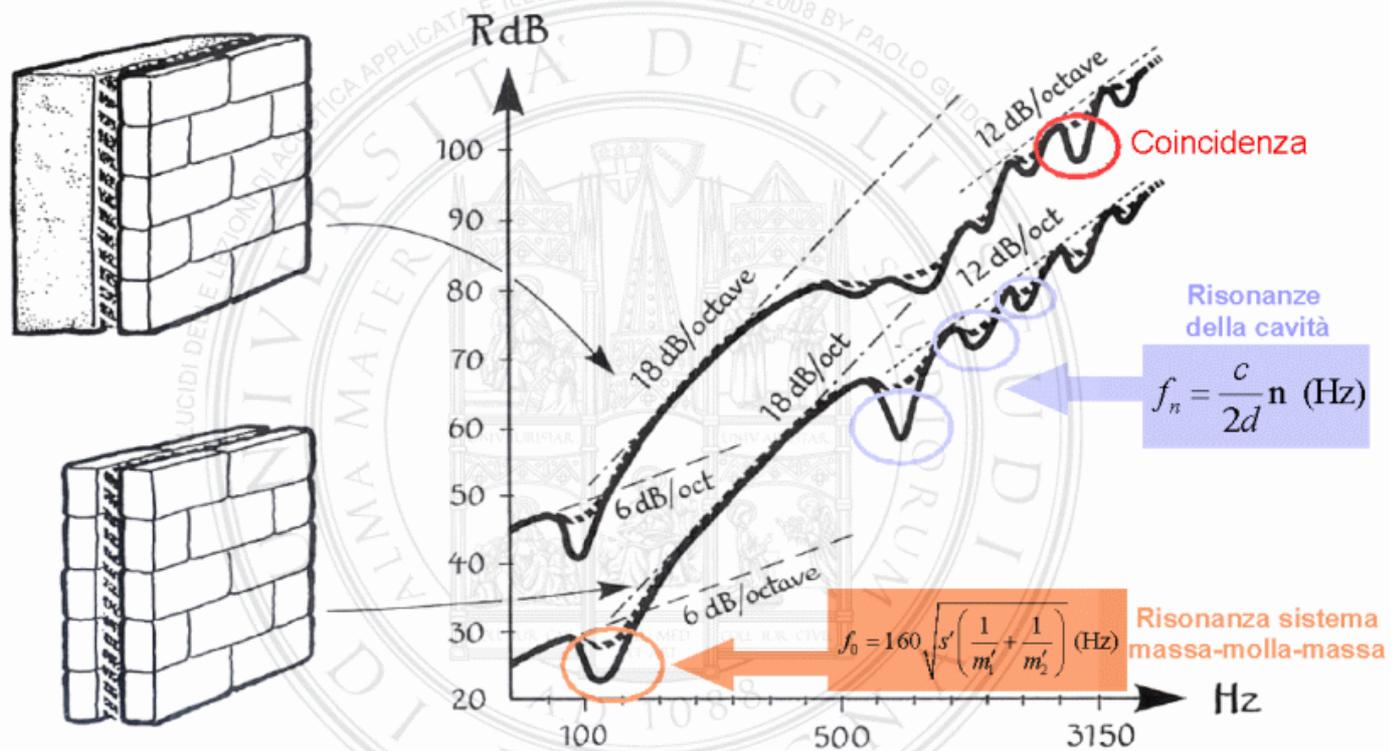
Frequenze di risonanza per alcuni tipi di pareti doppie

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



Esempio di diagramma dell'isolamento di una parete doppia

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



Frequenze di risonanza della cavità

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

Riepilogo del comportamento della parete doppia:

### FREQUENZA DI RISONANZA DEL SISTEMA MASSA-MOLLA-MASSA

Sotto a tale frequenza le pareti sono completamente accoppiate. La parete si comporta come una parete di massa uguale alla somma delle due masse. Alla frequenza di risonanza si ha un brusco calo del potere fonoisolante. Tale calo si può ridurre inserendo materiale fonoassorbente all'interno della cavità.

### FREQUENZA DI RISONANZA DELLA CAVITA'

Sopra a tale frequenza i pannelli sono completamente disaccoppiati. Il potere fonoisolante del sistema è circa uguale alla somma dei poteri fonoisolanti dei singoli pannelli.

Tra le due frequenze il potere fonoisolante ha una pendenza di circa 18 dB/ottava.

Materiale fonoassorbente nella cavità può ridurre anche i "buchi" dovuti alle risonanze di cavità.

Alle alte frequenze compare il fenomeno della **coincidenza**.

**NOTA:** per ridurre il fenomeno della coincidenza, è sempre bene che le due pareti abbiano masse diverse!

Occorre fare attenzione che la frequenza di risonanza del sistema massa-molla-massa sia fuori dal campo in cui interessa avere buon isolamento poiché a tale frequenza il potere fonoisolante è molto basso. Per abbassare questa frequenza si possono allontanare i pannelli o aumentarne la massa.

**MISURA IN LABORATORIO DEL POTERE FONOISOLANTE**

Norma UNI EN ISO 140-3

 Se si considera la sola trasmissione diretta  $D$ , si misura il **potere fonoisolante  $R$** .

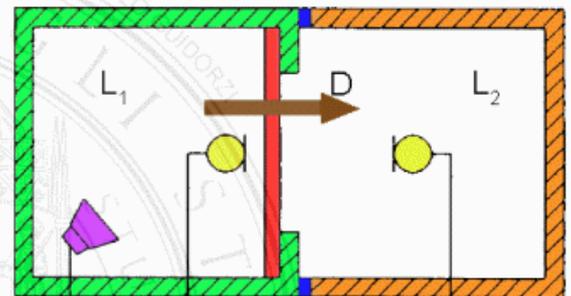
I due ambienti sono disgiunti e le trasmissioni laterali di energia minime.

 Si misurano, frequenza per frequenza, il livello medio di pressione nell'ambiente di origine  $L_1$  e nell'ambiente ricevente  $L_2$ . Il potere fonoisolante si ricava con la formula:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB})$$

 dove  $S$  è l'area del campione di prova in  $\text{m}^2$  e  $A$  l'area di assorbimento equivalente, calcolata con la formula:

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{T} \quad [\text{m}^2]$$

 dove  $T$  è il tempo di riverberazione dell'ambiente di ricezione.


Analizzatore e generatore

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

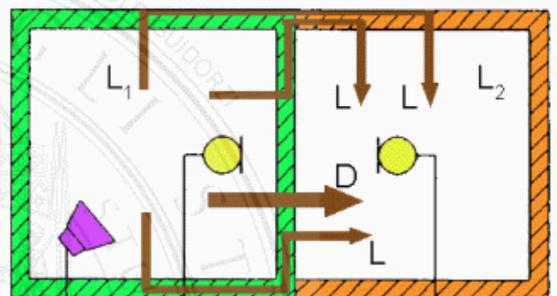
 Considerando anche la trasmissione di energia lungo elementi laterali ( $L$ ), si va a misurare il **potere fonoisolante apparente  $R'$** .

$$R' = 10 \log \frac{W_i}{W_i + W_{lat}} \quad (\text{dB})$$

 dove  $W_{lat}$  è la potenza trasmessa per vie laterali.

La misura avviene come nel caso precedente

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB})$$



Analizzatore e generatore

**MISURA IN OPERA DEL POTERE FONOISOLANTE**

Norma UNI EN ISO 140-4

Si misura il **potere fonoisolante apparente  $R'$**   
 In opera sono presenti vie di trasmissione aeree e  
 strutturali non presenti in laboratorio. Si misurano quindi  
 la trasmissione diretta  $D$  e quelle laterali  $L$ .

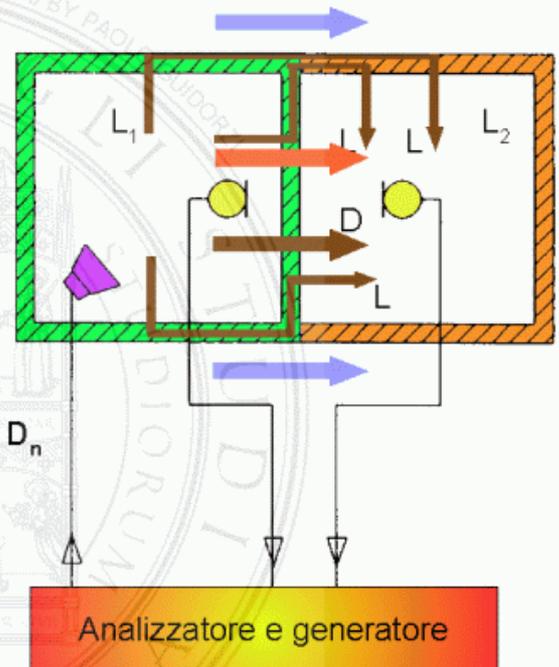
$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB})$$

La ISO 140-4 permette anche di valutare un divisorio in  
 opera con la misura dell'**isolamento acustico normalizzato  $D_n$**

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB})$$

dove  $A$  è l'area equivalente di assorbimento acustico  
 dell'ambiente ricevente, e  $A_0$  un valore di riferimento  $10 \text{ m}^2$   
 Oppure l'**isolamento acustico normalizzato rispetto al  
 tempo di riverberazione  $D_{nT}$**  ( $T_0=0,5$  secondi)

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (\text{dB})$$



$$R' = 10 \log \frac{W_i}{W_i + W_{lat}} \quad (\text{dB})$$

**PARETI COMPOSTE – ELEMENTI IN PARALLELO**

Nel caso di pareti composte da più elementi (porte,  
 finestre, aperture o zone di diverso spessore o  
 materiale) occorre calcolare l'attenuazione totale.

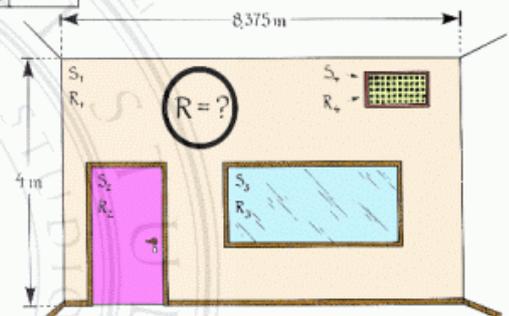
$R_i$ dB	$t_i$	$S_i$ m <sup>2</sup>	$t_i S_i$
1	50	0,00001	28,0
2	25	3,0	0,00028
3	14	2,0	
4	7	0,5	

$$S = \sum S_i =$$

$$\sum t_i S_i =$$

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

$$\bar{t} = \left( \frac{\sum t_i S_i}{\sum S_i} \right) \quad t_i = 10^{\frac{-R_i}{10}} \Leftrightarrow R_i = 10 \log \left( \frac{1}{t_i} \right)$$



$$R = 10 \log \left( \frac{1}{\bar{t}} \right) = 10 \log \left( \frac{\sum S_i}{\sum t_i S_i} \right) = 10 \log \left( \frac{\sum S_i}{\sum 10^{\frac{-R_i}{10}} S_i} \right)$$

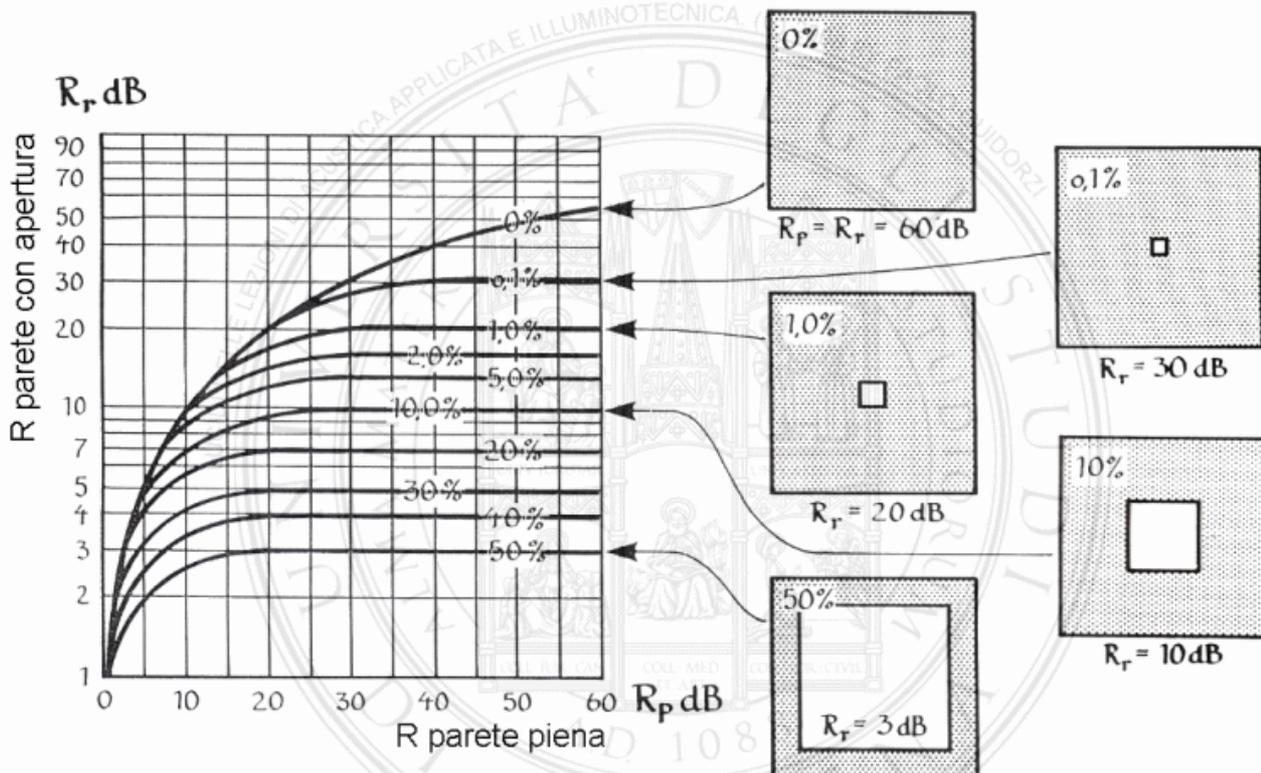
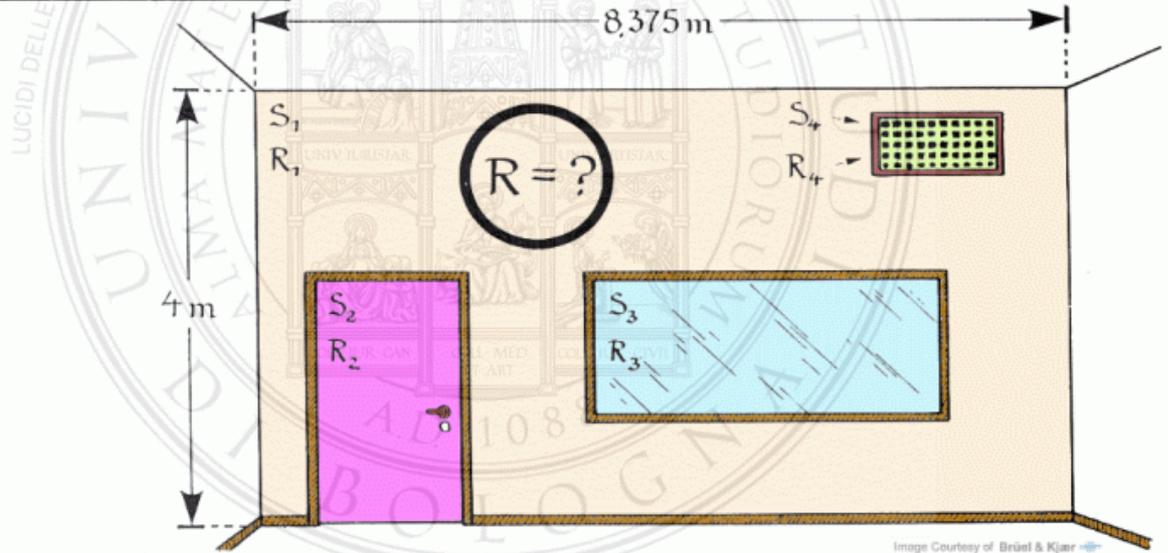
$$\tau_i = 10^{-0,1R_i}$$

	$R_i$ dB	$\tau_i$	$S_i$ m <sup>2</sup>	$\tau_i S_i$
1	50	0,00001	28,0	0,00028
2	25	0,00316	3,0	0,0095
3	14	0,0398	2,0	0,0796
4	7	0,1995	0,5	0,0998

$$S = \sum S_i = 33,5$$

$$\sum \tau_i S_i = 0,189$$

$$R = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum S_i}{\sum \tau_i S_i} \right) = 22,5 \text{ dB}$$



**ATTENZIONE:** un'apertura solo dello 0,1% fa decadere il potere fonoisolante di ben 30 dB  
 Un isolamento acustico efficace è basato sull'attenzione ai particolari!

$$0,1\% \Rightarrow t = 0,001 \Leftrightarrow R = 10 \log \left( \frac{1}{t} \right) = 30 \text{ dB}$$

$$1\% \Rightarrow t = 0,01 \Leftrightarrow R = 10 \log \left( \frac{1}{t} \right) = 20 \text{ dB}$$

$$10\% \Rightarrow t = 0,1 \Leftrightarrow R = 10 \log \left( \frac{1}{t} \right) = 10 \text{ dB}$$

$$50\% \Rightarrow t = 0,5 \Leftrightarrow R = 10 \log \left( \frac{1}{t} \right) = 3 \text{ dB}$$

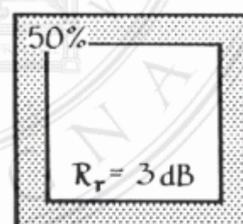
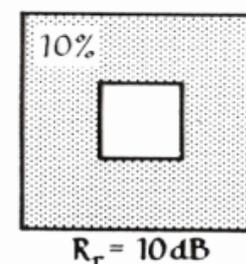
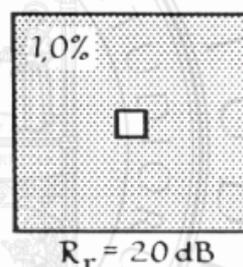
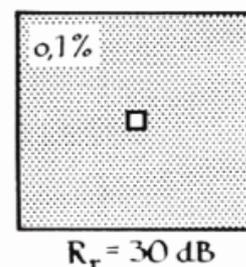
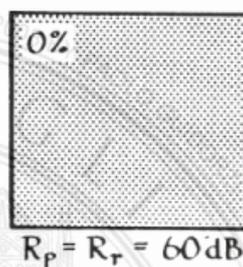


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

### LIVELLO DI RUMORE DA CALPESTIO

La grandezza acustica caratteristica del solaio è il **livello sonoro impattivo normalizzato**  $L_n$ :

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

$L_i$ : livello di pressione acustica nell'ambiente disturbato

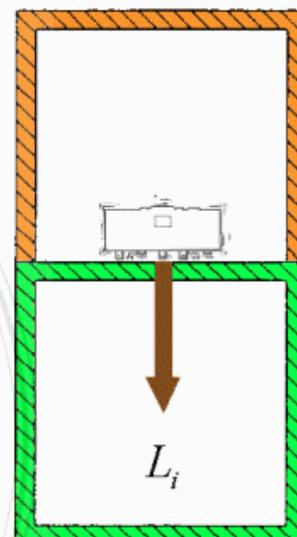
$A$ : area equivalente di assorbimento dell'ambiente ricevente ( $m^2$ ) = 0,16 V/T

$A_0$ : area di riferimento 10  $m^2$

Per la misura si usa una sorgente nota:  
 il **Generatore di calpestio normalizzato**



Il generatore è un dispositivo costituito da cinque martelli d'acciaio di peso 500 g, di forma cilindrica, disposti in linea retta, che cadono perpendicolarmente sulla superficie in prova, da una altezza di 40 mm per forza di gravità.



