

Laboratorio di Prgettazione 3MB  
Modulo di Fisica Tecnica  
Prof. Lucia Fontana

# Acustica

## Introduzione

A.A. 2009-2010  
Università degli Studi Roma Tre  
Facoltà di Architettura



# Il suono

I fenomeni acustici sono perturbazioni di carattere oscillatorio che si propagano in un mezzo elastico



Generazione, propagazione, ricezione

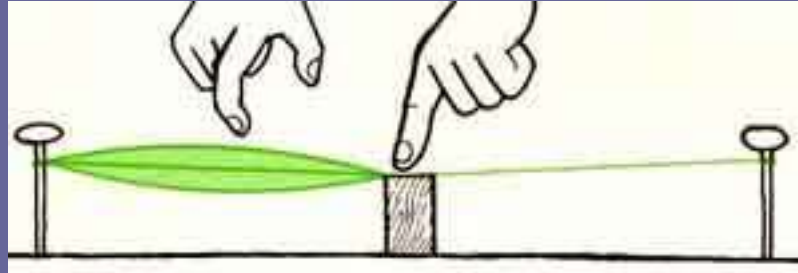
# Il suono

Il suono è una perturbazione della pressione di un mezzo (per esempio aria), che si propaga in esso come una serie di compressioni e rarefazioni percepibili dal nostro apparato uditivo:

Un corpo vibrante (sorgente sonora) trasmette sollecitazioni di pressione (variabili nel tempo con legge assegnata) allo straterello del mezzo adiacente.

Ciascuno straterello compresso trasmette la sollecitazione a quello adiacente, e così tale perturbazione di pressione si propaga, con velocità  $c$  (velocità del suono), dipendente dalle caratteristiche del mezzo.

# Il suono



Per la propagazione è necessario un mezzo elastico, nel quale la sorgente crea una successione di onde di rarefazione e compressione, che si muovono con una velocità dipendente solo dalle condizioni del mezzo.

Le particelle del mezzo, lungo la direzione di propagazione dell'onda, si muovono attorno alla posizione di riposo, con un moto caratterizzato da ampiezza e velocità di oscillazione, la cui entità dipende dalla perturbazione di pressione.



# Il suono

Poiché ogni fenomeno sonoro consiste in una perturbazione di pressione, nello studio di tali fenomeni interessa l'entità di tale perturbazione, cioè la **differenza** tra la pressione  **$p(t)$**  esistente in un punto in un dato istante  **$t$**  in presenza dell'onda sonora e la **pressione statica  $p_0$**  che si avrebbe nello stesso punto e nello stesso istante in sua assenza.

Nel caso di propagazione in aria, la pressione statica è la pressione atmosferica  **$p_{atm}$** .

Tale differenza

$$\Delta p(t) = p(t) - p_0$$

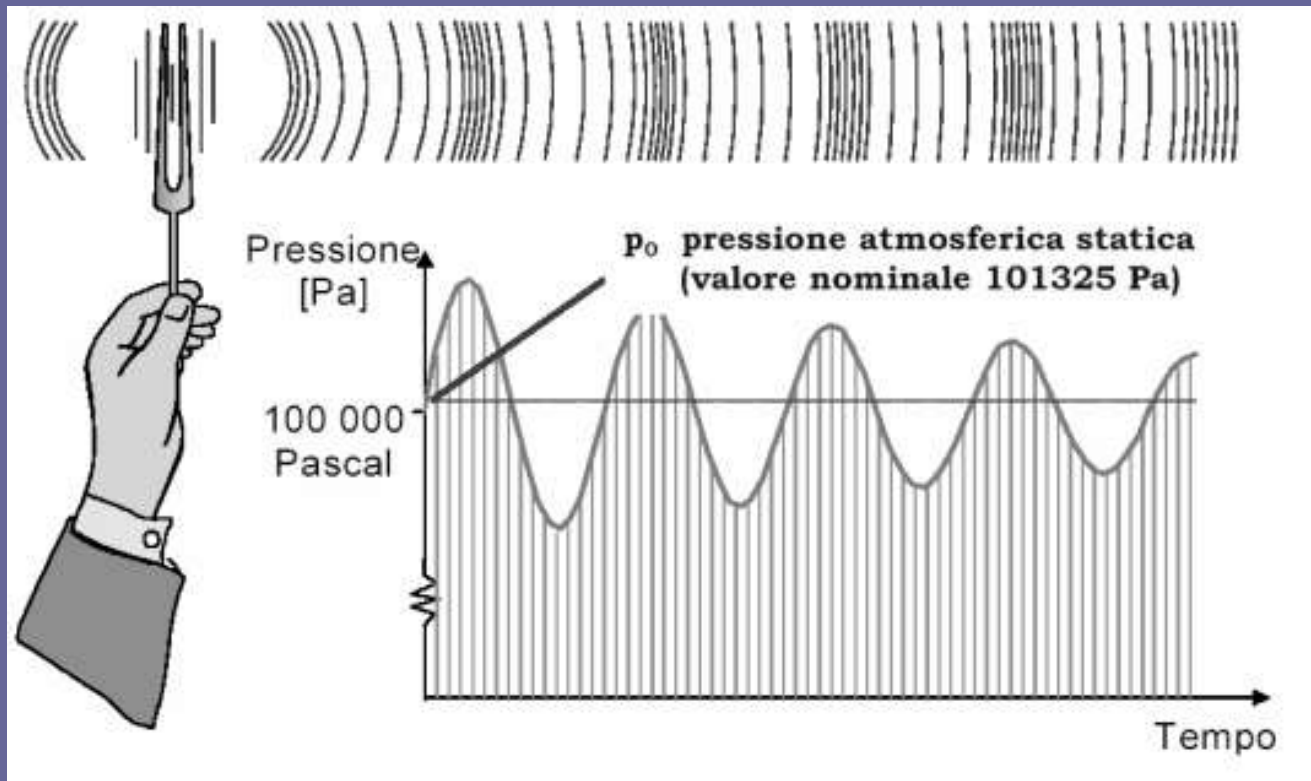
viene denominata

**Pressione sonora [Pa]**

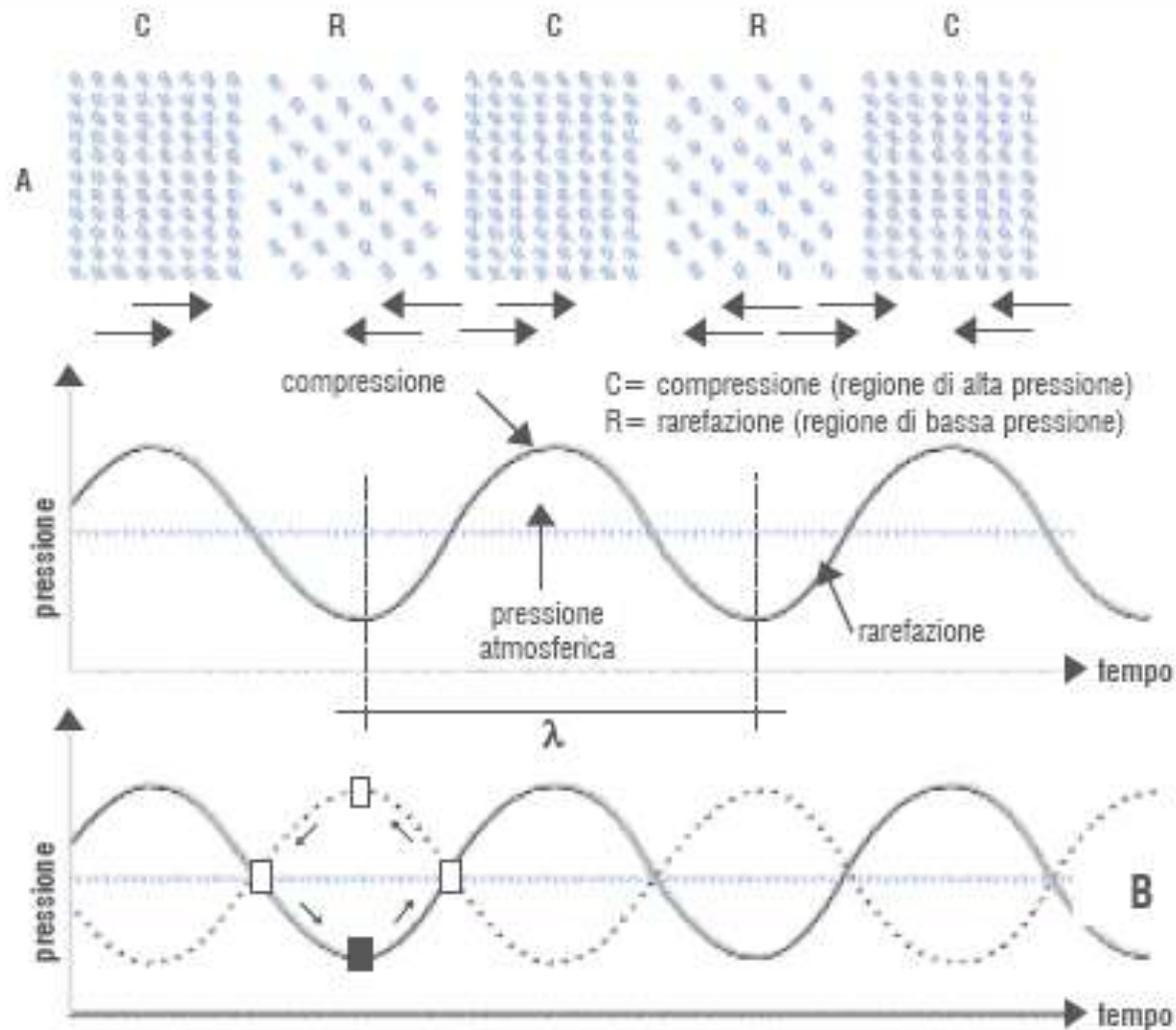
Per brevità, nel seguito con  $p(t)$  indicheremo la pressione sonora  $\Delta p(t)$ , cioè differenza tra pressione del fluido in quiete e la perturbazione creata dall'onda.

La pressione acustica è sempre una piccola frazione della pressione statica. Si misura in Pascal [Pa].