Il livello di pressione sonora da calpestio può essere normalizzato in due modi:

### 1 – DPCM 5-12-97

Normalizzazione rispetto all'assorbimento acustico

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

$L_i$  : livello di pressione acustica nell'ambiente disturbato

$A$  : area equivalente di assorbimento dell'ambiente ricevente ( $m^2$ ) =  $0,16 V/T$

$A_0$  : area di riferimento  $10 m^2$

### 2 – Regolamento edilizio Emilia-Romagna

Normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione

$$L_{n,T} = L_i - 10 \lg \frac{T}{T_0}$$

$T$  : tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente (s)

$T_0$  : tempo di riferimento 0,5 s

I due metodi risultano equivalenti per un volume dell'ambiente ricevente pari a  $31,25 m^3$



*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

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

***Indice***

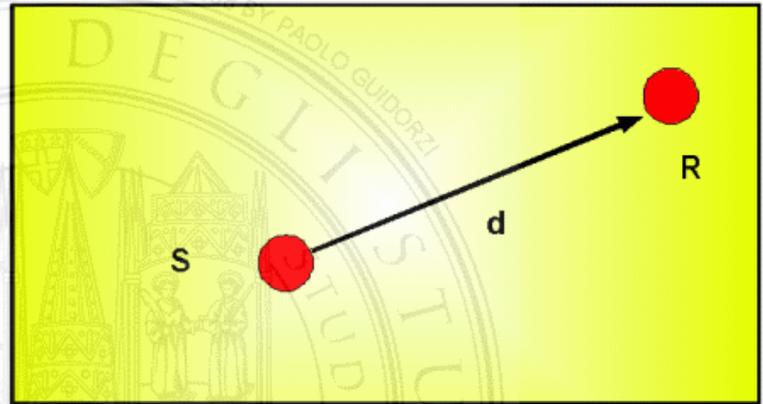
ACUSTICA DEGLI AMBIENTI CHIUSI

Pag. 2

- 1 - Formazione del campo acustico riverberante
- 2 - La coda sonora
- 3 - Il tempo di riverberazione
- 4 - La distanza critica
- 5 - La formula di Sabine
- 6 - La formula di Eyring
- 7 - La formula di Millington-Sette
- 8 - Correzione per l'assorbimento dell'aria
- 9 - Il campo riverberante
- 10 - Il campo semi-riverberante
- 11 - La qualità delle sale
- 12 - Parametri acustici (iso 3382)
- 13 - Modi normali di vibrazione

**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.



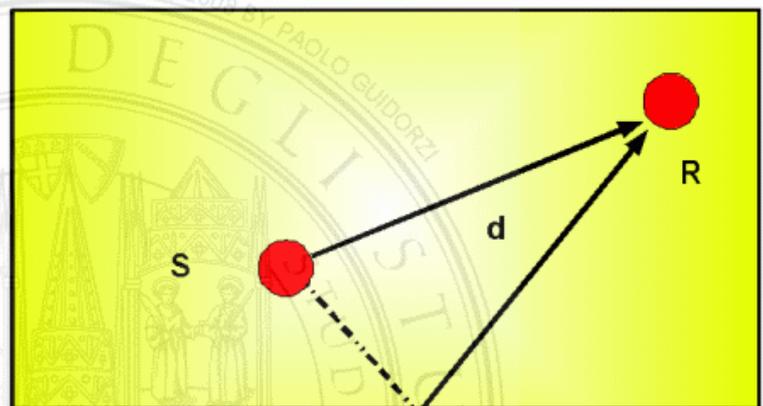
All'istante  $t_0$  al ricevitore ancora non è giunto alcun suono. Il primo istante di arrivo corrisponde al tempo  $t_1 = t_0 + \frac{d}{c}$

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.

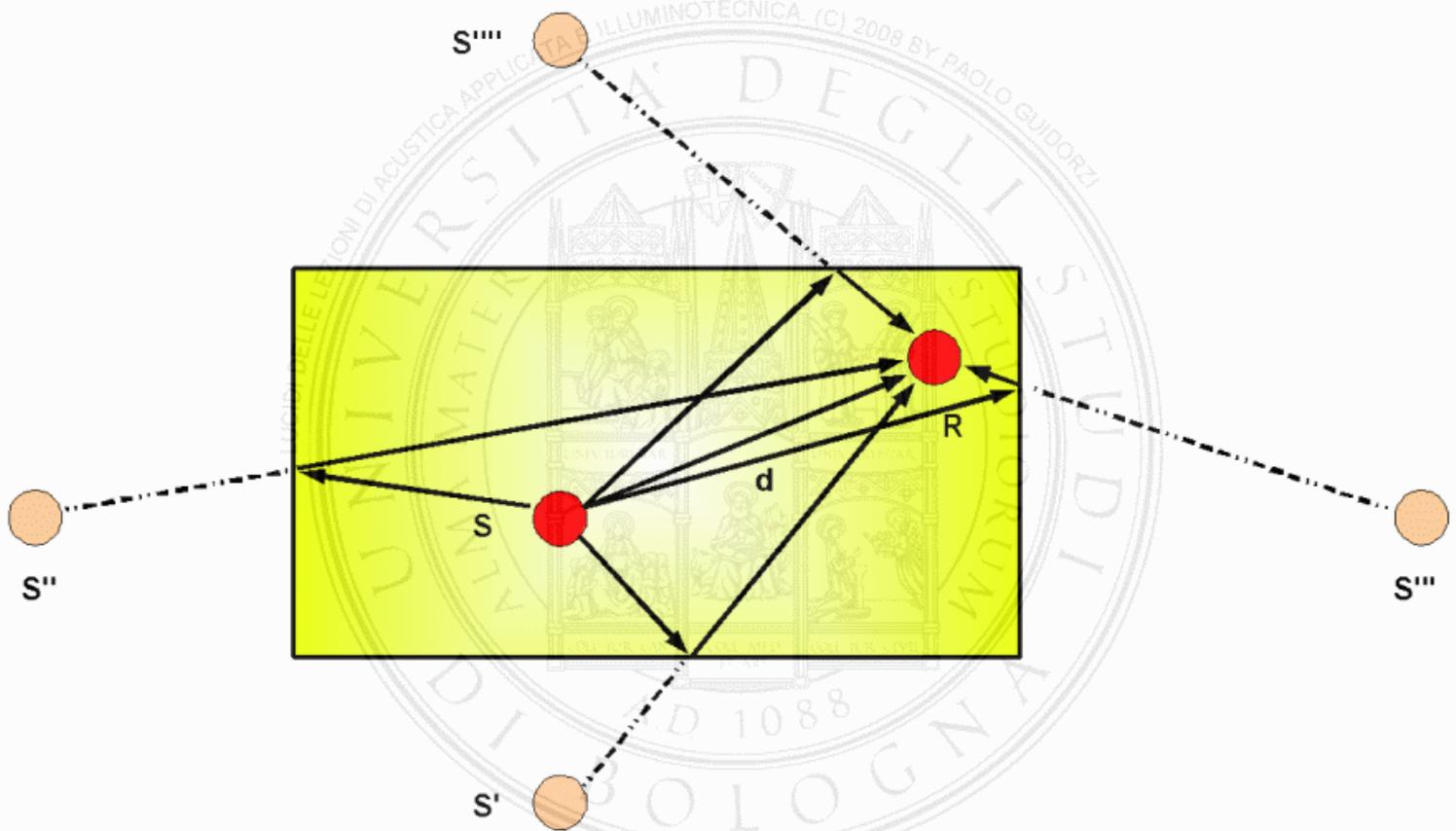
Al tempo  $t_2$  quindi arriverà al ricevitore anche il contributo dovuto alla prima riflessione, che si può immaginare causato da una sorgente virtuale speculare rispetto alla parete. La densità sonora al ricevitore sarà quindi ora:

$$D = D_{dir} + \Delta D_1$$

$$\Delta D_1 < D_{dir}$$



**NOTA:** considerando un campo sonoro uniforme e una superficie all'interno del campo, essa viene attraversata da un uguale flusso di energia sonora da entrambe le facce e quindi l'intensità sonora risulta nulla in ogni punto. Quindi il campo sonoro di un ambiente chiuso viene studiato utilizzando la grandezza densità di energia sonora.



Agli istanti successivi arriveranno uno dopo l'altro tutti i contributi dovuti alle altre riflessioni sulle pareti. Gli incrementi di densità sonora saranno di entità sempre minore:

$$\Delta D_2 < \Delta D_1$$

$$\Delta D_3 < \Delta D_2$$

...

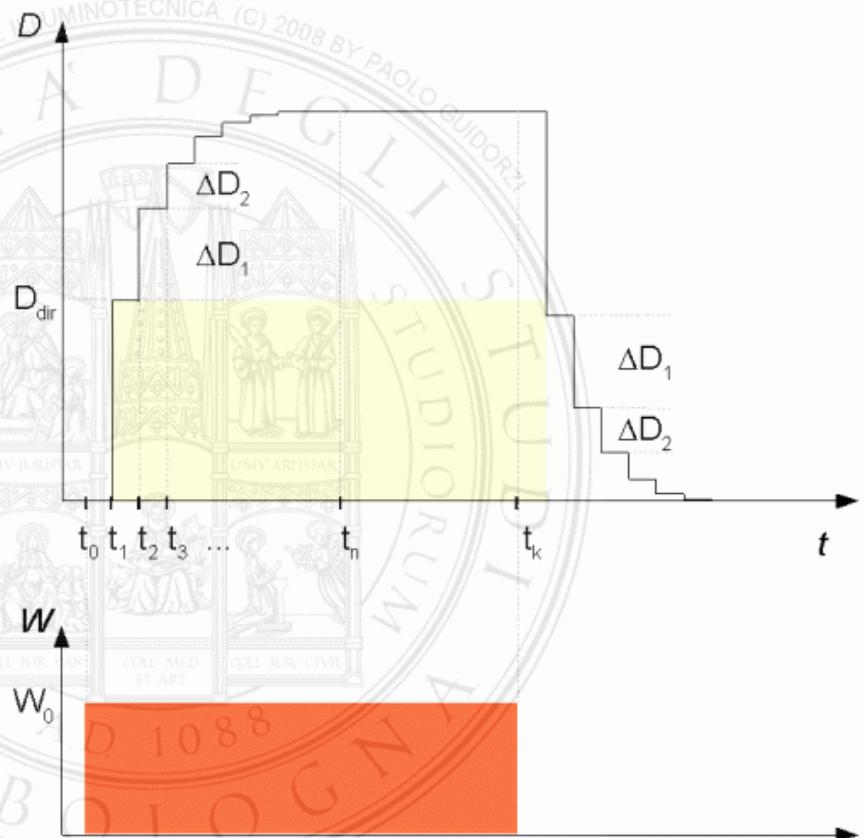
fino a tendere a zero. A quel punto il campo riverberante sarà completamente formato e non si avrà più incremento di densità di energia sonora poiché l'energia assorbita eguaglia quella emessa dalla sorgente. La parte di densità acustica dovuta al **solo campo riverberante** risulta essere:

$$D_{riv} = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta D_n$$

mentre la **densità acustica totale** al ricevitore vale:  $D = D_{dir} + D_{riv}$

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.

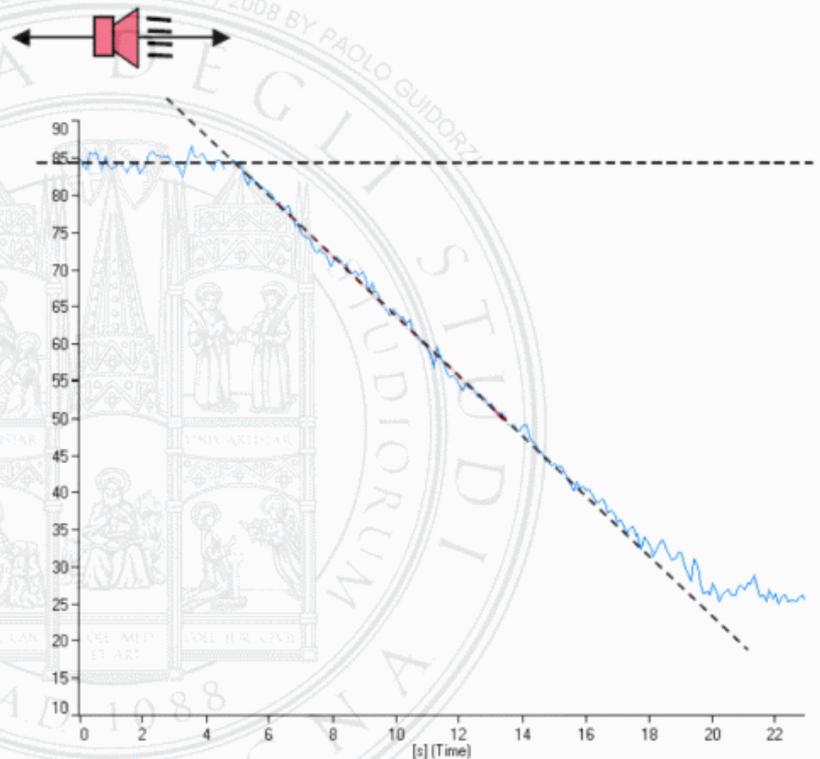
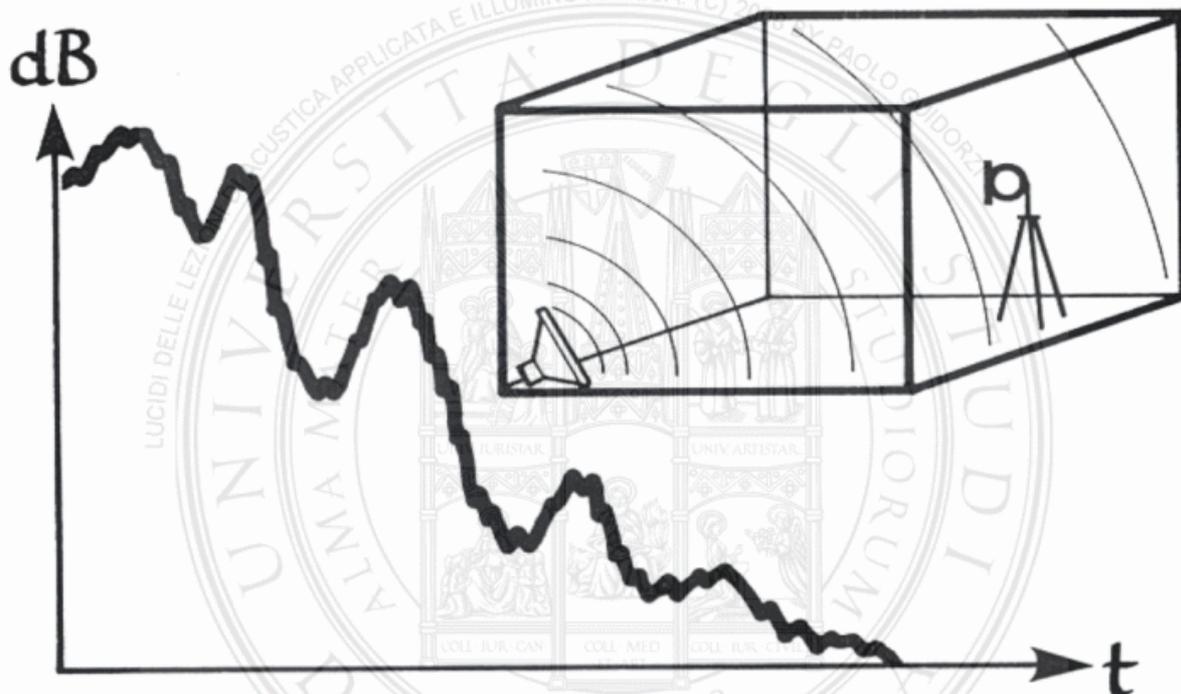
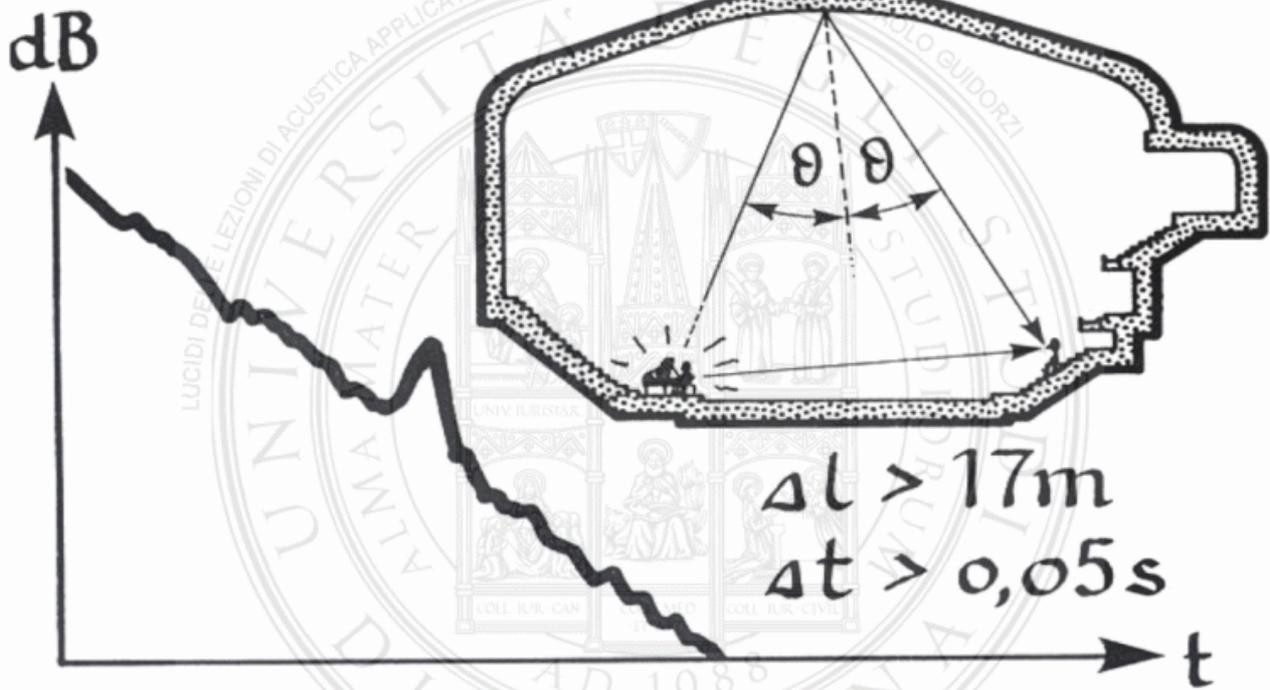


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



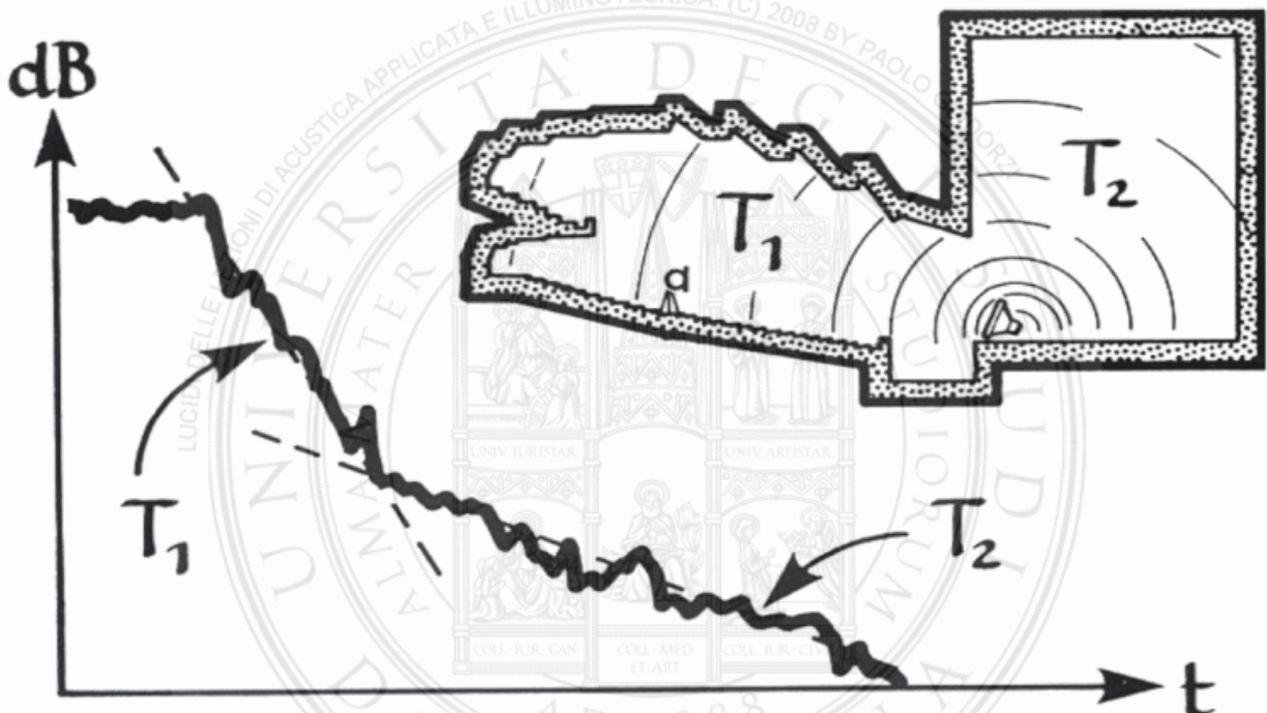
In questo esempio si ha un decadimento non lineare dovuto alla presenza di onde stazionarie, le quali si creano a causa delle pareti piane e parallele dell'ambiente.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær



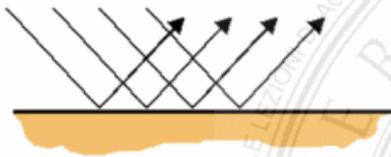
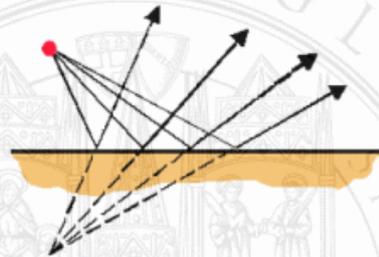
In questo esempio si hanno fenomeni di focalizzazione.

Image Courtesy of Brüel & Kjær

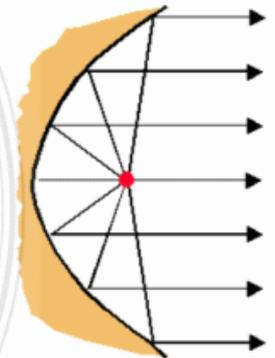


In questo esempio si hanno due ambienti separati, parzialmente accoppiati, e di conseguenza due diversi tratti di decadimento, a diverse pendenze.

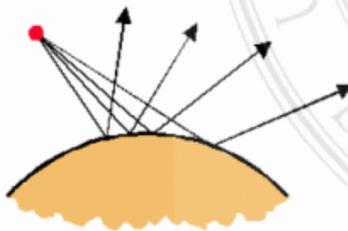
Image Courtesy of Brüel & Kjær

Riflessione di raggi paralleli  
(sorgente estesa o lontana)Riflessione da sorgente  
puntiforme (sorgente virtuale)

Focalizzazione



Diffusione per effetto geometrico



Concentrazione

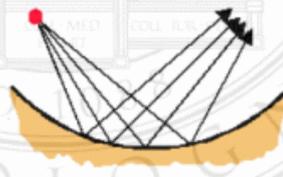


Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

**IL TEMPO DI RIVERBERAZIONE**

Andiamo ora a valutare analiticamente il fenomeno del decadimento sonoro, a partire dalla grandezza **densità sonora  $D$** .

In generale  $D$  è funzione anche della posizione, ma ipotizziamo che il **campo sonoro sia perfettamente diffuso nell'ambiente**, e quindi si possa considerare  $D(t)$ , solo funzione del tempo.

Inoltre, visto che un raggio sonoro può intraprendere infiniti percorsi per andare da una parete all'altra, facciamo un'ipotesi che deriva dall'analisi statistica: utilizziamo il **libero cammino medio** di un'onda (ovvero la lunghezza media tra 2 successive incidenze dell'onda sulle pareti), che risulta

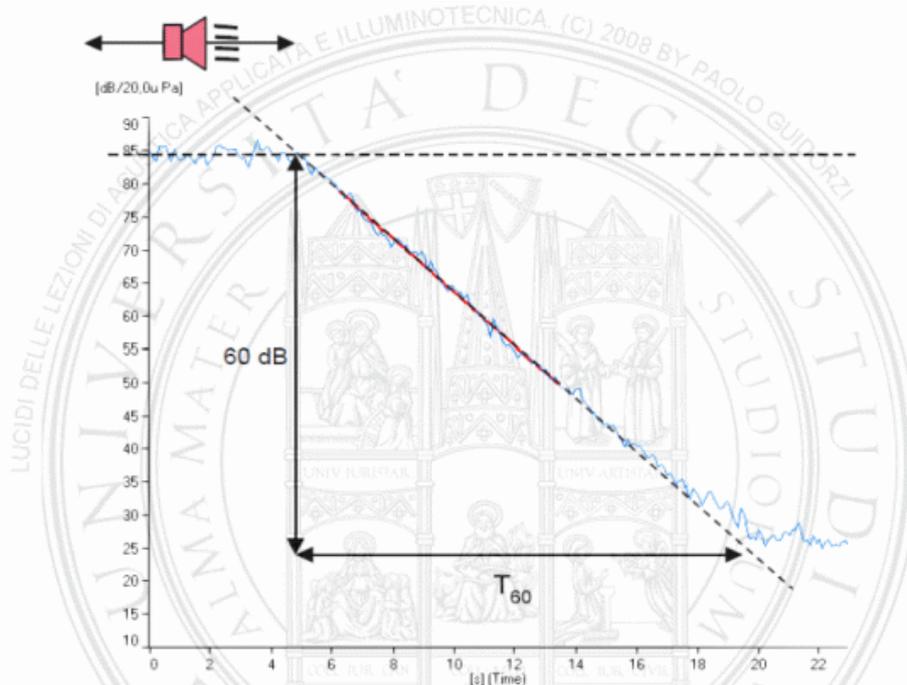
$$\text{essere: } \bar{l} = \frac{4 \cdot V}{S}$$

dove  $V$  è il volume dell'ambiente e  $S$  la superficie complessiva delle pareti.

Il **tempo** che un'onda impiega a percorrere il libero cammino medio vale:  $\bar{t} = \frac{\bar{l}}{c} = \frac{4 \cdot V}{S \cdot c}$

L'inverso del tempo necessario all'onda a percorrere il libero cammino medio è il numero medio di volte (la **frequenza**) in cui l'onda acustica viene riflessa nell'unità di tempo:  $n = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}$

Ipotizziamo anche che l'**assorbimento sia un fenomeno continuo** (in realtà è discreto, manifestandosi ad ogni riflessione).



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.

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

In un tempo infinitesimo  $dt$ , all'interno dell'ambiente si ha che la **variazione di energia acustica dovuta al campo riverberante**  $dE$  è uguale alla differenza tra l'energia emessa dalla sorgente e

quella assorbita dalle pareti:  $dE = dE_{emessa} - dE_{assorbita}$

Data l'ipotesi di campo uniforme, possiamo scrivere:  $dE = V \frac{dD}{dt} dt$

L'energia emessa dalla sorgente vale:  $dE_{emessa} = W \cdot dt$

L'energia assorbita dalle pareti, considerando una potenza acustica incidente  $W_{incidente}$  e un coefficiente di assorbimento medio  $\bar{\alpha}$ , vale:  $dE_{assorbita} = \bar{\alpha} \cdot W_{incidente} \cdot dt$

La **potenza incidente** si può calcolare considerando l'energia complessivamente contenuta nell'ambiente moltiplicata per il numero medio di riflessioni:  $W_{incidente} = \bar{n} \cdot D \cdot V = \frac{S \cdot c \cdot D}{4}$

da cui si ricava:  $dE_{assorbita} = \frac{A \cdot c \cdot D}{4} dt$  avendo posto  $A = \bar{\alpha} \cdot S$  l'assorbimento acustico globale dell'ambiente.

Riscriviamo il bilancio energetico:

$$dE = dE_{emessa} - dE_{assorbita} \Rightarrow V \frac{dD}{dt} dt = W \cdot dt - \frac{A \cdot c \cdot D}{4} dt$$

A regime, quando cioè non si ha più variazione di energia acustica nell'ambiente, il primo termine si annulla poiché  $dD/dt = 0$ .

Si può quindi ricavare la **densità acustica dovuta al solo campo riverberante (\*)**:  $D_{riv} = \frac{4 \cdot W}{A \cdot c}$

Il contributo dovuto al **campo diretto** (ricordando che  $D = I/c$ ) vale:  $D_{dir} = \frac{W}{4\pi d^2 c}$

Quindi la densità acustica totale vale:

$$D = D_{dir} + D_{riv} = \frac{W}{4\pi d^2 c} + \frac{4 \cdot W}{A \cdot c} = \frac{W}{c} \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

(\*) questo valore della densità acustica del campo riverberante verrà rivisto più avanti.

Per passare ai dB moltiplichiamo e dividiamo entrambi i membri per il fattore di normalizzazione della densità sonora:

$$\frac{D}{D_0} = \frac{W}{D_0 c} \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right) \frac{W_0}{W_0}$$

$$L_D = 10 \log \left[ \frac{W}{D_0 c} \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right) \frac{W_0}{W_0} \right]$$

$$L_D = 10 \log \frac{W}{W_0} + 10 \log \frac{W_0}{D_0 c} + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

→ 0

$$L_D = 10 \log \frac{D}{D_0} \quad D_0 = 3 \cdot 10^{-15} \frac{J}{m^3}$$

Quindi:

$$L_D = L_W + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (\text{dB})$$

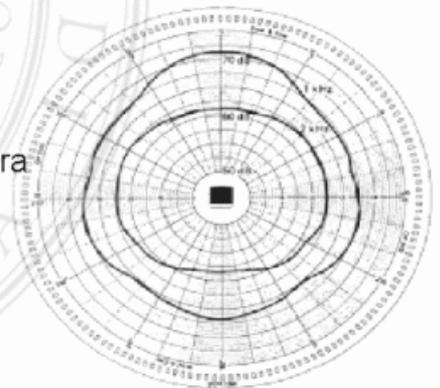
Questa relazione, comprende sia il termine relativo al **campo diretto** (che cala con l'inverso della distanza dalla sorgente) che il termine relativo al **campo riverberante**, che non varia data l'ipotesi di campo diffuso.

Il precedente ragionamento è stato fatto nell'ipotesi di sorgente omnidirezionale. Nel caso di **sorgente avente una certa direttività Q**, la formula diventa semplicemente:

$$L_D = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

La **direttività Q** di una sorgente, nella direzione  $\vartheta$ , è data dal rapporto tra l'intensità emessa in quella direzione e l'intensità media emessa.

$$Q = \frac{I_\vartheta}{I_{\text{media}}}$$

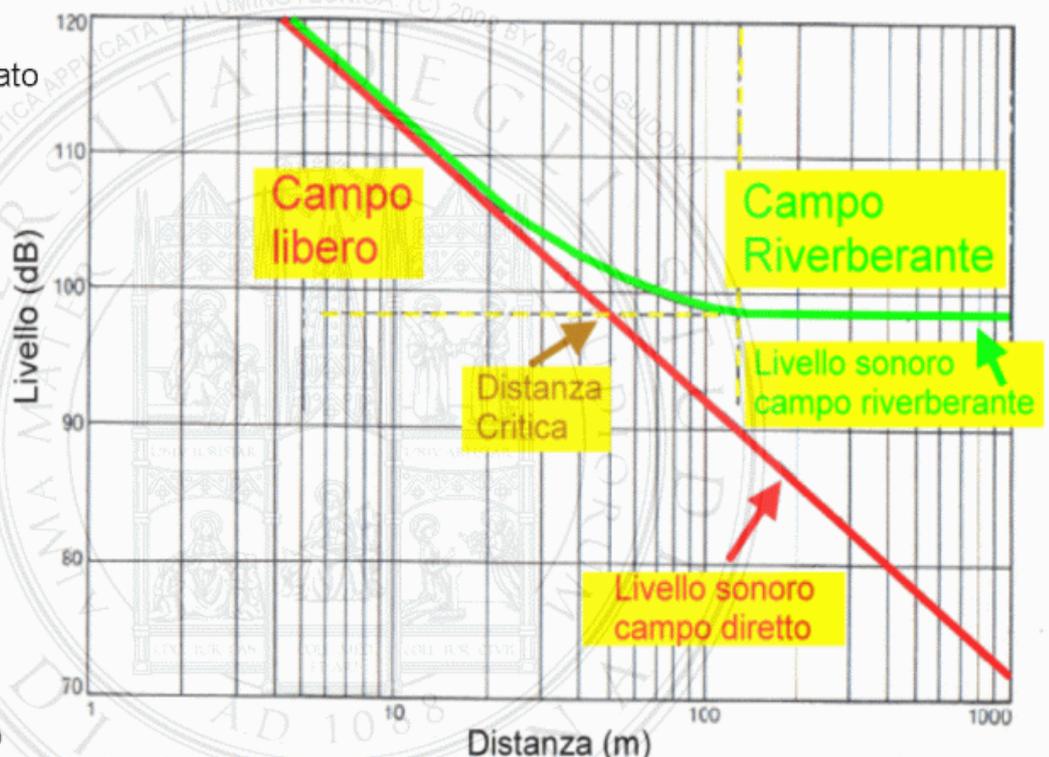


Questo grafico (linea verde) mostra il **livello del campo semi-riverberante**  $L_D$ , generato per valori fissati di volume, superficie e assorbimento di un certo ambiente.

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.