# Il suono



# Il suono





# Il suono

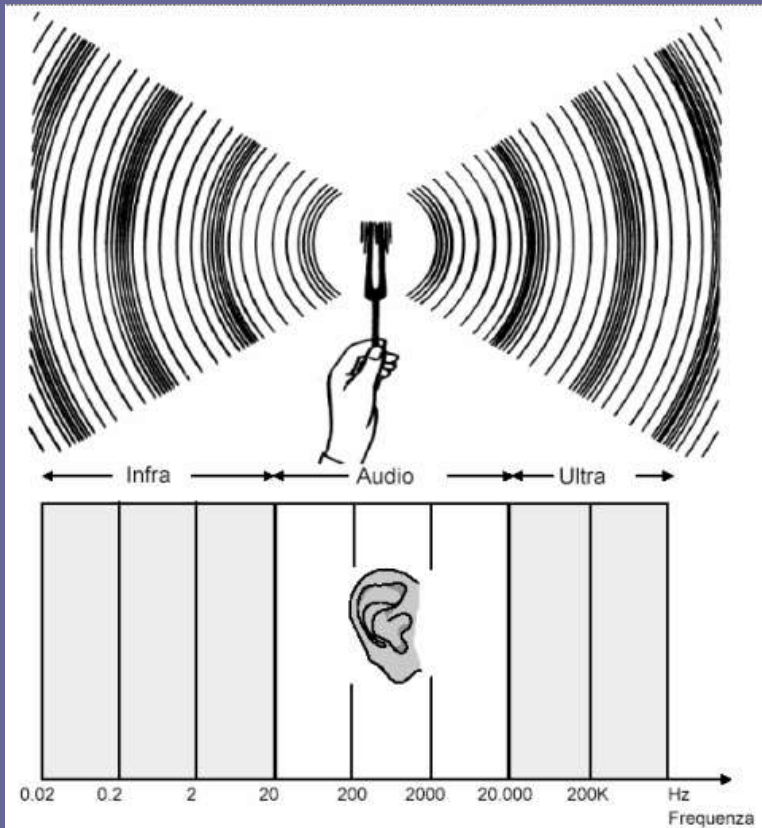
Il numero di oscillazioni (variazioni di pressione) al secondo viene chiamato **frequenza** del suono e viene misurato in cicli al secondo ossia in Hertz (Hz).

I suoni veri e propri sono oscillazioni di frequenza compresa tra **20 Hz e 20000Hz**, frequenze capaci di generare nell'uomo una sensazione uditiva.

Le oscillazioni di frequenza superiore a 20000 Hz sono dette ultrasuoni e quelle di frequenza inferiore a 20 Hz infrasuoni.

# Il suono

L'orecchio umano è sensibile a variazioni della pressione attorno a quella media atmosferica che avvengono con frequenza compresa tra 20 e 20000 Hz



## Animale

cane

pipistrello

gatto

delfino

## Intervallo di frequenza (Hz)

10-10000

1000-100000

100-10000

10000-100000

Campi di udibilità di alcuni animali

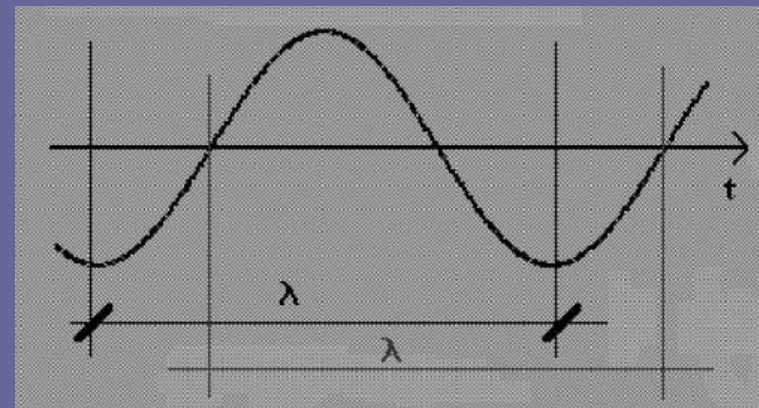
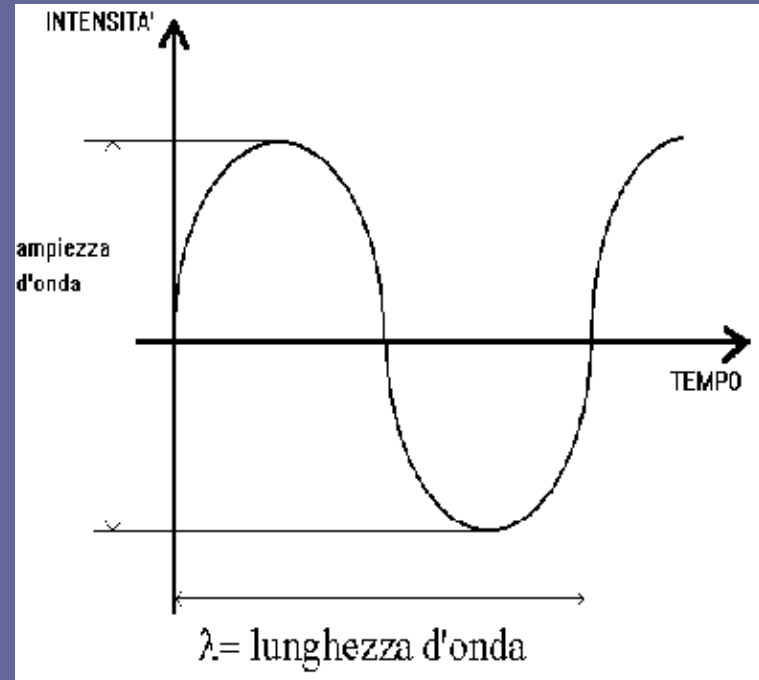
# Il suono

Il suono è una variazione di pressione che avviene con moto oscillatorio.

**Parametri caratteristici del suono:**

**lunghezza d'onda  $\lambda$  [m]**

distanza tra due particelle del mezzo che compiono la stessa oscillazione (distanza tra una compressione -o una rarefazione- e la successiva)



# Il suono

## Periodo $T$ [s]

intervallo di tempo tra due istanti consecutivi in cui si ha un massimo di pressione (o un minimo)

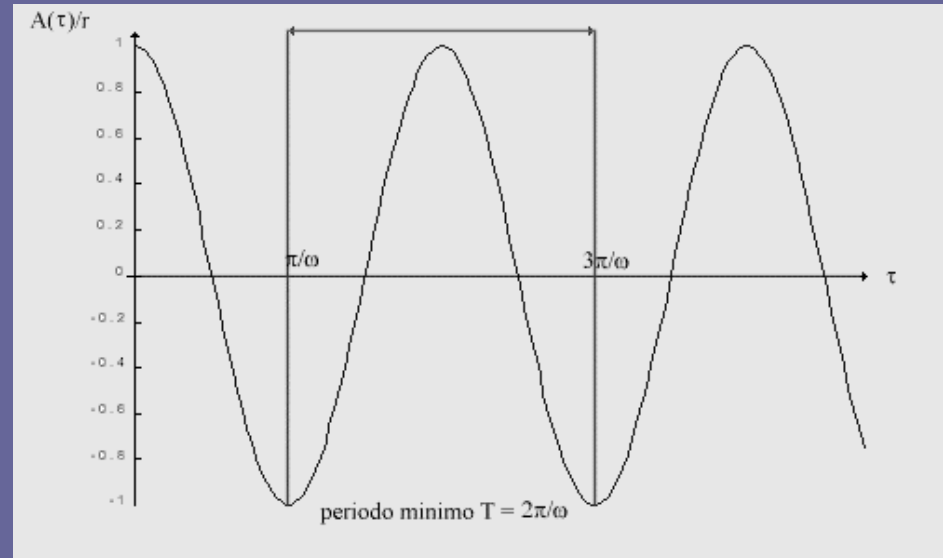
## frequenza $f$ [Hz] = $1/T$

numero di oscillazioni complete nell'unità di tempo (1 secondo)

## velocità del suono:

$$c = \lambda / T = \lambda f$$

$c$  = velocità di propagazione del treno d'onda (e non velocità di spostamento delle particelle del mezzo che oscillano intorno alla posizione di equilibrio!)



# Il suono

LA VELOCITÀ È PROPORZIONALE ALLA DENSITÀ DEL MEZZO

MEZZO	temperatura C°	v.(m/s)	
<i>ossigeno</i>	0	317	
<i>aria</i>	20	343	1200Km/h=0.333Km/sec=1Km ogni 3 sec
<i>piombo</i>	20	1230	
<i>idrogeno</i>	20	1286	
<i>acqua</i>	20	1450	
<i>legno</i>	20	3300	
<i>rame</i>	20	3560	
<i>mattoni</i>	20	3600	
<i>cemento</i>	20	3700	
<i>alluminio</i>	20	5100	
<i>ferro</i>	20	5130	
<i>granito</i>	20	6000	

*In aria,  $c = 344$  m/sec, alla temperatura di 20 C ed alla pressione atmosferica del livello del mare. Alla frequenza di 20 Hz, la lunghezza d'onda è pari a 17 metri, mentre a 20 KHz è pari a soltanto 17 mm.*