**LA DISTANZA CRITICA**

La distanza critica si ricava uguagliando i due termini di campo riverberante e diretto:

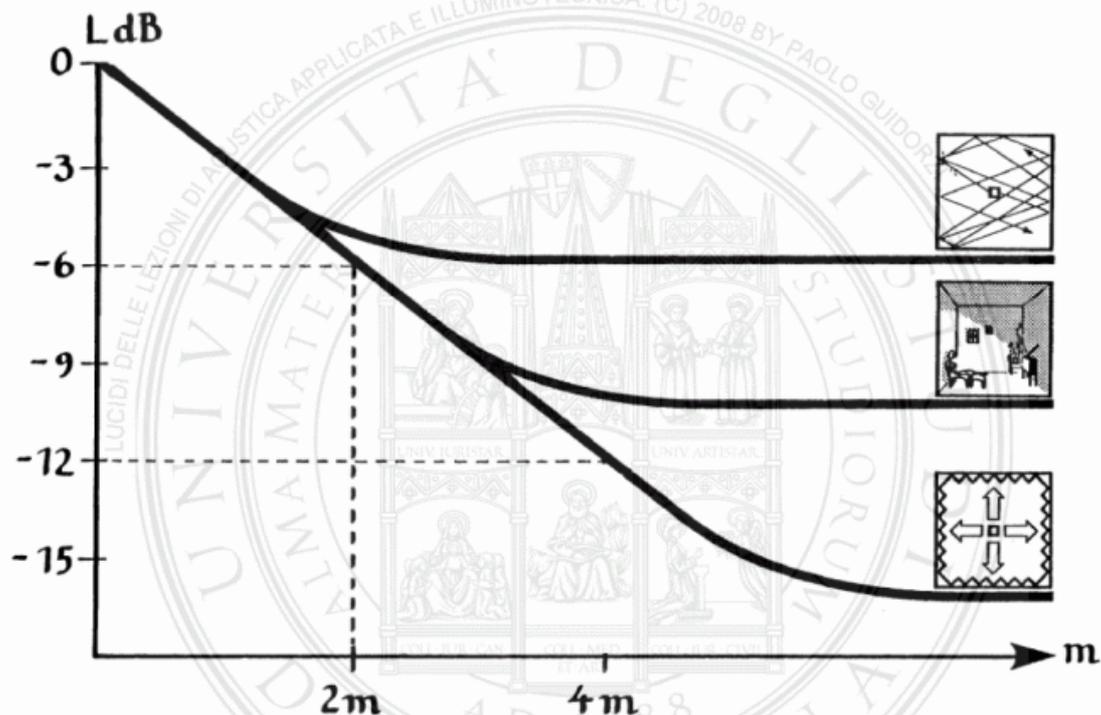
$$L_D = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$



$$L_{D,riverberante} = L_W + 10 \log \left( \frac{4}{A} \right)$$

$$L_{D,diretto} = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} \right)$$

$$L_W + \frac{Q}{4\pi d^2} = L_W + \frac{4}{A} \Rightarrow d_{critica} = \sqrt{\frac{QA}{16\pi}}$$



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.

## LA FORMULA DI SABINE

Studiamo ora l'andamento del transitorio di estinzione e calcoliamo il **Tempo di Riverberazione**, ovvero il tempo impiegato dal livello del campo semi-riverberante a decadere di 60 dB o il tempo impiegato dalla densità sonora a decadere di  $10^6$  volte, una volta che la sorgente è stata spenta.

Riprendiamo il bilancio dell'energia sonora:

$$dE = dE_{emessa} - dE_{assorbita} \Rightarrow V \frac{dD}{dt} dt = W \cdot dt - \frac{A \cdot c \cdot D}{4} dt$$

e poniamo a zero la potenza emessa:  $V \frac{dD}{dt} = -\frac{A \cdot c \cdot D}{4}$

Separiamo le variabili e integriamo:  $\frac{dD}{D} = -\frac{A \cdot c}{4 \cdot V} dt$

$$\ln D = -\frac{A \cdot c}{4 \cdot V} t + K$$

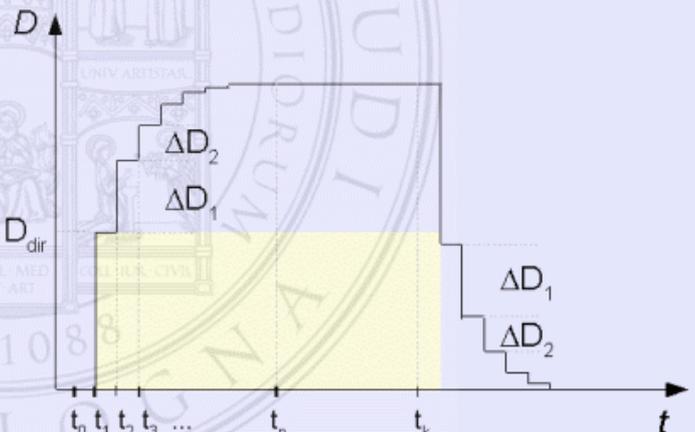
$$t = 0 \Rightarrow D = D_{riv} \Rightarrow K = \ln D_{riv}$$

Quindi, risolvendo:  $\ln \frac{D}{D_{riv}} = -\frac{A \cdot c}{4 \cdot V} t$

si ottiene l'andamento del **transitorio di estinzione**:  $D = D_{riv} \cdot e^{-\frac{A \cdot c}{4 \cdot V} t}$

Visto che l'andamento del **transitorio di attacco** è uguale e contrario a quello di estinzione, esso avrà

andamento:  $D = D_{riv} \cdot \left(1 - e^{-\frac{A \cdot c}{4 \cdot V} t}\right)$



Per calcolare il tempo di riverberazione  $T_{60}$  poniamo  $D$  al valore finale  $D_{riv} \cdot 10^{-6}$ :

$$\ln \frac{D}{D_{riv}} = -\frac{A \cdot c}{4 \cdot V} t \Rightarrow \ln \frac{10^{-6} D_{riv}}{D_{riv}} = -\frac{A \cdot c}{4 \cdot V} T_{60}$$

$$T_{60} = -\frac{4 \cdot V}{A \cdot c} \ln(10^{-6})$$

## FORMULA DI SABINE

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

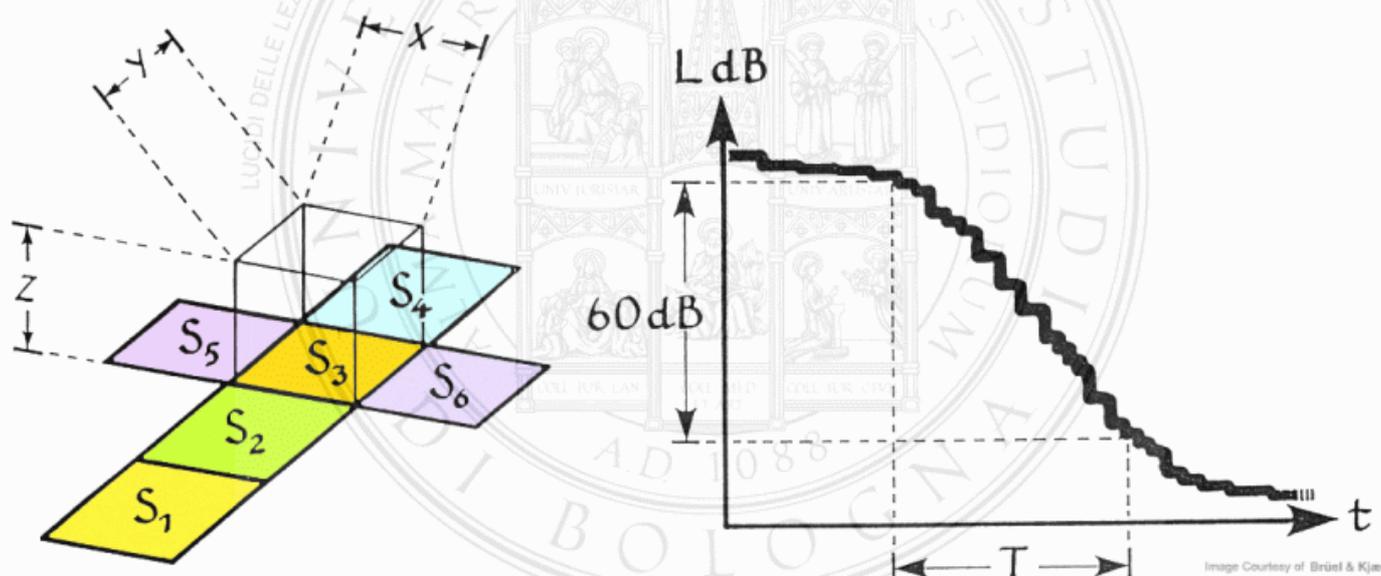
**NOTA:** la costante 0,163 non è adimensionale!

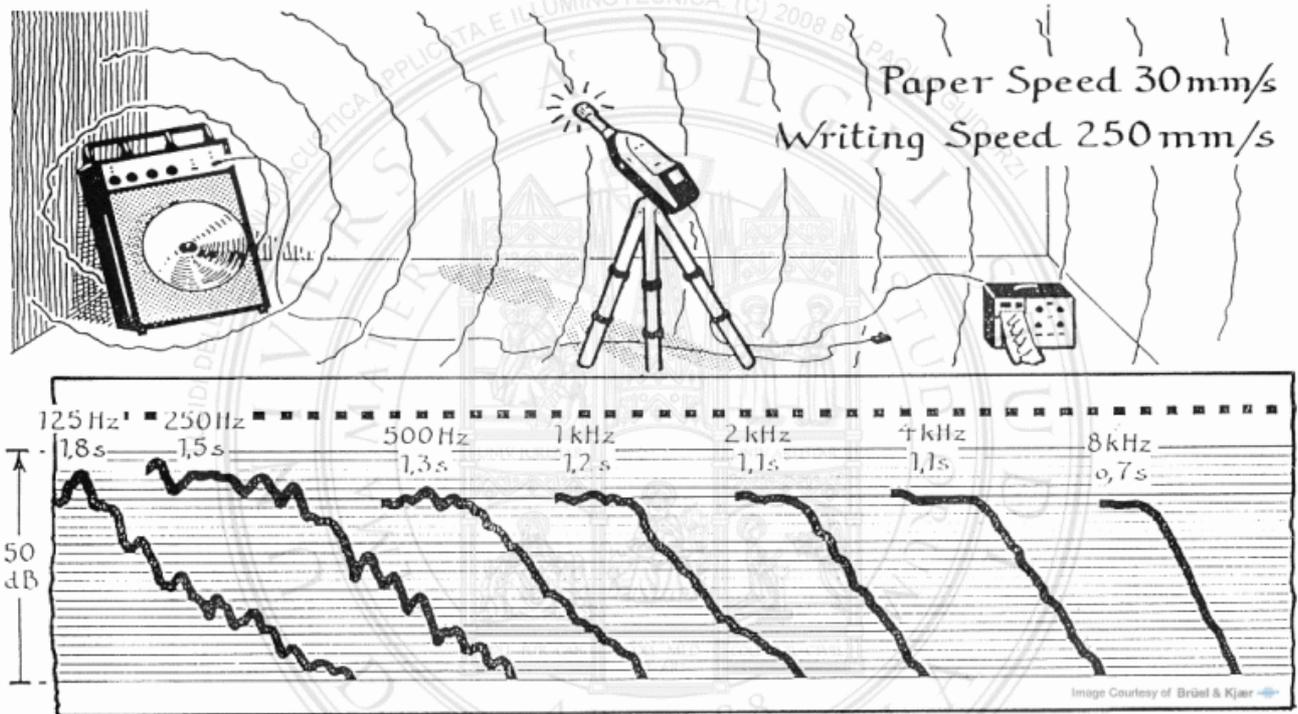
$$V = X \cdot Y \cdot Z$$

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

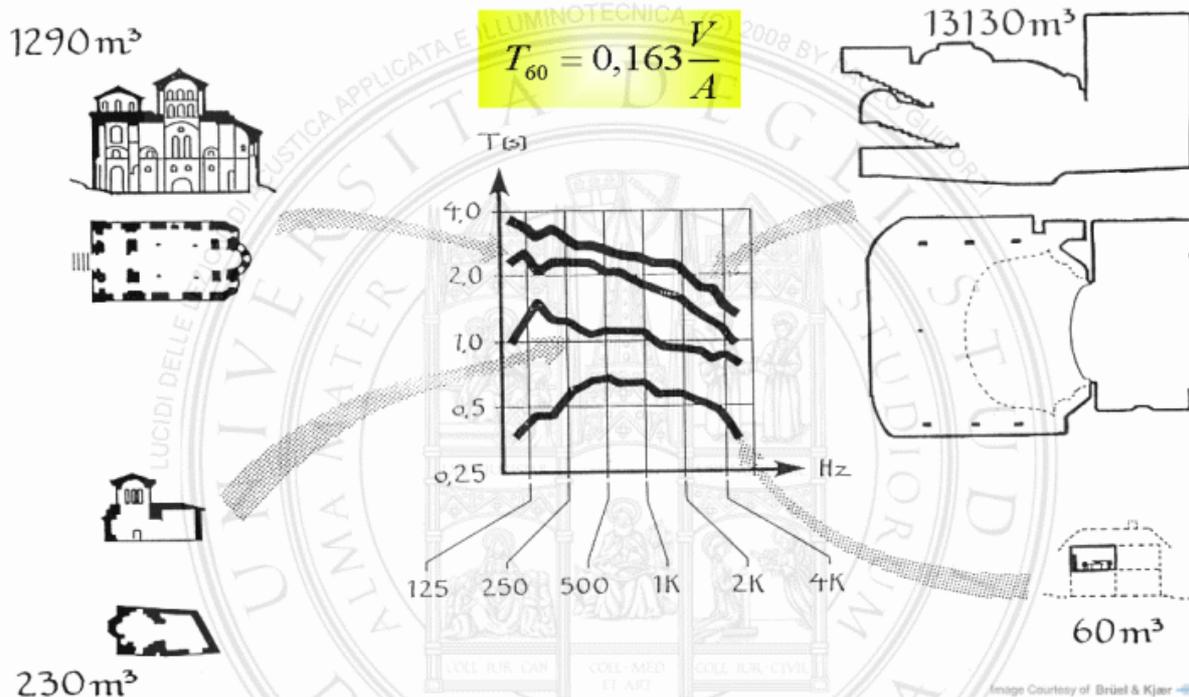
Sabine

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



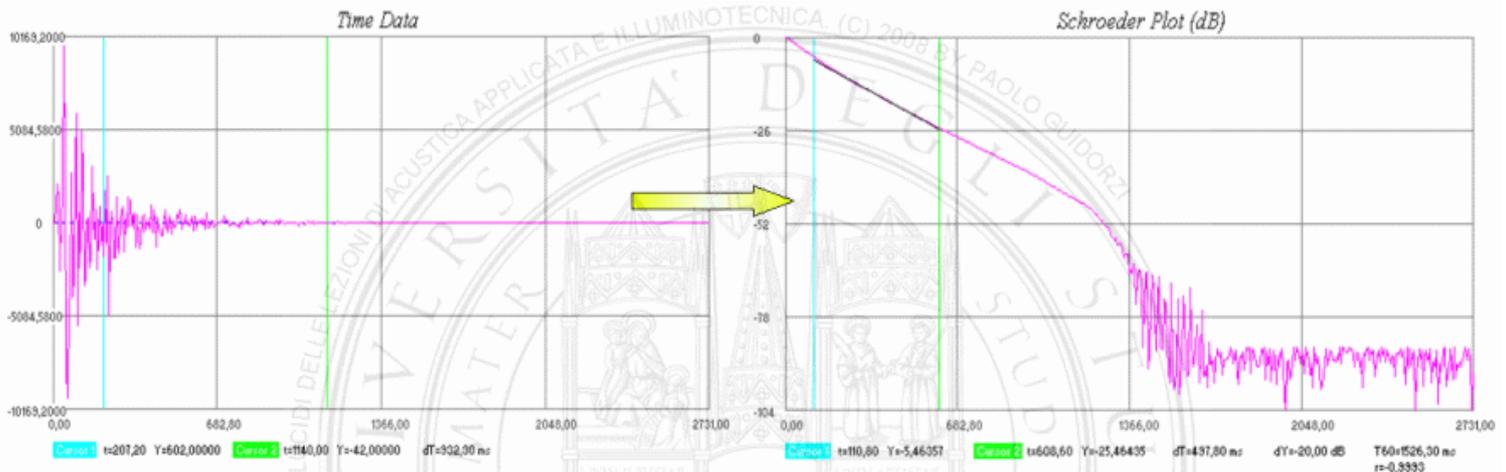


Il tempo di riverberazione varia **frequenza per frequenza**. In figura è mostrato l'andamento della coda sonora filtrato in bande d'ottava. La figura si riferisce agli *antichi* strumenti di misura che misuravano il tempo di decadimento per via analogica mentre oggi questa misura è effettuata per via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



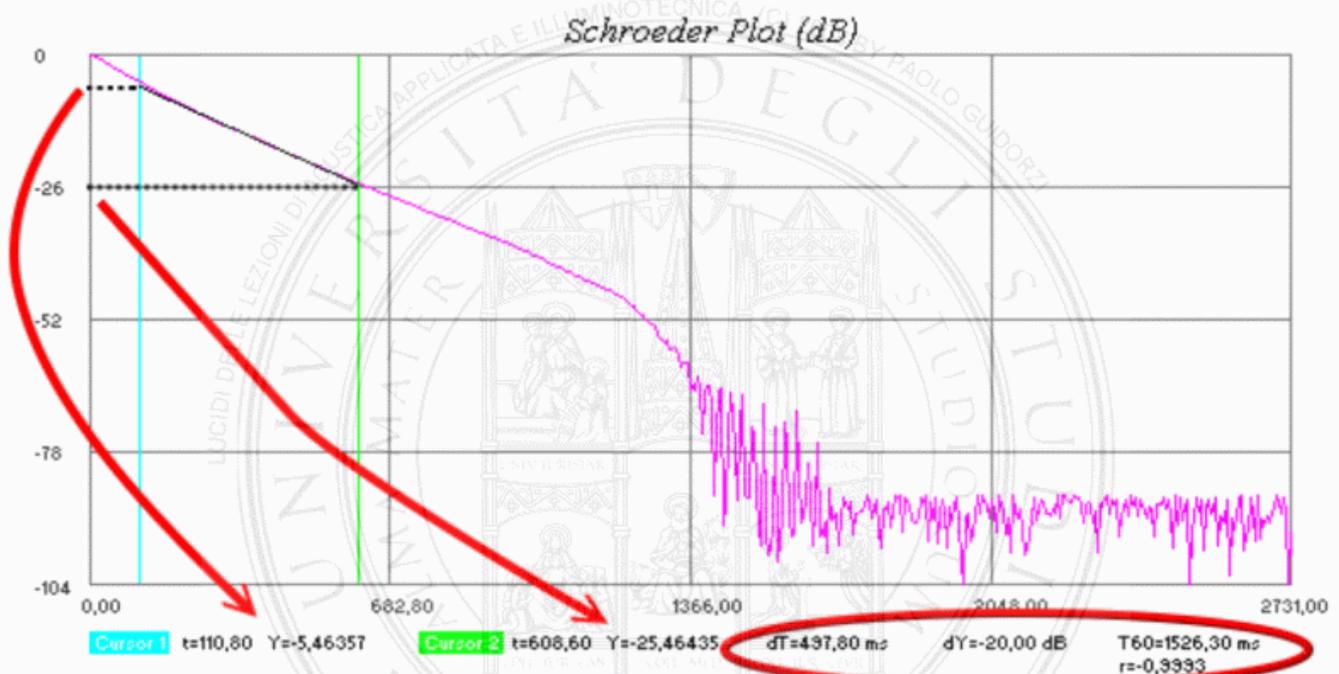
**Esempi di valore del tempo di riverberazione, per vari ambienti, in bande di ottava.**

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.

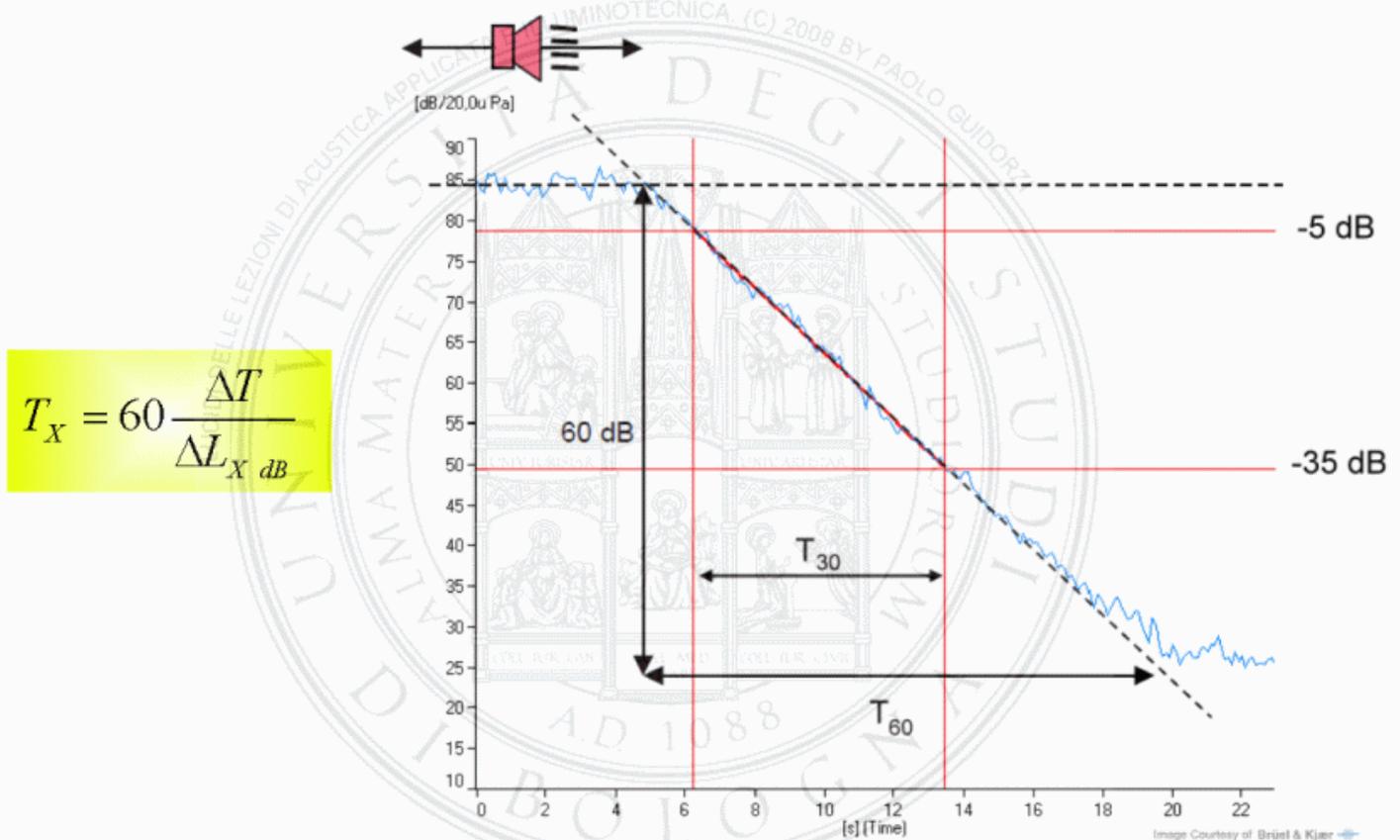


Con opportune operazioni matematiche (la cosiddetta “integrazione inversa”) è possibile ricavare la curva di decadimento di un certo ambiente chiuso dalla misura della sua risposta impulsiva. La curva di decadimento così ottenuta si chiama **curva di Schroeder**.

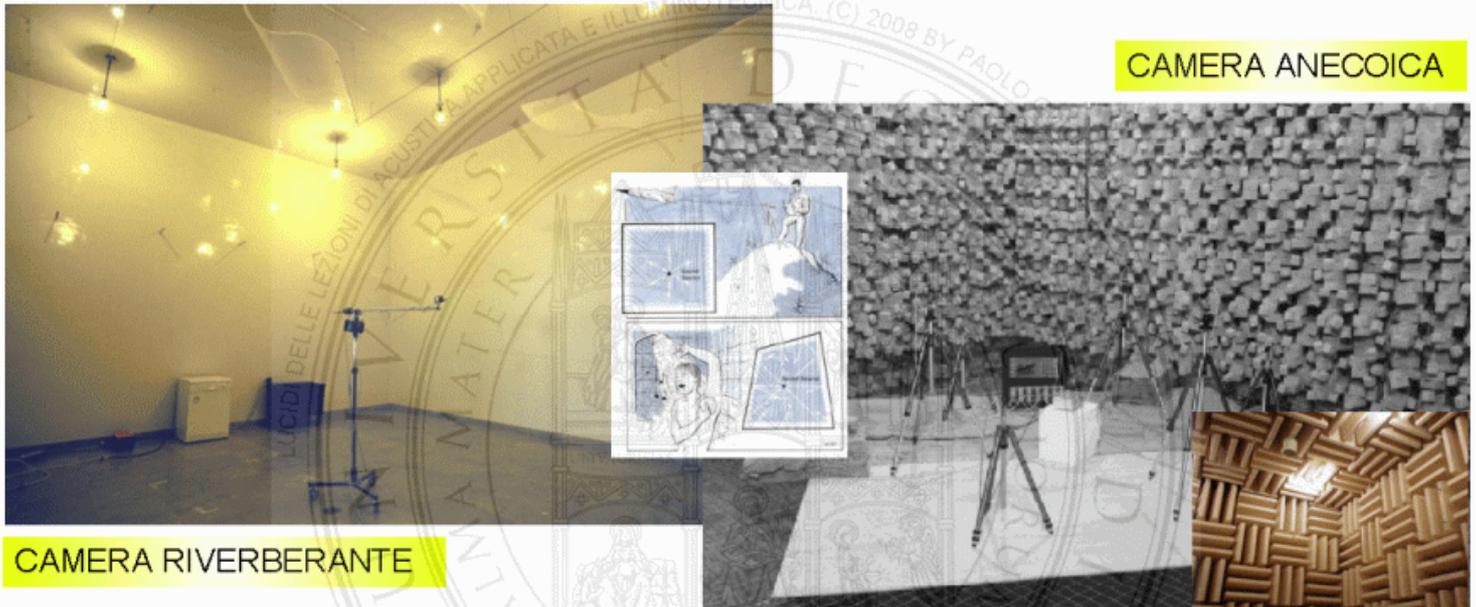
Quando si calcola il tempo di riverberazione  $T_{60}$  dalla curva di Schroeder (ma anche con il metodo del rumore stazionario interrotto), si può utilizzare un intervallo dinamico arbitrario. A volte si è obbligati a fare questo perchè la coda sonora presenta un decadimento quasi lineare che copre un intervallo dinamico minore di 60 dB. Questo può accadere per vari motivi, come ad esempio la presenza di rumore di fondo o il metodo di misurazione utilizzato.



Il calcolo del tempo di riverberazione su un intervallo di decadimento arbitrario va però sempre rapportato a un decadimento di 60 dB. Quindi se ad esempio si misura su un intervallo dinamico di 20 dB, il tempo trovato andrà moltiplicato per 3 per trovare il tempo di riverberazione. In questo caso si indica il tempo di riverberazione “ $T_{20}$ ” per evidenziare il fatto che l'intervallo utilizzato è 20 dB.



$$T_X = 60 \frac{\Delta T}{\Delta L_X \text{ dB}}$$



Nasce ora un problema: l'applicazione della formula di Sabine non funziona in un ambiente anecoico! Anecoico infatti significa assenza di riverberazione, quindi  $T_{60}$  dovrebbe valere 0.

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{\alpha \cdot S} = 0,163 \frac{V}{A} \quad T_{60} \xrightarrow{\alpha \rightarrow 1} 0,163 \frac{V}{S} \neq 0$$

**LA FORMULA DI EYRING**

Quindi la teoria di Sabine non funziona in ambienti molto assorbenti.

Per ovviare a questo problema, Eyring ha sviluppato una nuova teoria, simile nelle premesse a quella di Sabine, ma con un'ipotesi differente: gli urti non avvengano in modo continuo e in intervalli di tempo infinitesimi, ma solo negli istanti in cui le onde sono riflesse dalle pareti. In questo modo tra una riflessione e un'altra tra le pareti ci sono intervalli di tempo in cui non avviene assorbimento.

Una volta spenta la sorgente, la densità sonora nell'ambiente sarà:  $D_1 = D_{riv} (1 - \bar{\alpha})$

dopo 2 riflessioni:  $D_2 = D_1 (1 - \bar{\alpha}) = D_{riv} (1 - \bar{\alpha})^2$

dopo n riflessioni:  $D_n = D_{riv} (1 - \bar{\alpha})^n$

Il tempo medio tra 2 riflessioni successive corrisponde al tempo libero medio  $\bar{t}$

Il tempo trascorso dallo spegnimento della sorgente vale:  $t = n \cdot \bar{t} \Rightarrow n = \frac{t}{\bar{t}} = \frac{S \cdot c}{4 \cdot V} t$

Trovato n al tempo t, sostituendo:  $D_n = D_{riv} (1 - \bar{\alpha})^n \Rightarrow D = D_{riv} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{S \cdot c}{4 \cdot V} t}$

Scrivendo in questo modo questo termine  $(1 - \bar{\alpha}) = e^{\ln(1 - \bar{\alpha})}$

$$D = D_{riv} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{S \cdot c}{4 \cdot V} t} \longrightarrow D = D_{riv} \cdot e^{-\frac{S \cdot c}{4 \cdot V} [-\ln(1 - \bar{\alpha})] t}$$

Come per la formula di Sabine, per trovare  $T_{60}$  poniamo D al valore finale  $D_{riv} \cdot 10^{-6}$ :

$$\frac{10^{-6} \cdot D_{riv}}{D_{riv}} = e^{-\frac{S \cdot c}{4 \cdot V} [-\ln(1 - \bar{\alpha})] \cdot T_{60}}$$

$$\ln \left[ \frac{10^{-6} \cdot D_{riv}}{D_{riv}} \right] = -\frac{S \cdot c}{4 \cdot V} [-\ln(1 - \bar{\alpha})] \cdot T_{60}$$

$$T_{60} = -\frac{4 \cdot V}{S \cdot c} \frac{\ln 10^{-6}}{[-\ln(1 - \bar{\alpha})]}$$

## FORMULA DI EYRING

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{S \cdot [-\ln(1 - \bar{\alpha})]}$$

In questo caso se il coefficiente di assorbimento medio tende a 1 la formula funziona:

$$T_{60} \xrightarrow{\bar{\alpha} \rightarrow 1} 0 \quad \text{OK!}$$

Inoltre si può vedere che scomponendo in serie di Taylor il termine logaritmico, la formula di Eyring in prima approssimazione risulta uguale alla formula di Sabine:

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{S \cdot [-\ln(1 - \bar{\alpha})]} = 0,163 \frac{V}{S \left( \bar{\alpha} + \frac{\bar{\alpha}^2}{2} + \frac{\bar{\alpha}^3}{3} + \dots \right)}$$

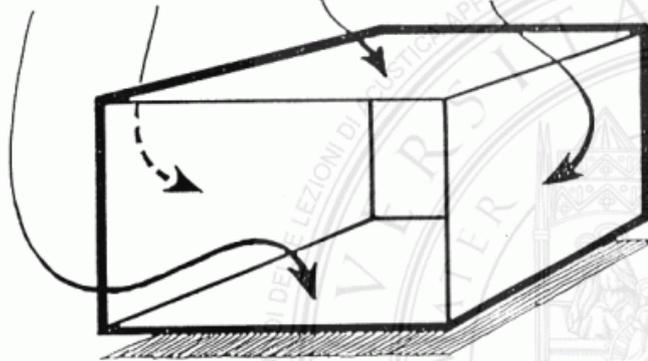
## LA FORMULA DI MILLINGTON-SETTE

Nel caso che si abbiano coefficienti di assorbimento diversi sulle diverse pareti:

## FORMULA DI MILLINGTON-SETTE

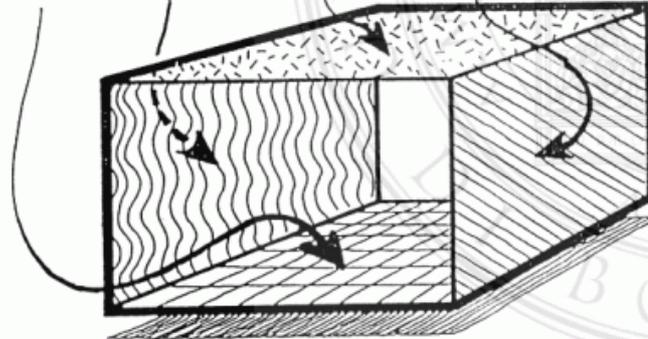
$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i)}$$

Utilizzando questa formula, nessun coefficiente di assorbimento di nessuna superficie deve tendere a 1 altrimenti il tempo di riverberazione calcolato risulta nullo!

$\alpha_1 \cong \alpha_2 \cong \alpha_3 \cong \alpha_4 \dots$  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 &amp; Sette

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

Image Courtesy of Brüel &amp; Kjær

## CORREZIONE PER L'ASSORBIMENTO DELL'ARIA

Le precedenti formule sono state calcolate con l'ipotesi che l'aria non assorba il suono. Questa è un'approssimazione e se si vuole tener conto anche dell'assorbimento dell'aria, occorre aggiungere un termine correttivo. Ad esempio per la formula di Sabine, si ottiene:

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{\alpha S + 4\beta V}$$

L'assorbimento dell'aria dipende dalla frequenza e dall'umidità ed è particolarmente elevato alle alte frequenze.

Torniamo alla formula vista precedentemente, che fornisce il livello di densità sonora in un campo semi-riverberante:

$$L_D = L_W + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

$$A = \bar{\alpha} \cdot S$$

Ricordando che, grazie ai valori di riferimento assunti, il **Livello di Densità sonora**  $L_D$  e il **Livello di Pressione**  $L_p$  assumono valori molto simili (esattamente gli stessi nel caso di onde piane, mezzo in quiete non viscoso e impedenza dell'aria 400 rayl), si può scrivere, con buona approssimazione la formula precedente in termini di Livello di Pressione:

$$L_p = L_W + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

## IL CAMPO RIVERBERANTE

La sola parte relativa al campo riverberante vale (come già visto):  $L_p = L_W + 10 \log \left( \frac{4}{A} \right)$

e può essere riscritta come:  $L_p = L_W - 10 \log A + 6$  (dB)

Vale indipendentemente dalla posizione nella stanza.

Variando l'assorbimento dell'ambiente, varia anche il livello di pressione misurato:

$$A_1 \rightarrow A_2 \Rightarrow \Delta L = L_2 - L_1 = 10 \log \frac{A_1}{A_2} \quad (\text{dB})$$

## IL CAMPO SEMI-RIVERBERANTE

La formula relativa al campo semi-riverberante, considerando una sorgente direttiva, vale (come già visto):

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

ma solitamente, nella pratica, si schematizza il campo semi-riverberante in un modo leggermente diverso, ovvero come sovrapposizione di un campo libero a cui si attribuisce la potenza della sorgente, e di un campo riverberante a cui si attribuisce una frazione di potenza pari a quella risultante dopo la prima riflessione sulle pareti. Il campo riverberante quindi non viene alimentato dalla sorgente direttamente, ma dalla prima riflessione.

Quindi la potenza in gioco per il campo riverberante risulta:  $W(1 - \bar{\alpha})$

La densità acustica dovuta al solo campo riverberante sarà allora:  $D_{riv} = \frac{4 \cdot W}{A \cdot c} (1 - \bar{\alpha})$

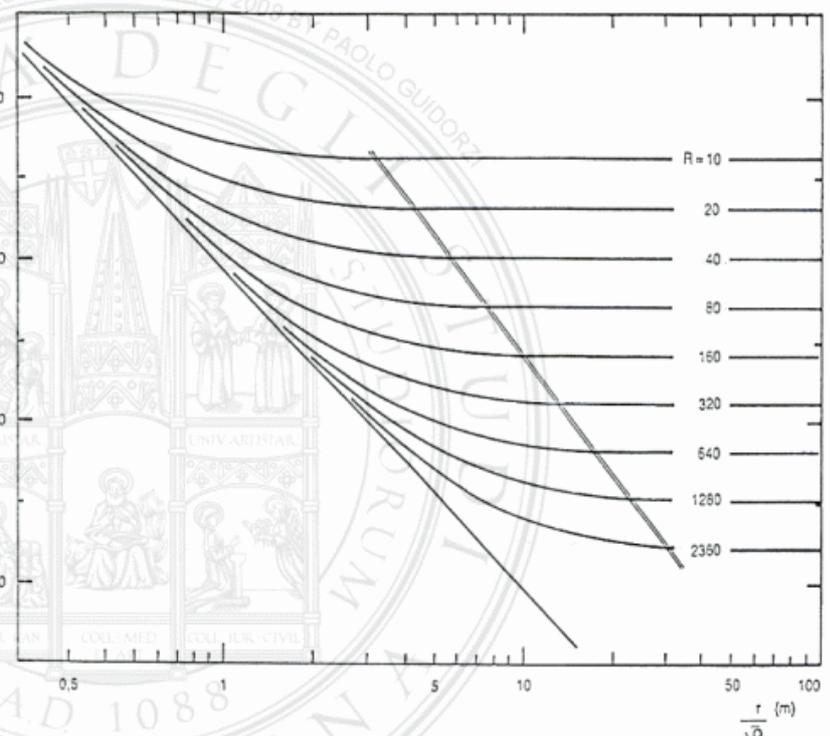
Senza ripetere tutta la dimostrazione, la formula del **campo semi-riverberante** risulta allora:

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right)$$

definendo la **costante dell'ambiente**:

$$R = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}}$$

Va detto comunque che in un ambiente riverberante il coefficiente di assorbimento medio è molto basso e quindi  $R \approx A$ . In letteratura, nel secondo termine della formula riguardante il campo semi-riverberante si può trovare sia  $A$  che  $R$ . I valori risultanti sono simili.