# Il suono

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

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

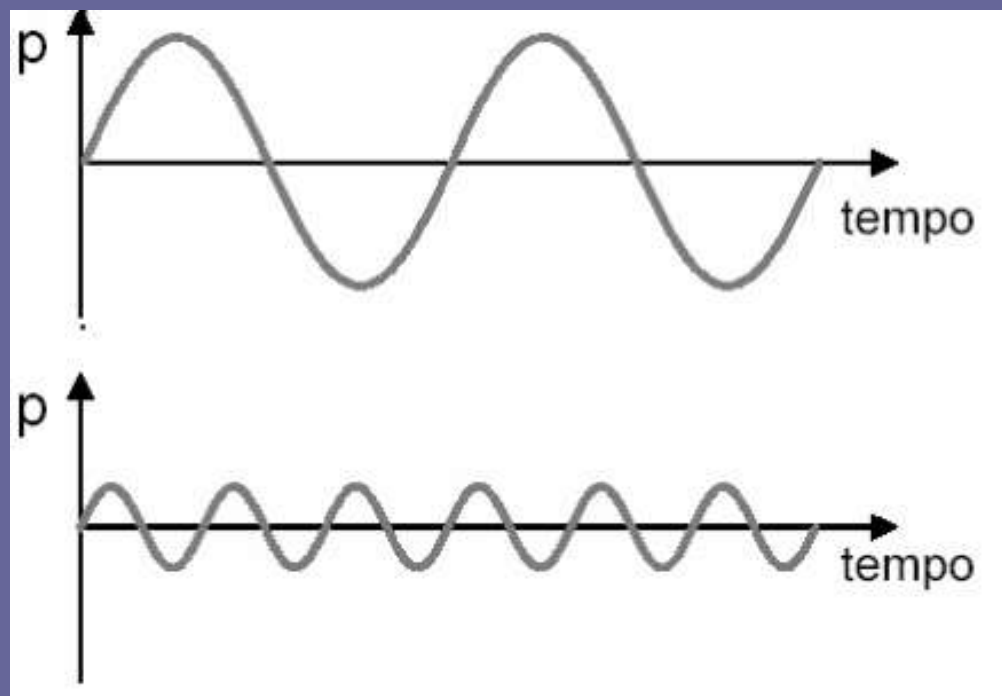
$$\lambda = c \cdot T$$

Relazione tra frequenza, lunghezza d'onda e velocità di propagazione nel mezzo

# Il suono

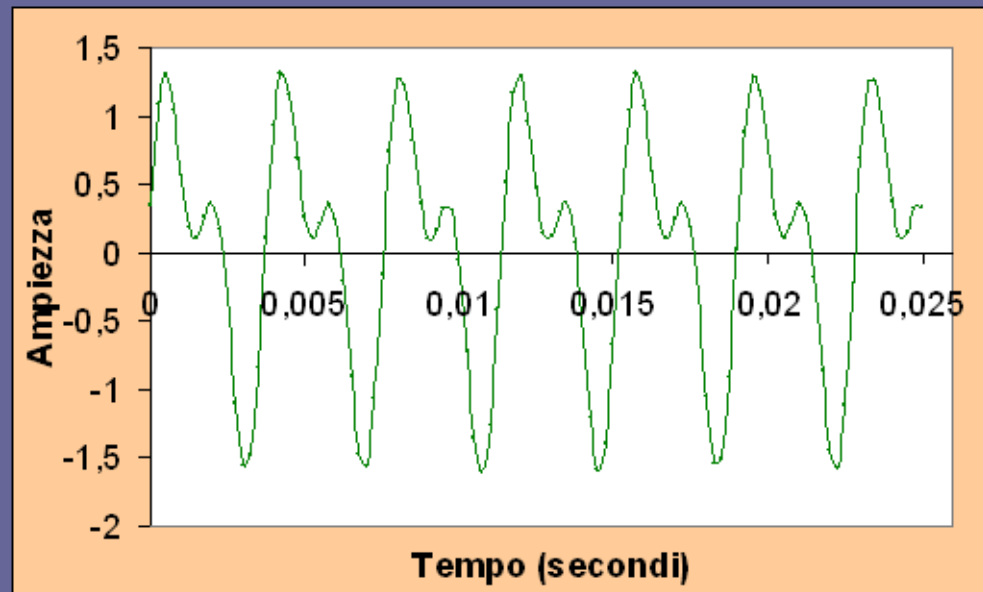
Un suono caratterizzato da una variazione di pressione di tipo sinusoidale si dice **suono puro**. Tali suoni sono caratterizzati da un unico valore di frequenza.

Due suoni puri, uno ad bassa frequenza e uno ad alta frequenza.



# Il suono

I suoni emessi in natura e quelli generati artificialmente sono generalmente oscillazioni complesse, che conservano però carattere periodico (le grandezze non variano con legge sinusoidale nel tempo, ma con legge diversa, che comunque si ripete nel tempo a intervalli regolari).



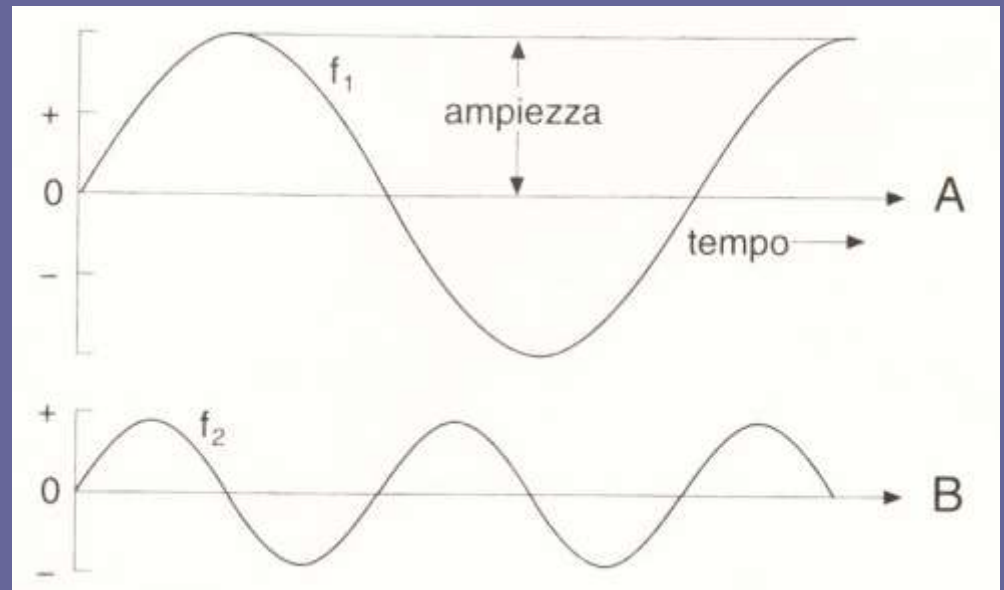
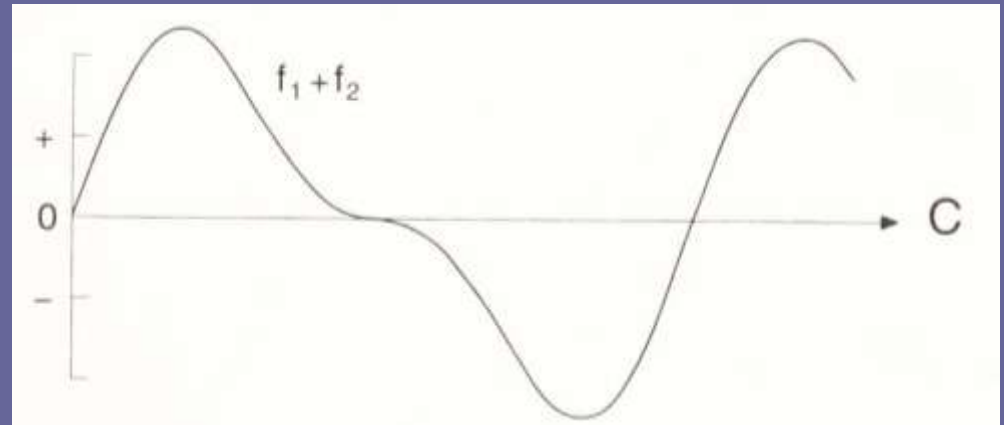


# Il suono

Qualsiasi funzione periodica  $f(t)$ , di periodo  $T$ , può essere rappresentata per mezzo di una somma di  $n$  funzioni sinusoidali aventi frequenze  $f_1, f_2=2f_1, \dots, f_n=nf_1$  (frequenze multiple della più bassa)

I singoli termini della equazioni di sopra prendono il nome di armoniche. In corrispondenza di  $n=1$  si ha l'armonica fondamentale mentre per gli altri valori di  $n$  si hanno le armoniche superiori.

In figura, la funzione  $C$  è pari alla somma delle sinusoidi  $A$  e  $B$ .

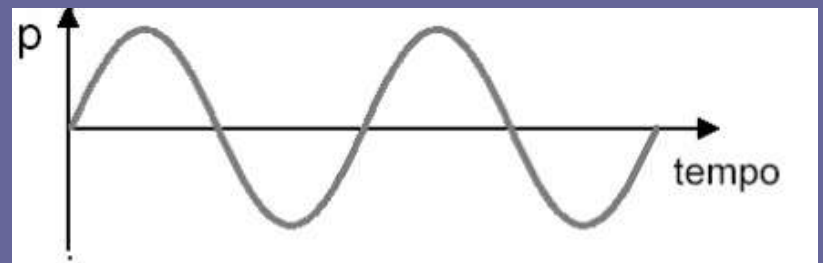


# Il suono

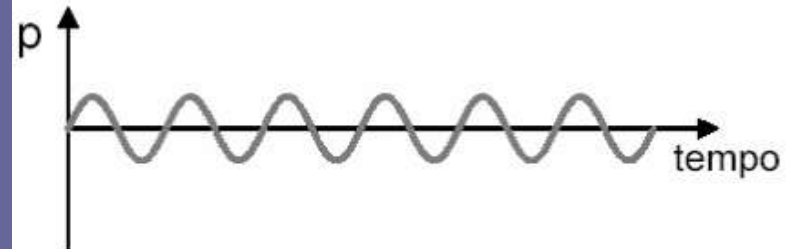
Pertanto i suoni complessi possono essere considerati somma di una serie di termini sinusoidali semplici.

Andamento della pressione acustica in funzione del tempo, per un suono complesso ad andamento periodico c), e per le relative armoniche a), b).