In figura è mostrata l'attenuazione del campo sonoro, allontanandosi da una sorgente (distanza  $r$ ), in campo semi-riverberante, per diversi valori di  $R$  e della direttività  $Q$  della sorgente.

## LA QUALITA' DELLE SALE

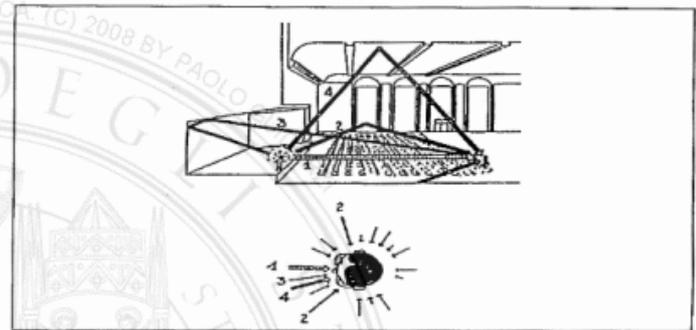
- La risposta impulsiva di un ambiente chiuso fornisce tutte le informazioni necessarie allo studio della qualità dell'ambiente stesso

- 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

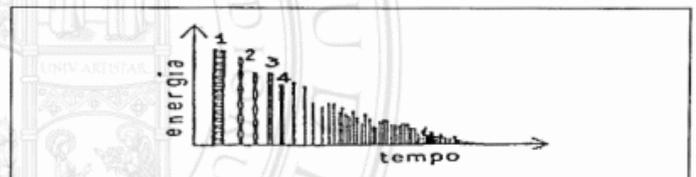
- La misura consiste nell'eccitazione dell'intero ambiente chiuso con un opportuno segnale, e la sua registrazione in una determinata posizione. L'ambiente agisce quindi come filtro del segnale emesso.

- 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.



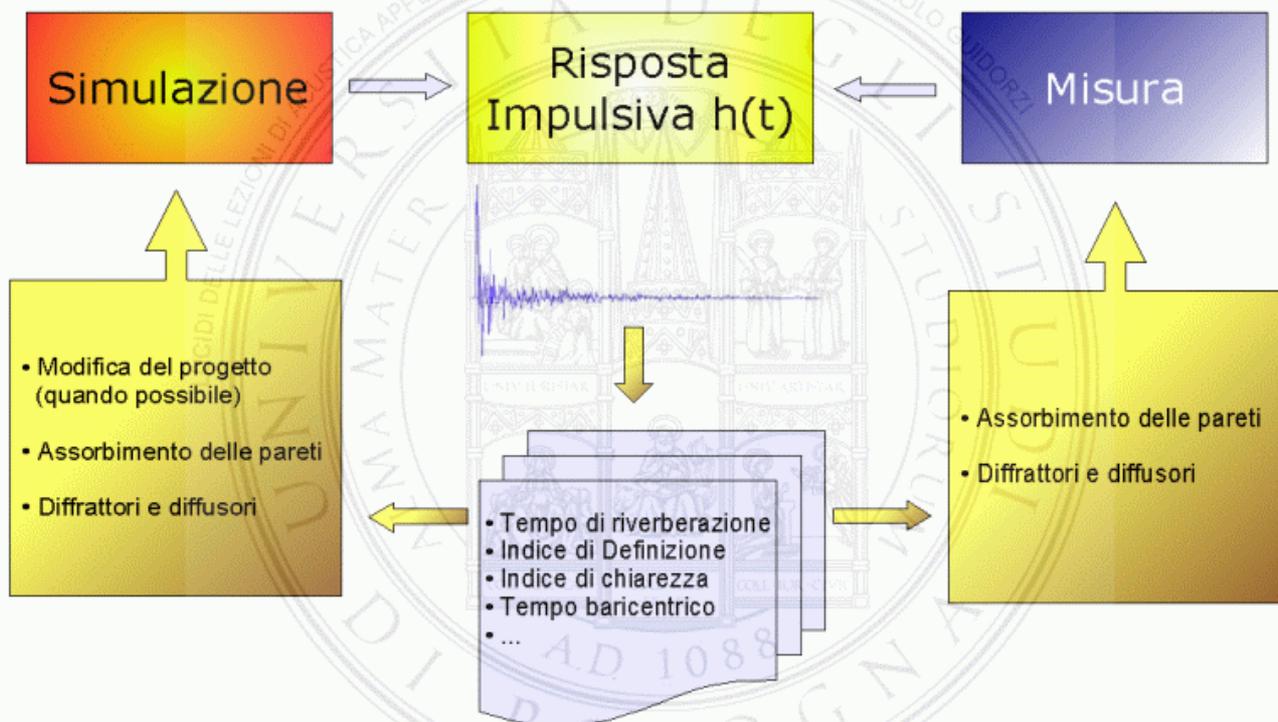
Raggi sonori in una sala e distribuzione direzionale dell'energia.

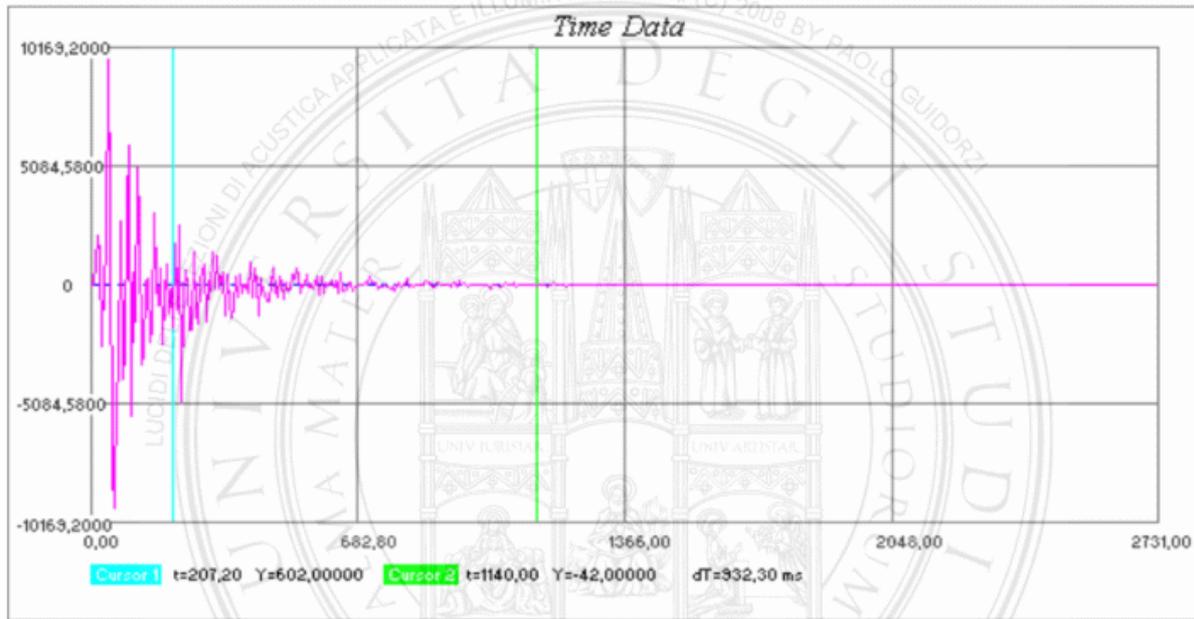


Ecogramma energetico nella posizione dell'ascoltatore.

Fase di progettazione

Correzione sale esistenti





- Il primo picco corrisponde all'onda diretta (o comunque al cammino più breve tra sorgente e ricevitore)
- Il secondo picco corrisponde alla riflessione di primo ordine, il terzo picco alla riflessione di secondo ordine e così via
- Sia  $p(t)$  la funzione che descrive la risposta impulsiva di un ambiente chiuso

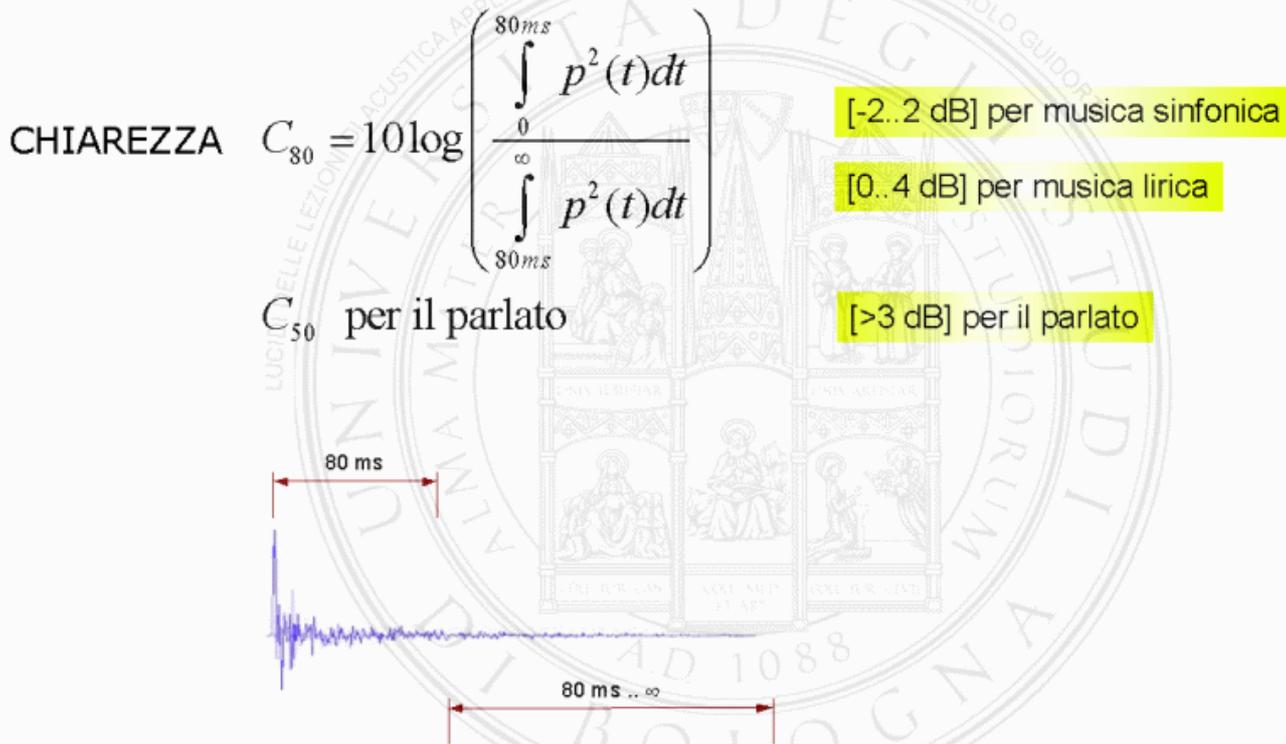
## PARAMETRI ACUSTICI (ISO 3382)

DEFINIZIONE

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

[0,34] per sala da concerto

$$R = 10 \log \left( \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50ms} p^2(t) dt} \right) = 10 \log \frac{1-D}{D}$$



Tempo Baricentrico  $t_s = \left( \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right)$

[ <=140 ms ]

Early Decay Time

 $T_{10}$ 

[1,8 .. 2,6 sec]

Tempo di riverberazione

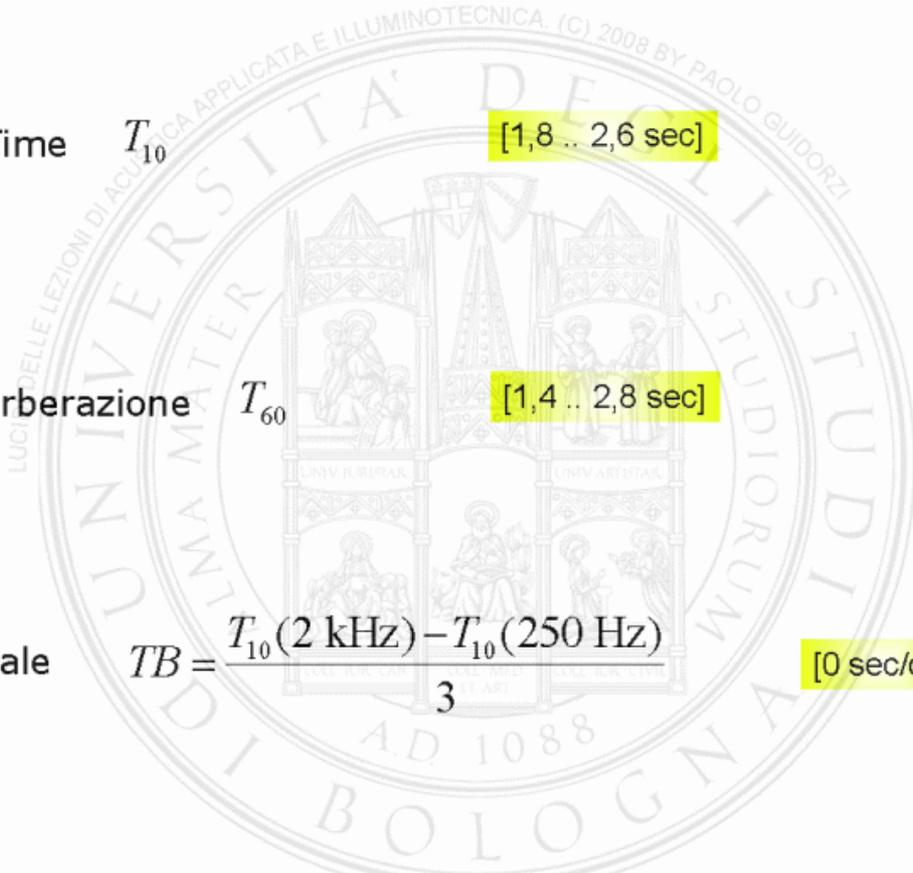
 $T_{60}$ 

[1,4 .. 2,8 sec]

Equilibrio Tonale

$$TB = \frac{T_{10}(2 \text{ kHz}) - T_{10}(250 \text{ Hz})}{3}$$

[0 sec/ott]



Parametri spaziali. Se i suoni provengono lateralmente con un ritardo minore di 80-100 msec si ha un'impressione di ampiezza della scena sonora maggiore del reale.

Lateral Fraction

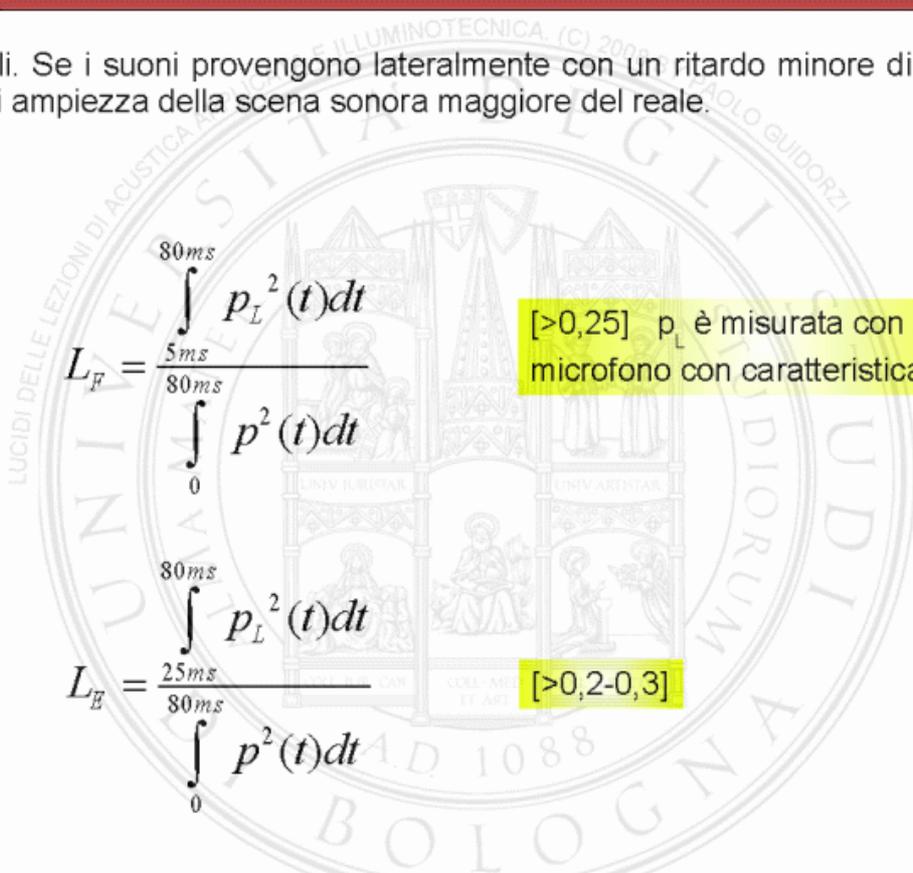
$$L_F = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$$