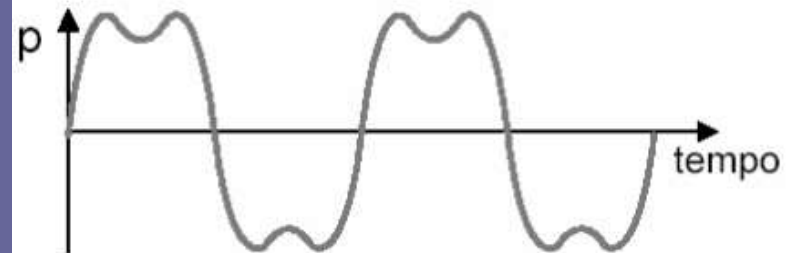
a)



b)



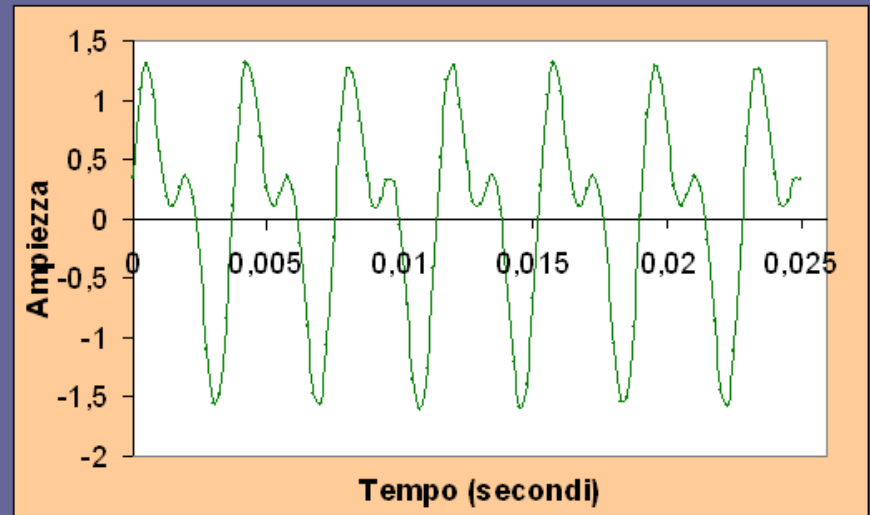
c)



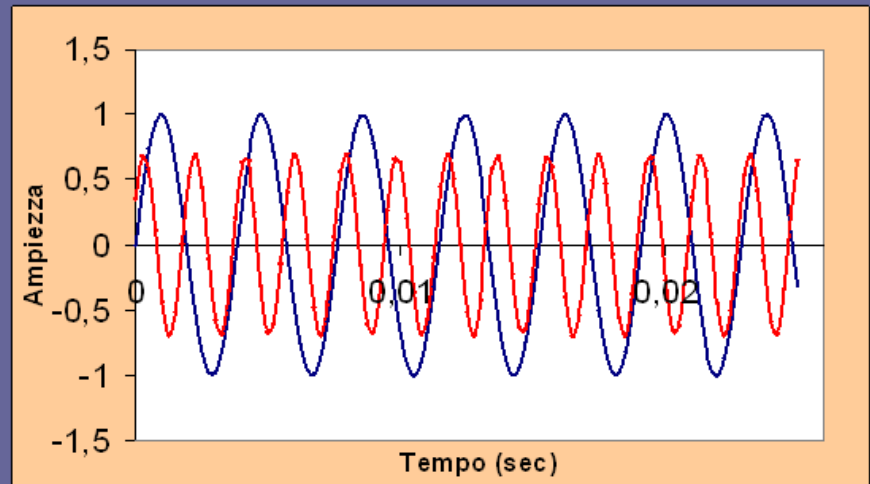
# Il suono

Altro esempio di andamento di un suono complesso a), somma delle due armoniche in fig. b). L'ampiezza del suono complesso è in ogni istante pari alla somma delle ampiezze delle armoniche nello stesso istante.

a)



b)



# Il suono

Lo **spettro di frequenza** è una rappresentazione grafica in cui compaiono le frequenze delle varie componenti sinusoidali di un suono, e le relative frequenze.

In ascissa compaiono le frequenze, in ordinata una grandezza che rappresenta l'entità del segnale: l'ampiezza di oscillazione, la pressione acustica, livello di pressione...

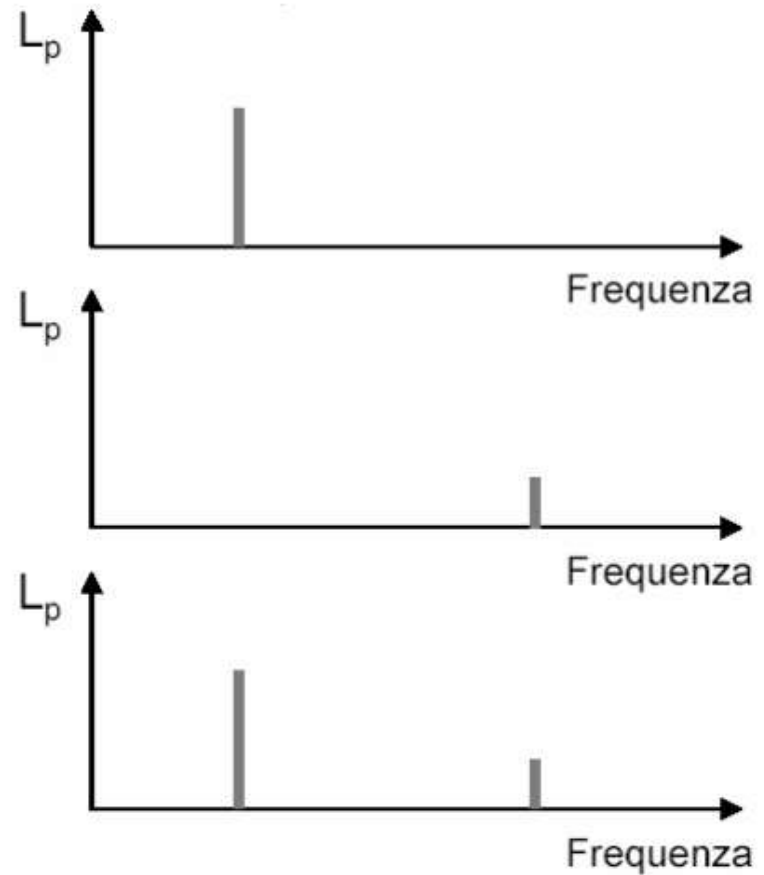
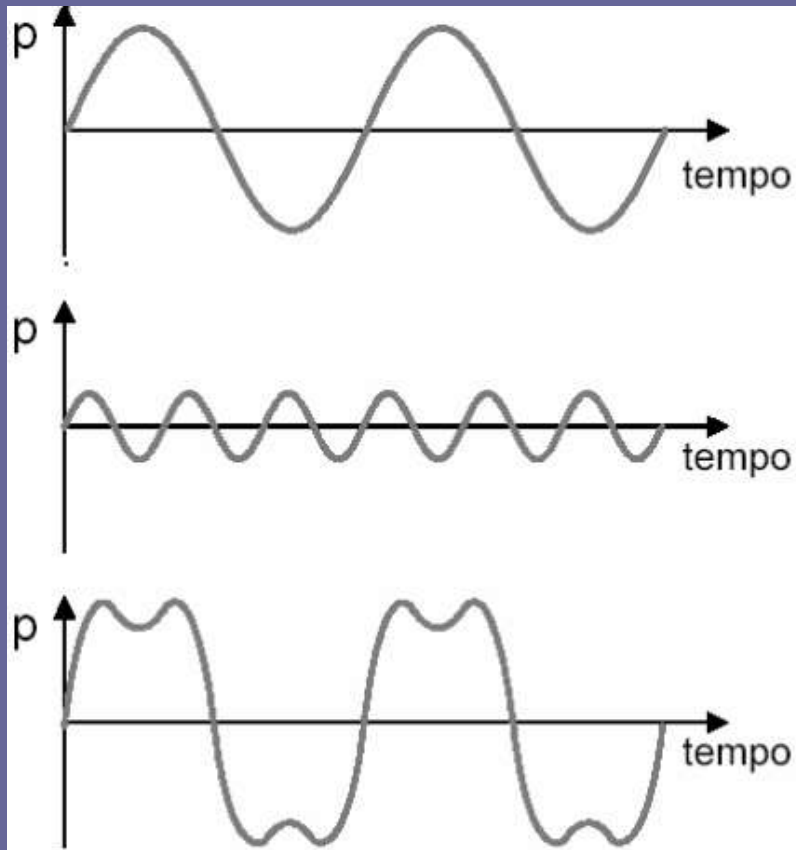
**Nel caso di un suono puro, lo spettro è costituito da una sola riga.**

**Lo spettro dei suoni complessi è invece costituito da molte righe.**

# Il suono

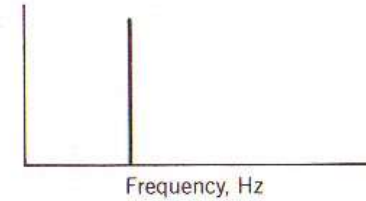
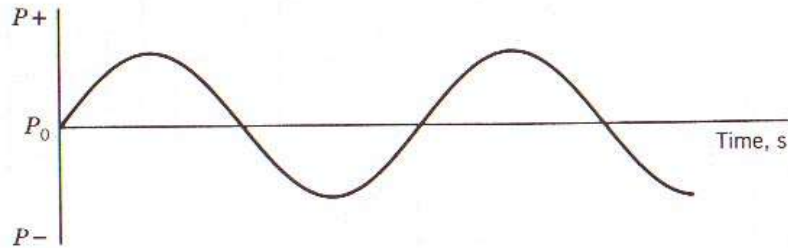
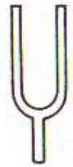
Andamento della pressione  
acustica nel tempo

Spettro acustico

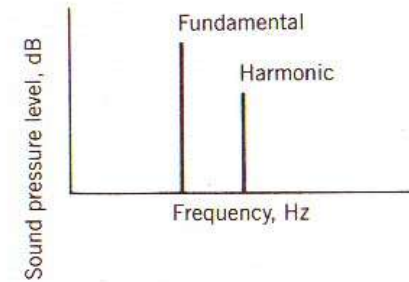
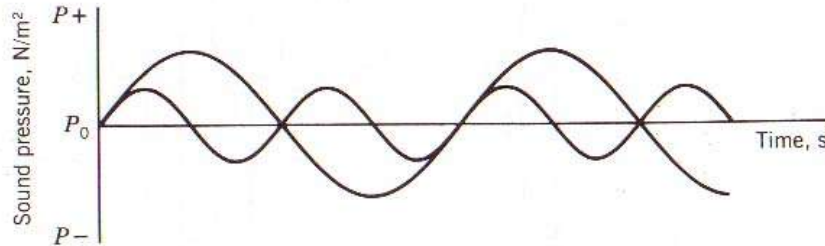


# Il suono

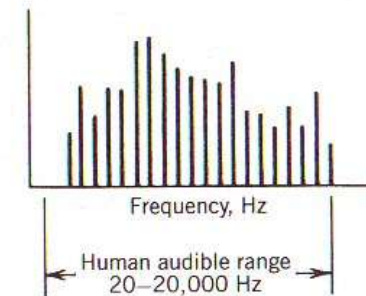
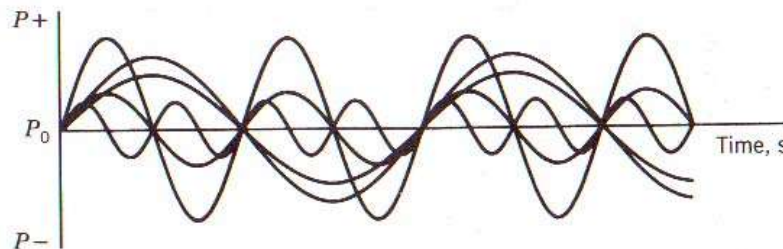
Pure tone