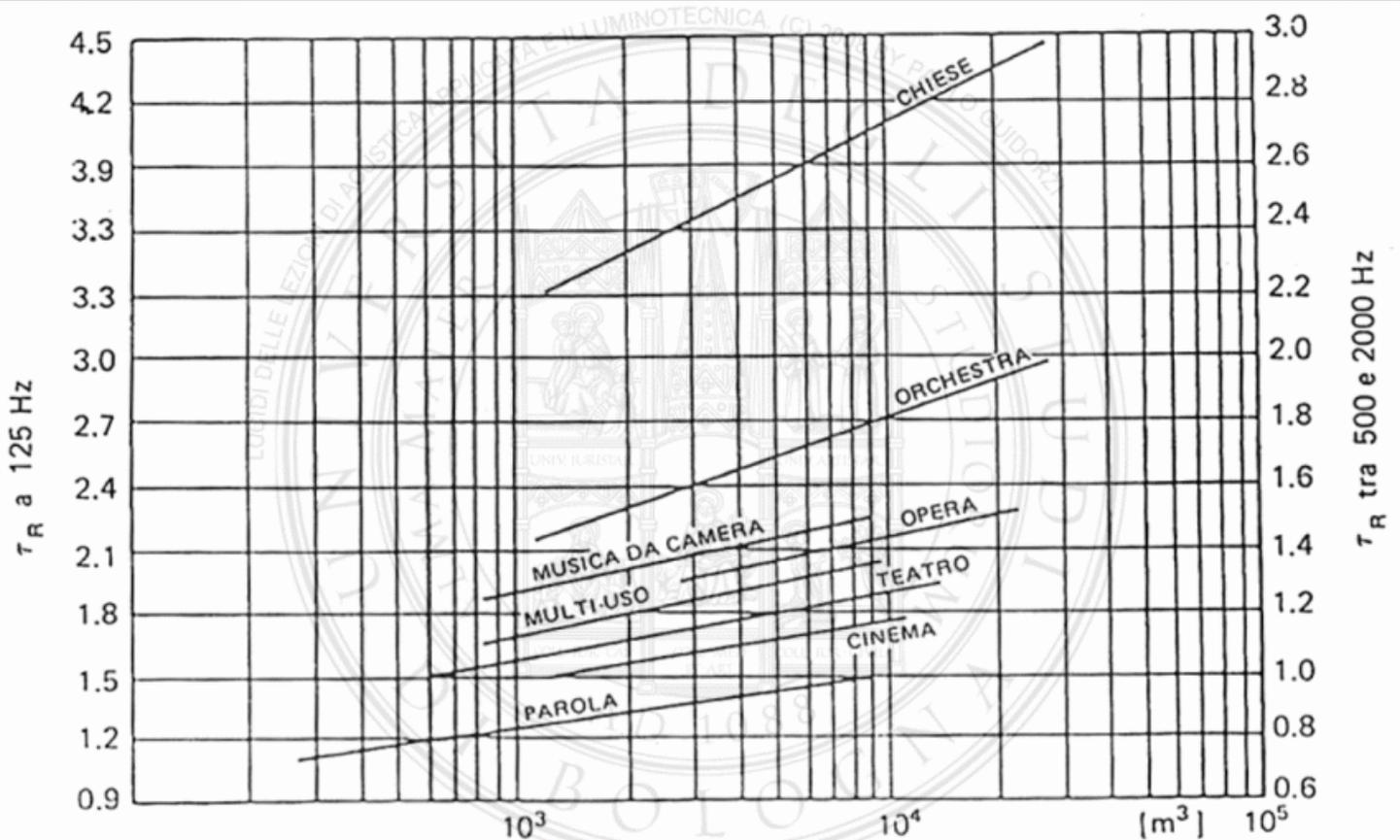
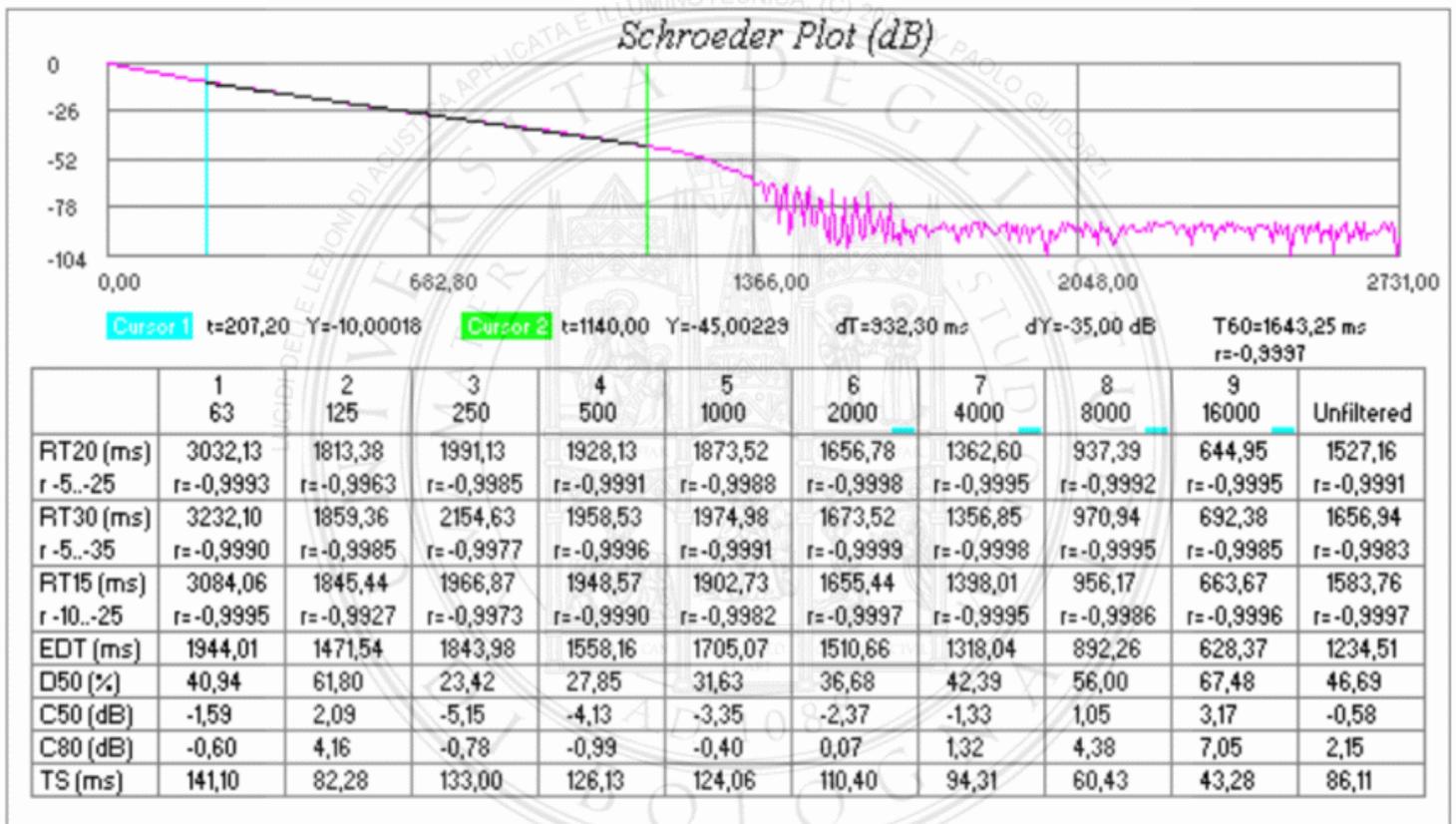
[>0,25]  $p_L$  è misurata con un  
microfono con caratteristica a "8"

Lateral Efficiency

$$L_E = \frac{\int_{25ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$$

[&gt;0,2-0,3]





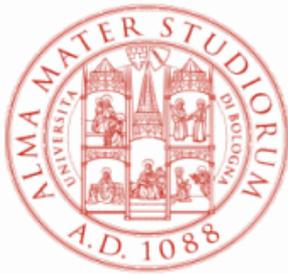
## MODI NORMALI DI VIBRAZIONE

Quando all'interno di un ambiente confinato è presente una sorgente acustica, le onde si propagano in tutte le direzioni e vengono riflesse dalle pareti secondo vari angoli di incidenza. Per alcuni angoli di incidenza, capita che le onde ritornino su loro stesse e formino onde stazionarie. Capita così che alcuni punti del campo acustico diventino sede di oscillazioni sinusoidali, alla frequenza delle onde corrispondenti. In alcuni punti (ventri) l'oscillazione sarà massima, in altri (nodi) nulla. Ad ogni onda stazionaria corrisponde un **modo normale di vibrazione** dell'ambiente. Se la frequenza del suono è uguale a uno o più dei modi normali di vibrazione, a tale frequenza si ha una risonanza e un'esaltazione del livello sonoro.

Le frequenze dei modi normali di vibrazione si ottengono con la formula:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz})$$

dove  $c$  è la velocità del suono in aria (m/s),  $l_x, l_y, l_z$  sono le dimensioni dell'ambiente (m) e gli indici  $n$  sono numeri interi tra 0 e infinito.



*Università degli studi di Bologna*  
*Facoltà di Ingegneria*

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

Dispensa n. 8

**CENNI DI ILLUMINOTECNICA**

Docente: Paolo Guidorzi

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E  
ILLUMINOTECNICA L (A-K)  
Ing. Paolo Guidorzi

CENNI DI ILLUMINOTECNICA

Pag. 2

## *Indice*

- 1 - Introduzione
- 2 - La propagazione della luce
- 3 - Le grandezze fotometriche
- 4 - Il flusso luminoso
- 5 - L'intensità luminosa
- 6 - La luminanza
- 7 - L'illuminamento
- 8 - La radianza
- 9 - Superfici isotrope e lambertiane

## INTRODUZIONE

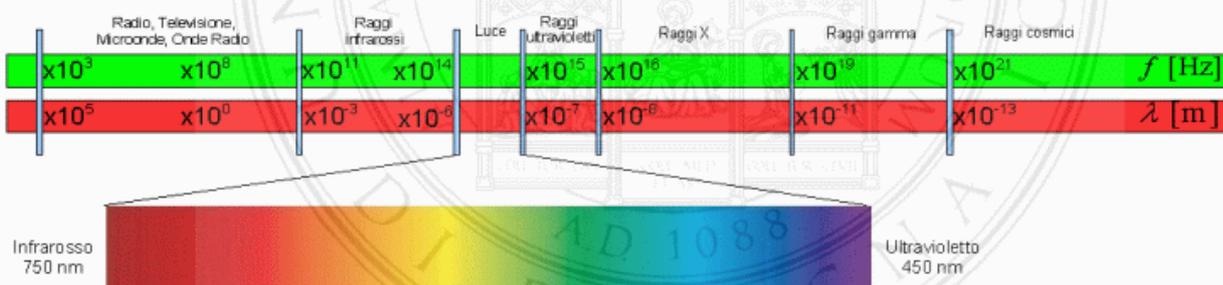
- Irraggiamento: trasmissione di energia a distanza senza trasporto di materia
- Un corpo a una certa temperatura emette energia raggiante che si propaga
- Il corpo nero emette energia secondo la *Legge di Stefan-Boltzmann*  
 $q_0 = \sigma_0 T^4$   $[W/m^2]$  dove  $q_0$  è l'energia emessa in tutto lo spettro,  $T$  è la temperatura assoluta del corpo  $[K]$  e  $\sigma_0$  è la costante di Stefan-Boltzmann, pari a  $5,64 \cdot 10^{-8}$   $[W/m^2 K^4]$

In termini di potenza, considerando la superficie  $S$ :  $Q = S \sigma_0 T^4$   $[W]$

- Una radiazione elettromagnetica è caratterizzata da lunghezza d'onda, frequenza e velocità di propagazione nel mezzo.

- Vale la legge generale delle onde:  $\lambda f = \frac{c_0}{n}$   
 dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda (m oppure  $\mu m$ )  
 $f$  è la frequenza (Hz)  
 $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo. Per l'aria e il vuoto vale 1  
 $c_0$  è la velocità della luce nel vuoto, circa  $3 \cdot 10^8$  m/s

- Ogni radiazione è caratterizzata da una lunghezza d'onda e da una frequenza



- La **frequenza** (Hz) è il numero di oscillazioni dell'onda in un secondo
- La **lunghezza d'onda** (m) è lo spazio percorso dall'onda in un periodo (ovvero il tempo impiegato per un'oscillazione, l'inverso della frequenza)
- L'**energia** associata alla radiazione elettromagnetica è proporzionale alla frequenza dell'onda secondo la relazione:

$$E = h \cdot f \quad [\text{J}]$$

$h$  è la costante di Planck =  $6,626 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$

- La **frequenza** di un'onda è univoca
- La **lunghezza d'onda** dipende dalla velocità di propagazione

$$\lambda f = \frac{c_0}{n}$$

- La lunghezza d'onda della luce varia tra 400 nm - 700 nm  
Campo di variabilità 1-2
- La lunghezza d'onda del suono varia tra 4 m - 4 mm  
Campo di variabilità 1-1000

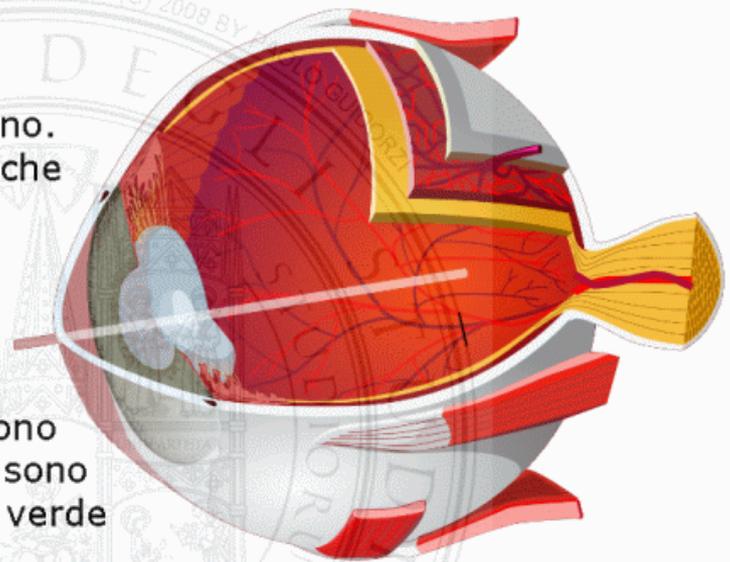
- La luce è recepita dall'occhio umano. Il sistema ottico è basato su lenti che concentrano l'energia sulla retina

- La **retina centrale** percepisce i dettagli, ha alta definizione, percepisce il contrasto e i colori.

**Coni**: distinguono i colori, forniscono visione precisa della luce intensa, sono di 3 pigmenti diversi, per il rosso, verde e blu.

- La **retina periferica** percepisce lo spazio circostante, ha bassa definizione, percepisce il movimento.

**Bastoncelli**: visione in bianco e nero, e a bassa intensità (visione notturna). E' presente un solo pigmento.



- La fotometria studia i legami tra ciò che l'occhio vede e ciò che la sorgente luminosa emette, nello spettro del visibile:

$$0,38\mu\text{m} < \lambda < 0,78\mu\text{m}$$

- La sensazione visiva dipende dalla potenza incidente sulla retina

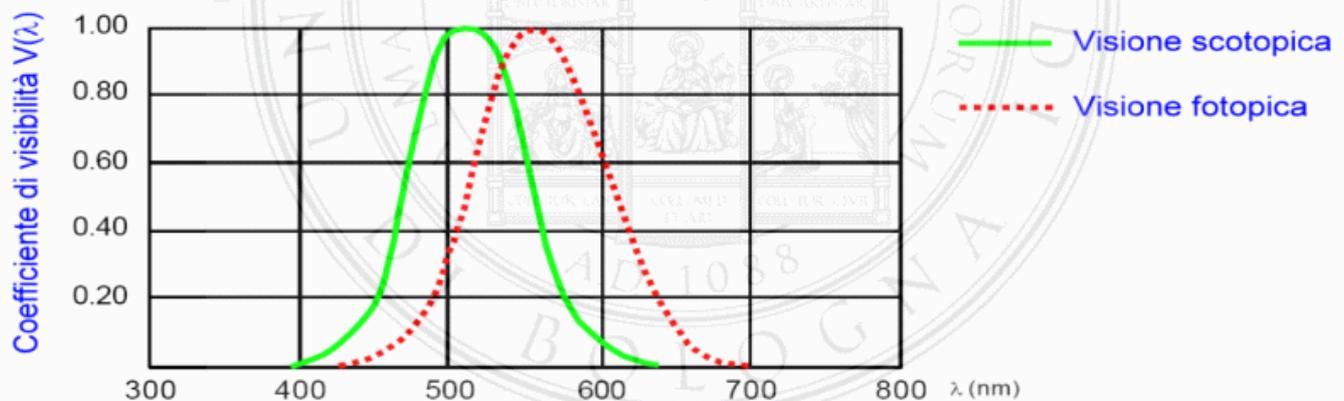
- L'occhio umano è sensibile in modo diverso alle diverse lunghezze d'onda. L'organismo CIE ha codificato un occhio con sensibilità media derivato da informazioni statistiche su molti soggetti.

- La sensibilità massima si ha intorno a  $\lambda = 0,55\mu\text{m}$  (verde)

Per quantificare la sensibilità dell'occhio umano alle radiazioni a differente lunghezza d'onda si usa la funzione **fattore di visibilità  $K(\lambda)$** .

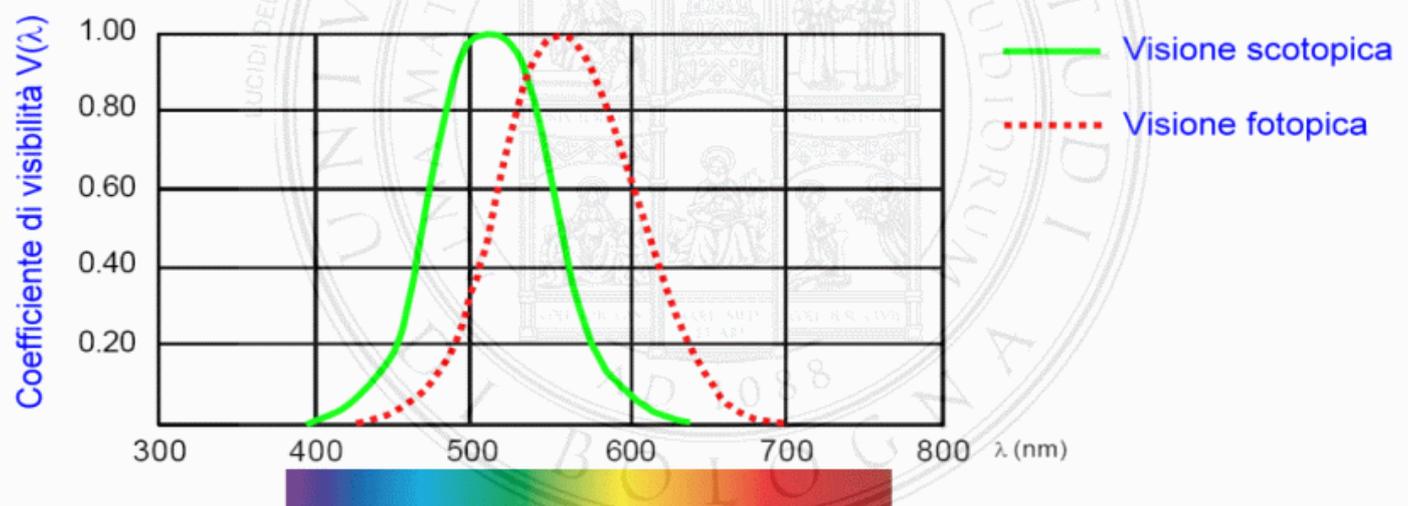
Il massimo di questo fattore, ovvero il massimo di sensazione di visibilità,  $K(\lambda)=K_{max}$  si ha per  $\lambda = 555 \text{ nm}$  (visione fotopica) o  $\lambda = 510 \text{ nm}$  (visione scotopica).

Si definisce anche il **coefficiente di visibilità  $V(\lambda)=K(\lambda)/K_{max}$**  graficato nel seguente grafico, con le 2 curve per **visione diurna a colori (fotopica)** e **notturna in bianco e nero (scotopica)**



La **visione fotopica** è caratterizzata da nitida percezione dei colori e rapido adattamento alle variazioni di intensità. La **visione scotopica** invece è caratterizzata dalla visione monocromatica, lentezza dei processi di adattamento e scarsa definizione dell'immagine.

Il massimo di sensibilità per la visione scotopica si ha per una lunghezza d'onda minore rispetto alla visione fotopica (fenomeno di Purkinje), attorno all'azzurro-verde. Questo spiega perchè le guide ottiche di ospedali e aeroporti sono di questo colore



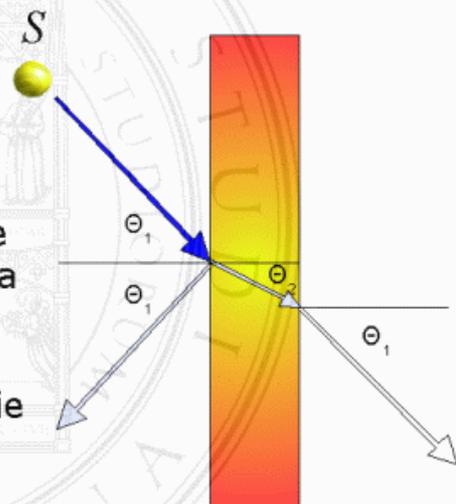
## LA PROPAGAZIONE DELLA LUCE

La luce quando interagisce con lastre di materiale solido o superfici trasparenti, subisce fenomeni di riflessione, rifrazione, assorbimento e trasmissione.

Il **fattore di riflessione** di una superficie è il rapporto tra la quantità di luce riflessa e la quantità di luce incidente.

Il **fattore di trasmissione** di una superficie è il rapporto tra la quantità di luce trasmessa e la quantità di luce incidente.

Il **fattore di assorbimento** di una superficie è il rapporto tra la quantità di luce assorbita e la quantità di luce incidente.



La riflessione può essere:

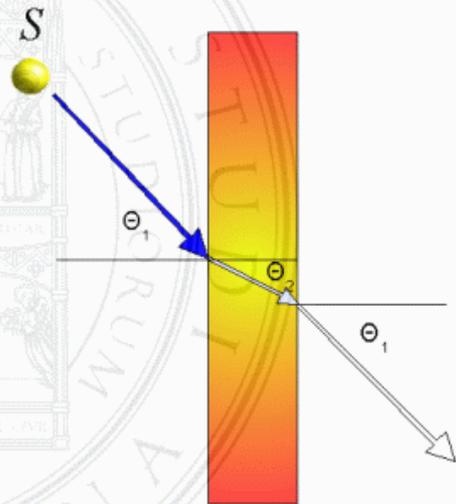
- **regolare**: l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza.  
Superfici speculari
- **diffusa**: la riflessione è uniforme in tutte le direzioni.  
Superfici opache
- **mista**: combinazione di riflessione regolare e diffusa.



La **rifrazione** è il fenomeno di deviazione che la luce subisce all'interfaccia di un mezzo diverso. L'angolo della deviazione dipende dalle proprietà del mezzo.

La rifrazione può essere:

- **diretta** quando il mezzo lascia passare quasi tutto il raggio di luce (ad es. vetro)
- **diffusa** quando la luce dopo aver attraversato il mezzo si diffonde in tutte le direzioni (materiale traslucido)
- **mista** quando la luce si diffonde ma ha una direzione privilegiata

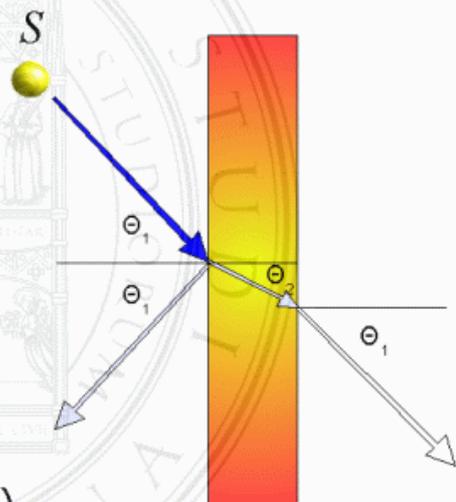


La **riflessione regolare** prevede che il raggio incidente e il raggio riflesso stiano sullo stesso piano e formino angoli di incidenza e riflessione uguali con la normale alla superficie.

Il raggio rifratto invece obbedisce alla legge di Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

dove  $n_1$  e  $n_2$  sono gli indici di rifrazione dei due mezzi (rapporti tra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo considerato)



## LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE

**Flusso luminoso:**  $\Phi$  [lumen]**Intensità luminosa:**  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$  [candela (lm/sr)]**Illuminamento:**  $E = \frac{d\Phi_l}{dS}$  [Lux (lm/m<sup>2</sup>)]**Luminanza:**  $L = \frac{dI}{dS \cos \vartheta}$  [Nit (cd/m<sup>2</sup>)] oppure [stilb (cd/cm<sup>2</sup>)]**Radianza:**  $F = \frac{d\Phi_e}{dS}$  [Lux s.b. (lm/m<sup>2</sup>)]

## IL FLUSSO LUMINOSO

**Flusso luminoso:**  $\Phi = K_{\max} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot d\lambda$  [lumen (lm)]nel caso di luce monocromatica:  $\Phi(\lambda) = K_{\max} \cdot V(\lambda) \cdot P(\lambda)$  [lumen (lm)] $P(\lambda)$  : potenza radiante [W] $K(\lambda)$  : fattore di visibilità, varia nelle persone e con l'età $K_{\max}$  : fattore di visibilità massimo ( $\approx 680 \text{ lm/W}$ ) $V(\lambda)$  : coefficiente di visibilità =  $\frac{K(\lambda)}{K_{\max}}$ 

Il flusso luminoso quantifica la sensazione luminosa, legandola alla potenza dello stimolo, ovvero è la quantità di luce percepita dall'occhio. E' la parte del flusso energetico emesso da una sorgente luminosa ponderato dal coefficiente di visibilità.

## L'INTENSITA' LUMINOSA

**Intensità luminosa:**  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$  [candela (lm/sr)]

E' una grandezza vettoriale. Grandezza illuminotecnica fondamentale del **S.I.** Il flusso luminoso perciò è in realtà una grandezza derivata.

La candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  Hz e la cui intensità energetica in tale direzione è di  $1 / 683$  W/sr

**ESEMPIO**

Una sorgente puntiforme ha  $I = \text{cost} = 200$  cd  
Senza alcun proiettore si ha  $\Omega = 4\pi$  e quindi un flusso = 2513 lm

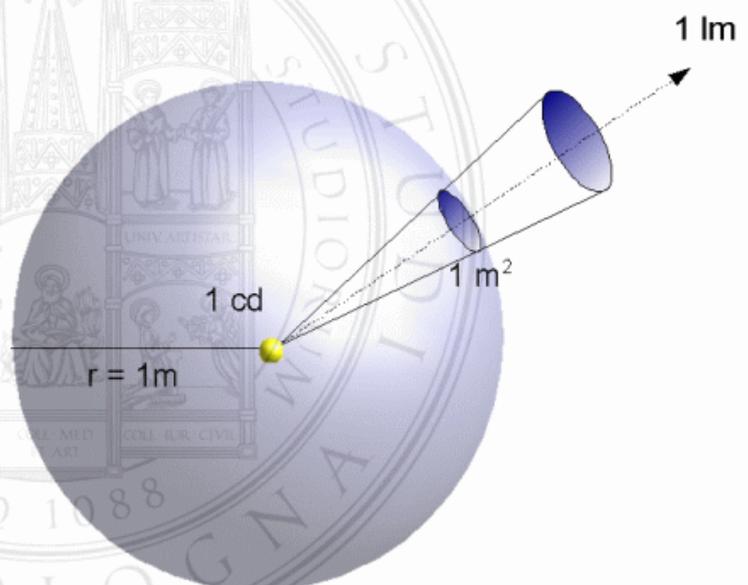
Se la sorgente è inserita in un proiettore tale che l'intensità  $I'$  risulta (dato che il flusso è costante):  $d\Omega = \frac{4\pi}{1000}$

$$\Phi = \text{cost} = 4\pi \cdot I = \frac{4\pi}{1000} I' \Rightarrow I' = 1000 \cdot I = 200.000 \text{ cd}$$

**Flusso luminoso:**  $\Phi$  [lumen (lm)]

Avendo definito l'intensità luminosa si può ora definire meglio il *lumen*:

**Un lumen (lm)** corrisponde al flusso luminoso emesso da una sorgente puntiforme di intensità pari a **1 cd** uscente da una superficie di **1 m<sup>2</sup>** intersecata su una sfera di raggio **1 m** (angolo solido **1 sr**).



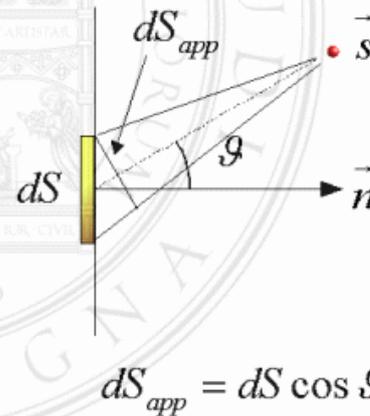
## LA LUMINANZA

**Luminanza:**  $L = \frac{dI}{dS_{app}}$  [Nit (cd/m<sup>2</sup>)] oppure [stilb (cd/cm<sup>2</sup>)]

E' il rapporto tra l'intensità luminosa in un punto di una superficie, osservata in una certa direzione, e la superficie emittente, proiettata su un piano perpendicolare alla direzione stessa.

La luminanza è legata alla visione e tiene conto della direzione di osservazione considerata.

E' importante nei calcoli dell'illuminotecnica, per valutare se si verifica il fenomeno dell'abbagliamento.



## L'ILLUMINAMENTO

**Illuminamento:**  $E = \frac{d\Phi_i}{dS}$  [Lux (lm/m<sup>2</sup>)]

E' il rapporto tra il flusso luminoso **incidente** sulla superficie elementare nell'intorno del punto considerato e la superficie elementare stessa.

Misura la quantità di luce che arriva su una superficie. **1 lux** corrisponde al flusso di **1 lumen** su una superficie di **1 m<sup>2</sup>**.

$$d\Phi = I d\Omega = I \frac{dS}{r^2} \quad E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I}{r^2}$$

L'illuminamento cala col quadrato della distanza.

Se  $r = 1$  m il numero di lux è uguale al numero di candele.

**Illuminamento:**  $E = \frac{d\Phi_i}{dS}$  [*Lux* ( $\text{lm}/\text{m}^2$ )]

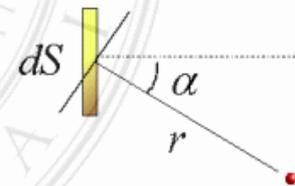
Illuminamento di superficie perpendicolare

$$d\Phi = Id\Omega = I \frac{dS}{r^2} \quad E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I}{r^2}$$



Illuminamento di superficie inclinata

$$d\Phi = Id\Omega = I \frac{dS \cos \alpha}{r^2} \quad E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$



Calcoliamo ora l'illuminamento puntuale di una porzione di superficie  $S$  posta a distanza  $r$  da un punto  $P$  di una superficie elementare  $dS$ , essendo  $I_\alpha$  l'intensità luminosa della sorgente in direzione di  $P$  e  $d\Phi$  l'angolo solido sotto cui la sorgente vede  $dS$

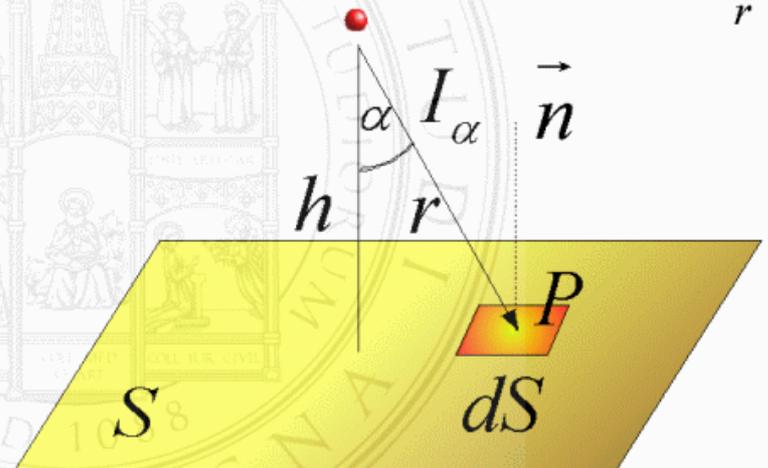
$$E_\alpha = \frac{d\Phi}{dS}$$

$$I_\alpha = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{r}$$

$$dS = \frac{r^2 d\Omega}{\cos \alpha} \Rightarrow E_\alpha = \frac{d\Phi}{r^2 d\Omega} \cos \alpha$$

$$E_\alpha = \frac{d\Phi}{d\Omega} \frac{\cos^3 \alpha}{h^2} = I_\alpha \frac{\cos^3 \alpha}{h^2}$$



## LA RADIANZA

**Radianza:**  $F = \frac{d\Phi_e}{dS}$  [Lux s.b. (lm/m<sup>2</sup>)]

E' il rapporto tra il flusso luminoso **emesso** dalla superficie elementare nell'intorno del punto considerato e la superficie elementare stessa.

Corrisponde al prodotto dell'illuminamento E ricevuto dalla superficie considerata per il fattore di riflessione r della superficie:

$$F = \frac{d\Phi_e}{dS} = rE$$

$$E = \frac{d\Phi_i}{dS} \quad [\text{Lux (lm/m}^2\text{)}]$$

Per **r = 1** (superficie bianca e riflettente) si ha: **F = E**

Per **superfici lambertiane** (riflessione e trasmissione perfettamente diffuse) si può legare illuminamento e luminanza: **E = πL**

## ESEMPIO

Una sorgente puntiforme ha Intensità luminosa = cost = 200 cd  
Se coeff. di riflessione = 1 → F = E = 200 lux s.b. = 0,02 lambert  
L'illuminamento vale:

$$E = \frac{I}{r^2} \Rightarrow \begin{cases} r = 1\text{m} \Rightarrow E = 200 \text{ lux} \\ r = 2\text{m} \Rightarrow E = 50 \text{ lux} \\ r = 3\text{m} \Rightarrow E = 22,2 \text{ lux} \end{cases}$$



$$\begin{aligned} 1 \text{ lux s.b.} &= \text{lumen} / \text{m}^2 \\ 1 \text{ lambert} &= \text{lumen} / \text{cm}^2 \\ [1 \text{ m}^2 &= 10000 \text{ cm}^2] \end{aligned}$$

**Valori di riferimento:**

Superficie bianca al sole, ore 12:  $E=100.000$  lux  
su superficie con  $r=0,85$   $F=85.000$  lux s.b. = 8,5 lambert

Cielo sereno  $F=2,3$  lambert

Cielo sereno vicino al sole  $F= 6-10$  lambert

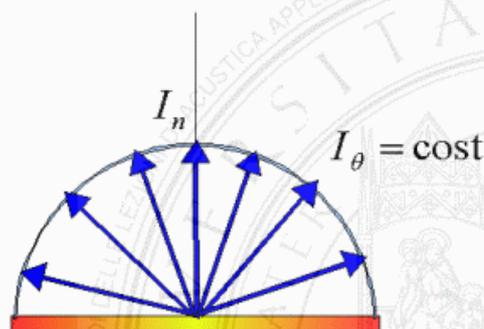
Nuvola chiara  $F=2$  lambert

Nuvola bianca  $F=1-6$  lambert

Luna piena  $F= 2,4 \cdot 10^{-5}$  lambert

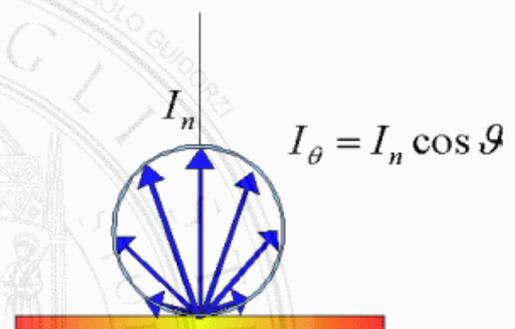
Superficie bianca al sole,  $\alpha=60^\circ$ :  $E=100.000 \cdot \cos\alpha = 50.000$  lux  
 $F=rE=42.500$  lux s.b. = 4,25 lambert

Se la superficie è lambertiana  $L=F/\pi = 1,35$  cd/cm<sup>2</sup> (stilb)

**SUPERFICI ISOTROPE E LAMBERTIANE****Superficie isotropa**

I raggi riflessi e trasmessi  
sono emessi in tutte le  
direzioni in eguale misura

La luminanza è la stessa in  
ogni direzione

**Superficie lambertiana**

I raggi riflessi e trasmessi  
seguono la legge

$$I_{\theta} = I_n \cos \theta$$