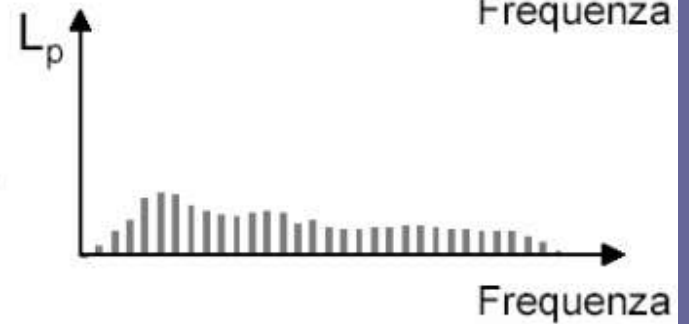
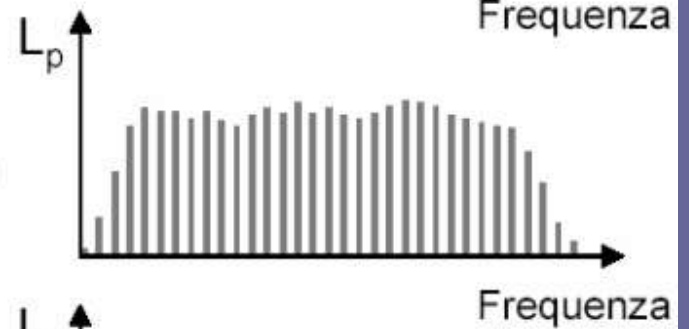
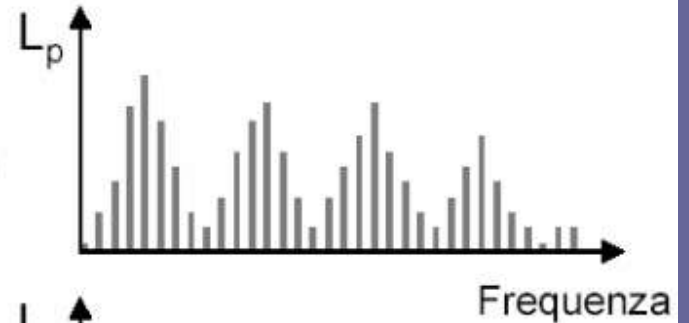
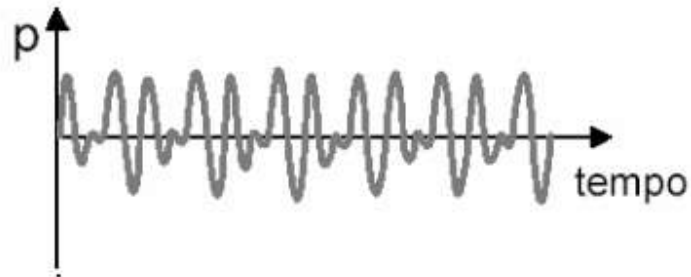
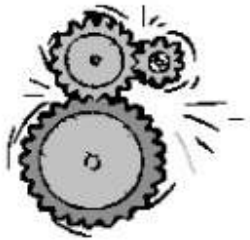
Musical tone



Common sounds  
(music, speech, noise)

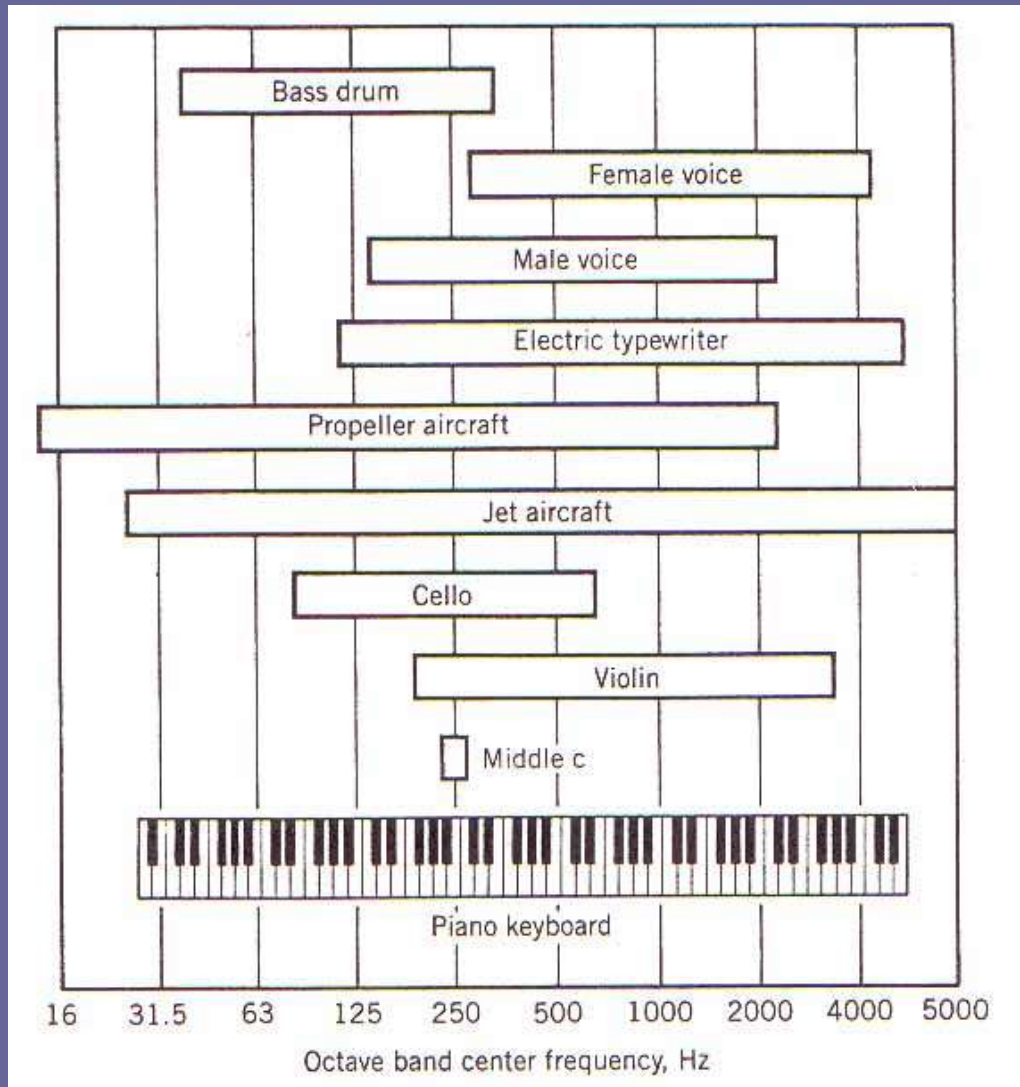


# Il suono



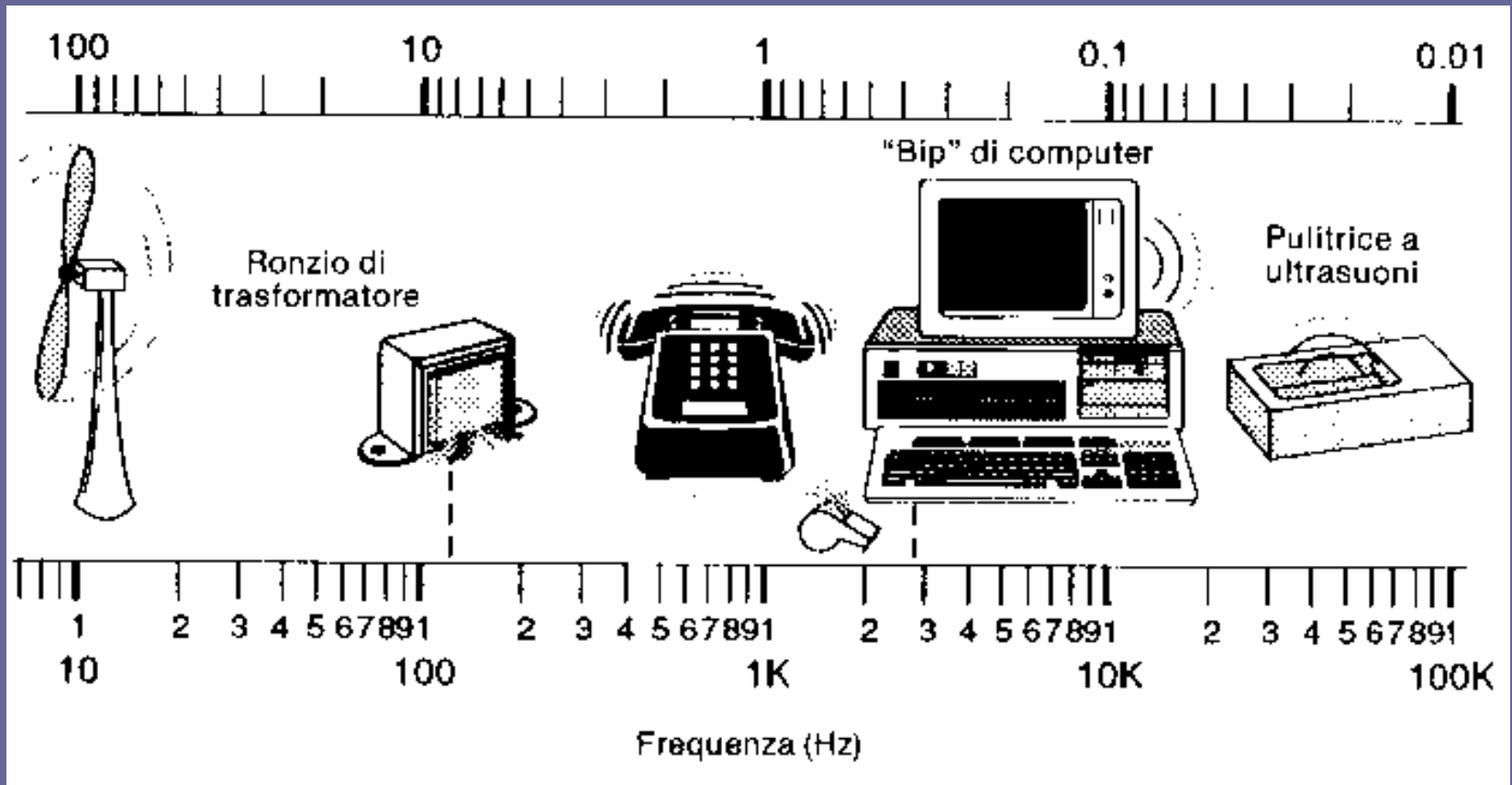
# Il suono

Estensione in frequenza  
di alcuni suoni



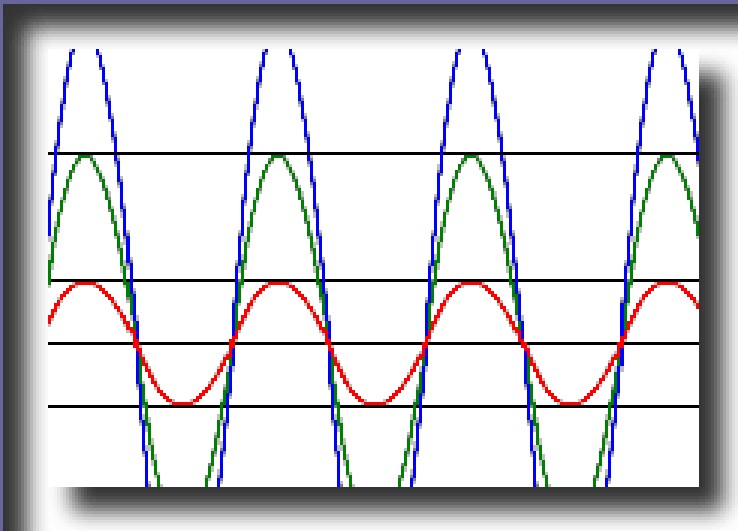


# Il suono

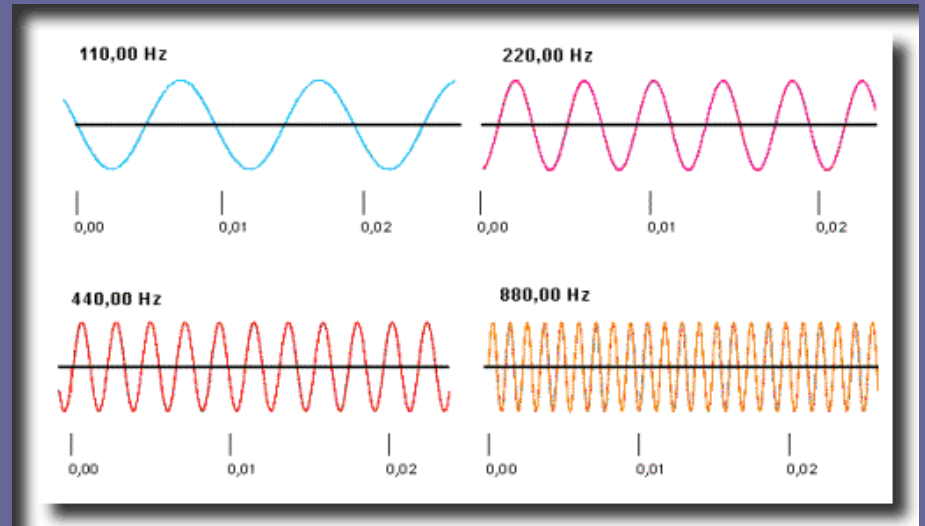


Frequenze caratteristiche di alcuni suoni

# Il suono



Onde di uguale frequenza  
e diversa intensità  
(ampiezza)



Onde di uguale intensità  
(ampiezza) e diversa  
frequenza

# Il suono

Caratteristiche del suono:

L'**altezza** è la qualità che fa distinguere un suono acuto da uno grave. Dipende in massima parte dalla frequenza, ma anche dalla intensità.

Il **volume** (intensità), è la qualità sonora associata alla percezione della *forza* di un suono, ed è determinato dalla pressione che l'onda sonora esercita sul timpano: quest'ultima è a sua volta determinata dall'ampiezza della vibrazione.

Il **timbro**, è la qualità che, a parità di frequenza, distingue un suono da un altro. Il timbro dipende dalla forma dell'onda sonora, determinata dalla sovrapposizione delle onde sinusoidali caratterizzate dai suoni fondamentali e dai loro armonici (quantità e dall'ampiezza delle sinusoidi che contiene).

# Il suono – grandezze acustiche

La pressione sonora mediamente su un periodo è nulla (successione di una compressione, pressione acustica positiva, e una depressione, pressione acustica negativa).

Pertanto si usa far riferimento al suo valore efficace

Pressione acustica (valore efficace)  $P_{\text{eff}}$

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [p(t)]^2 dt}$$

Nel caso di onda sinusoidale risulta

$$p_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

# Il suono – grandezze acustiche

**POTENZA sonora**      **W [W]**

Energia emessa dalla sorgente nell'unità di tempo.

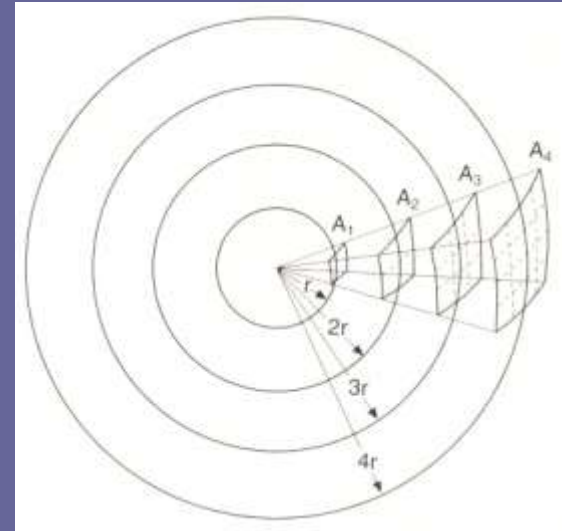
Immaginando una superficie intorno alla sorgente, è la quantità di energia che attraversa la totalità della superficie, nell'unità di tempo.

Si misura in Watt.

# Il suono – grandezze acustiche

## INTENSITA' acustica $I$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

Potenza che attraversa l'unità di area orientata normalmente alla direzione di propagazione: misura il flusso di energia sonora attraverso l'unità di area.



$W$  = potenza sonora (W)

$A$  = area ( $\text{m}^2$ )

$$I = W/A$$

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

$P$  = valore efficace della pressione sonora ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

$c$  = velocità del suono ( $\text{m}/\text{s}$ )

$\rho$  = densità del mezzo ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$\rho c$  = impedenza acustica caratteristica ( $\text{kg}/\text{s m}^2$ )

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

# Il suono – grandezze acustiche

**DENSITA' di energia sonora**    **D**    [W/m<sup>3</sup>]

Energia sonora che in un dato istante risulta localizzata nella unità di volume circostante un punto assegnato nel mezzo di propagazione.

Tra la intensità e la densità esiste la relazione:

$$I = cD$$

E quindi

$$D = I/c = P^2/\rho c^2$$

# Il suono – grandezze acustiche

Una sorgente sonora emette una potenza sonora.

La pressione sonora è l'effetto della emissione di potenza sonora da parte della sorgente.

Quello che noi percepiamo è la pressione sonora causata dalla potenza sonora, e la sensazione è legata essenzialmente ad essa.

Gli strumenti di misura rilevano la pressione sonora.



# Il suono – decibel

- Decibel

Un individuo di udito medio può percepire le emissioni sonore in un campo molto esteso di pressione: a 1000 Hz, da 20 microPascal a 20 Pascal (soglia del dolore).

La sensazione sonora è proporzionale al logaritmo della pressione.

# Il suono – decibel

Si introduce una scala logaritmica

“bel” =  $\text{Log}_{10}$  di un rapporto tra grandezze omogenee (A e B)

“bel” =  $\text{Log}_{10} (A/B)$

“decibel” =  $10 \text{Log}_{10} (A/B)$

# Il suono

Le grandezze acustiche si misurano con il “livello” misurato in decibel

**livello di pressione sonora  $L_p$**

= logaritmo del rapporto elevato al quadrato tra pressione sonora misurata e una pressione di riferimento

# Il suono

- Livello di pressione

$p_0$  è la pressione sonora di riferimento, pari alla soglia di udibilità a 1000 Hz,  $p_0=20 \mu\text{Pa}$

$$L_p = 10 \log (p / p_0)^2 \quad \text{in dB}$$

$$L_p = 20 \log (p / p_0) \quad \text{in dB}$$

$$p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 * 10^{-5} \text{Pa}$$

# Il suono

- Livello di potenza

$$L_w = 10 \log (W / W_0) \text{ in dB}$$

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

- Livello di intensità

$$L_i = 10 \log (I / I_0) \text{ in dB}$$

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

# Il suono

Intensità  
misurata in  
 $10^{-12} \text{ W/m}^2$

Livello di  
intensità  
sonora

Soglia di  
udibilità  
 $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$

Intensità acustica di vari rumori		
Sorgente	Intensità	Livello (dB)
Soglia di udibilità	1	0
Respiro normale	10	10 (appena udibile)
Stormire di foglie	$10^2$	20
Voce bisbigliata	$10^3$	30 (molto quieto)
Ristorante tranquillo	$10^4$	40
Ufficio silenzioso	$10^5$	50
Conversazione tra due persone	$10^6$	60
Interno di ufficio rumoroso	$10^7$	70 (disturbante)
Traffico stradale rumoroso	$10^8$	80
Autotreno (a 15 m)	$10^9$	90 (pericolo per esposi-
Cascate del Niagara	$10^9$	90 zioni prolungate)
Metropolitana	$10^{10}$	100
Complesso rock	$10^{11}$	110
Martello pneumatico	$10^{12}$	120 (soglia del dolore)
Fuoco di mitragliatrice	$10^{13}$	130
Decollo di un piccolo aereo	$10^{14}$	140
Galleria aerodinamica	$10^{15}$	150
Decollo di un grande aereo	$10^{17}$	170
Decollo del missile Saturno	$10^{19}$	190

# Il suono

- Relazione tra pressione, intensità e livello sonoro

<b>Pressione</b> <b>(<math>\mu\text{Pa}</math>)</b>	<b>Intensità</b> <b>(<math>\text{W}/\text{m}^2</math>)</b>	<b>Lívello</b> <b>sonoro</b> <b>(dB)</b>
20	0,000000000001	0
60	0,00000000001	10
200	0,0000000001	20
600	0,000000001	30
2000	0,00000001	40
20000	0,000001	50
60000	0,00001	60
200000	0,0001	70
6000000	0,001	80
2000000	0,01	90
60000000	0,1	100
200000000	1	110

# Il suono

**Decibel Arithmetic – Addition and Subtraction** Since decibel scales are logarithmic, sound power levels and sound pressure levels cannot be added or subtracted in the way that normal numbers can. For example, if two sound sources of 100dB are to be added, the procedure is as follows:

Source A: 100dB re  $10^{-12}$  watt = 0.01 watt

Source B: 100dB re  $10^{-12}$  watt = 0.01 watt

Total 0.02 watt

0.02 watt =  $2 \times 0.01$  watt, or in decibel terms

$$= 10 (\log 2 + \log 10^{10})$$

$$= 10 (0.3 + 10)$$

$$= 103\text{dB}$$

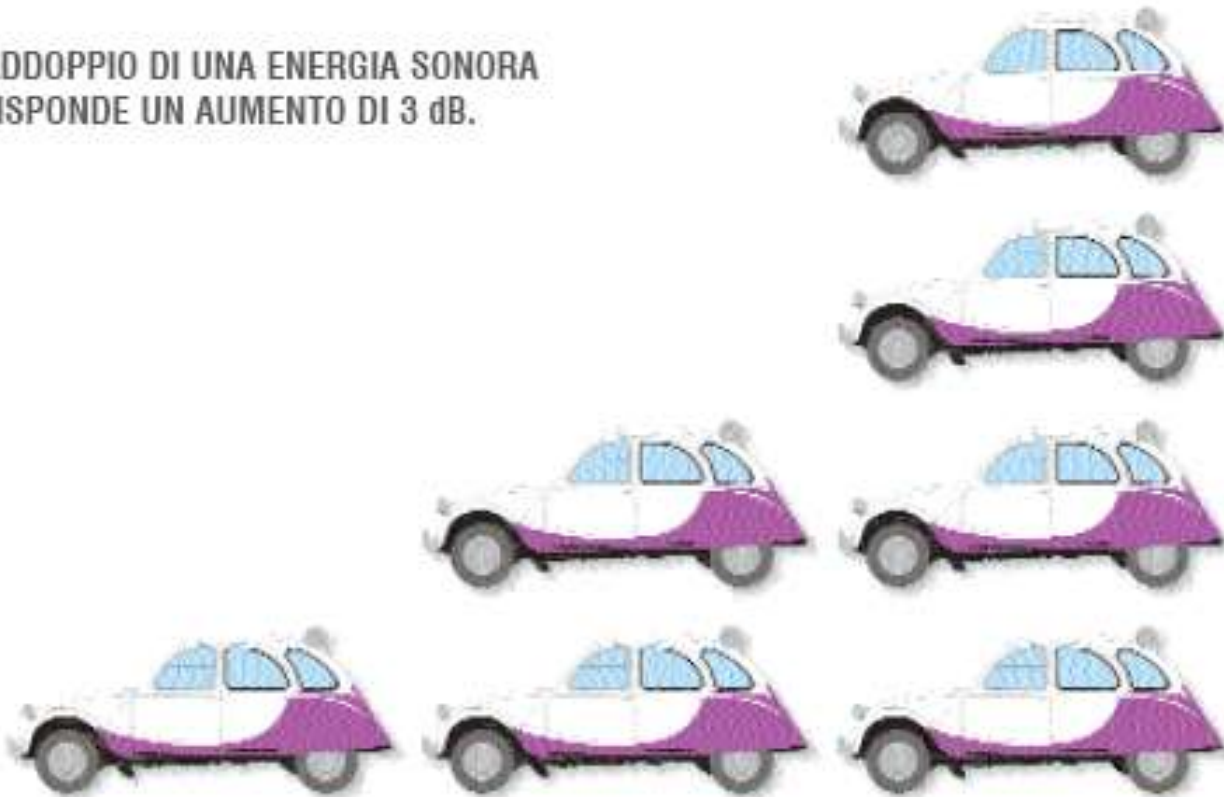
i.e. 100dB + 100dB = 103.

From this procedure, it can be seen that, when two identical levels are added, the result will be an increase in level of 3dB. When adding or subtracting decibels, therefore, the following table can be derived:



# Il suono

AL RADDOPPIO DI UNA ENERGIA SONORA  
CORRISPONDE UN AUMENTO DI 3 dB.



70 dBA

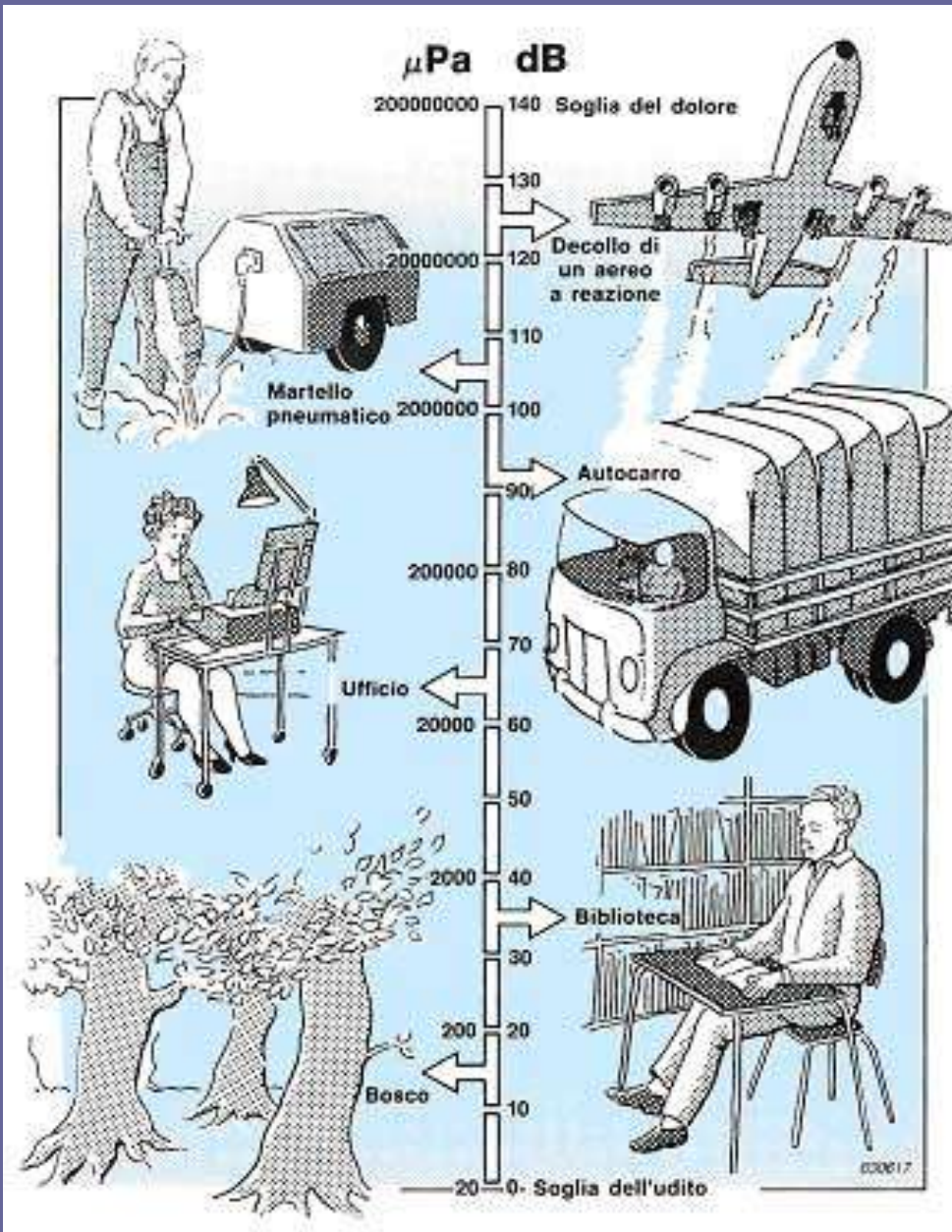
73 dBA

76 dBA

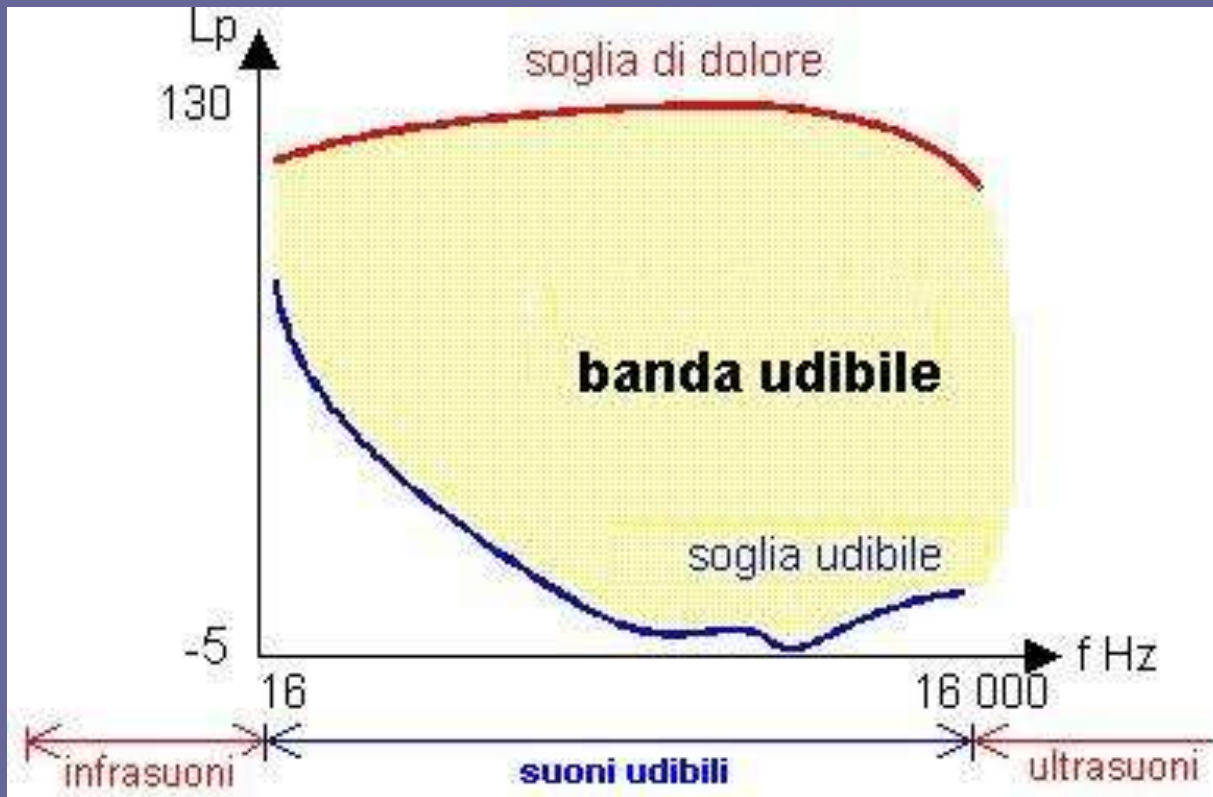
# Il suono

Livello del suono (dB)	Pressione sonora ( $\mu\text{Pa}$ )	Esempi	Fascia
140	200.000.000	motore jet	fascia dannosa
130	63.245.555	martello pneumatico	
120	20.000.000	veicolo ad elica	
<b>soglia del dolore</b>			
110	6.324.555	discoteca	fascia critica
100	2.000.000	macchinari industriali	
90	632.455	veicolo pesante	
80	200.000	traffico intenso	fascia di sicurezza
70	63.245	aspirapolvere	
60	20.000	uffici	
50	6.324	musica a basso volume	
40	2.000	biblioteca	
30	632	passi sulle foglie	
20	200	abitazione di notte	
10	63	"tic-tac" di un orologio	
0	20	soglia dell'udibile	

# Il suono



# Il suono

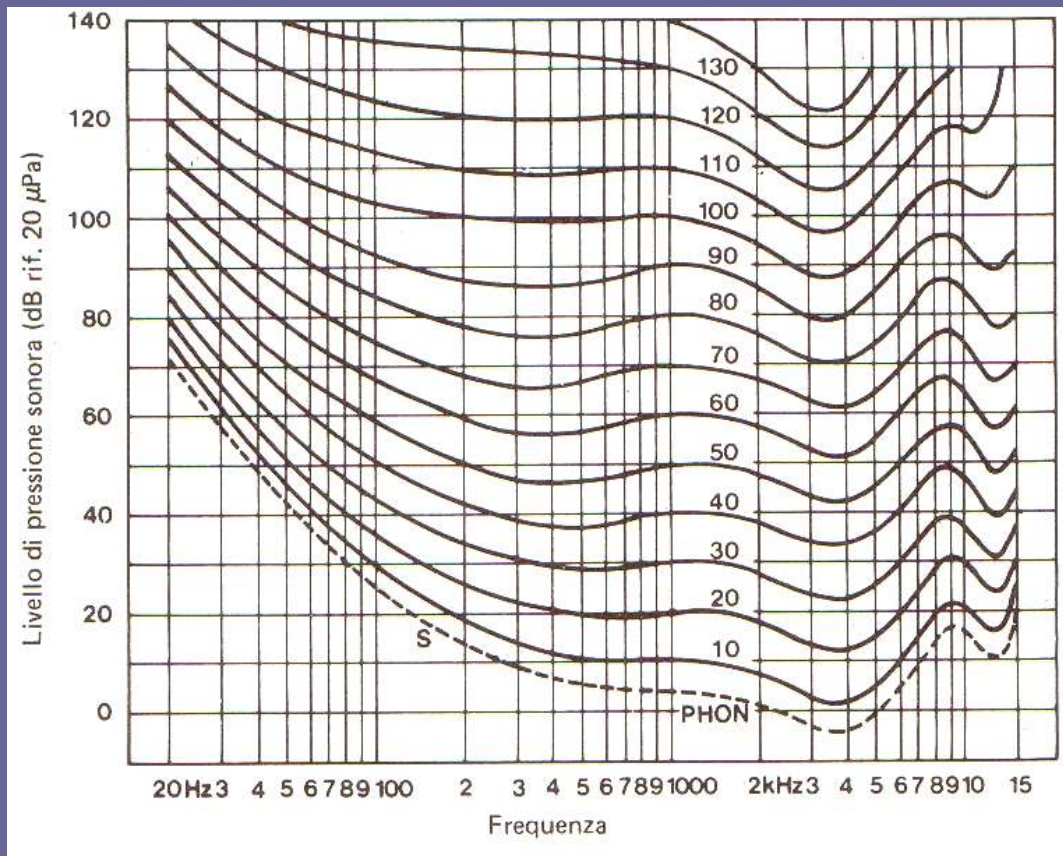


L'orecchio umano percepisce i suoni di freq. compresa tra circa 20 e 20000Hz, con livelli di pressione che vanno da 0 dB ( $20 \mu\text{PA}$ , soglia dell'udibile a 1000 Hz) a circa 130 dB.

Tale intervallo di suoni rappresenta il campo di udibilità dell'orecchio umano.

L'orecchio ha maggiore sensibilità alle frequenze medioalte, rispetto alle basse; per i suoni a bassa frequenza, la soglia di udibilità si trova a valori più elevati (il suono a bassa frequenza deve avere un  $L_p$  maggiore di quello a 1000 Hz per essere udito).

# Il suono



Il livello in phon (soggettivo) di un qualsiasi suono puro è pari al livello di pressione sonora in dB (oggettivo) del suono puro di riferimento a 1000 Hz che l'ascoltatore giudica equivalente per l'intensità soggettiva.

L'equivalenza dei suoni puri dal punto di vista della sensazione sonora è rappresentato nel diagramma a fianco, nel quale sono riportate le curve di uguale sensazione, o "Isofoniche".

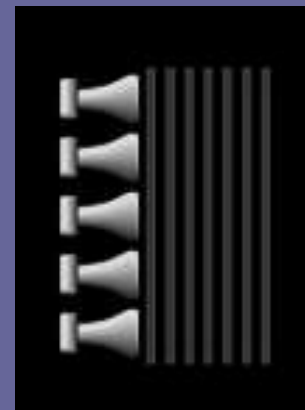
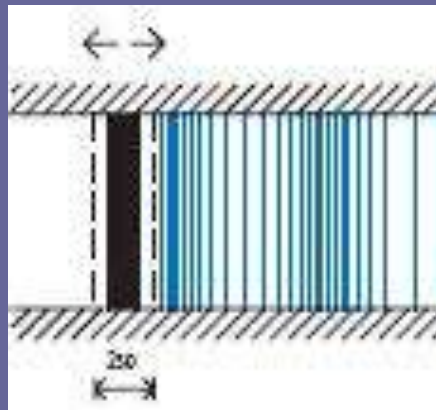
Si costruiscono facendo riferimento a sorgenti sonore emittenti suoni puri a diverse frequenze, all'interno del campo di percezione. Ogni curva è individuata da un valore di riferimento detto "phon".

Se il suono di riferimento (cioè alla frequenza di 1000 Hz) è ad esempio caratterizzato da un livello fisico di pressione sonora pari a 20 dB, tutti i suoni di frequenza diversa che producono la stessa sensazione fisica sono individuabili sulla stessa isofonica 20 phon.

# Il suono – Propagazione

La propagazione del suono può avvenire con varie modalità.

Per onde piane (es. Pistone in un cilindro, serie di altoparlanti,..): le onde si propagano tutte nella stessa direzione, e le grandezze acustiche (pressione, intensità,..) hanno tutte lo stesso valore in ogni sezione normale al fronte d'onda.



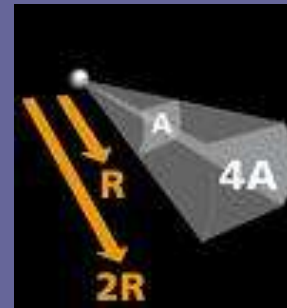
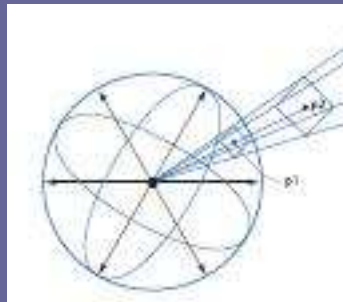
$I = W/S$  l'intensità non cambia allontanandosi dalla sorgente

# Il suono – Propagazione

## Propagazione per onde sferiche

$$I = W/S = W/4\pi r^2$$

$r$  distanza tra il fronte d'onda considerato e la sorgente, pari al raggio del fronte d'onda considerato.



## Propagazione per onde semisferiche

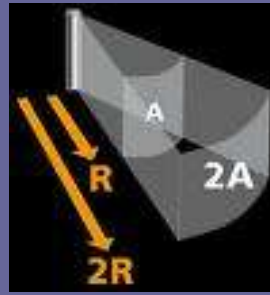
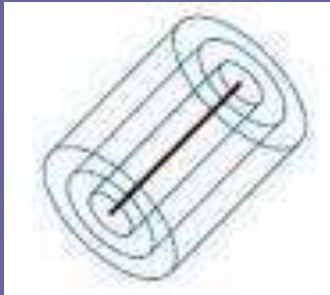
$$I = W/S = W/2\pi r^2$$

$r$  distanza tra il fronte d'onda considerato e la sorgente, pari al raggio del fronte d'onda considerato.

# Il suono – Propagazione

Propagazione per onde cilindriche

$I = W/S = W/2\pi r$        $r$  distanza tra il fronte d'onda considerato e la sorgente, pari al raggio del fronte d'onda considerato.



Propagazione per onde semicilindriche (sorgente lineare tipo strada o ferrovia di lunghezza unitaria)

$I = W/S = W/\pi r$        $r$  distanza tra il fronte d'onda considerato e la sorgente, pari al raggio del fronte d'onda considerato.



# Il suono – Propagazione

La intensità sonora nel caso di onde cilindriche, semicilindriche, sferiche e semisferiche diminuisce all'aumentare della distanza dalla sorgente.

# Il suono – Propagazione

## Sorgente sonora

**Puntiforme**, se piccola rispetto alla dimensione di  $\lambda$ , **Estesa** in caso contrario

La stessa sorgente può comportarsi come puntiforme alle basse frequenze e come estesa alle frequenze elevate.

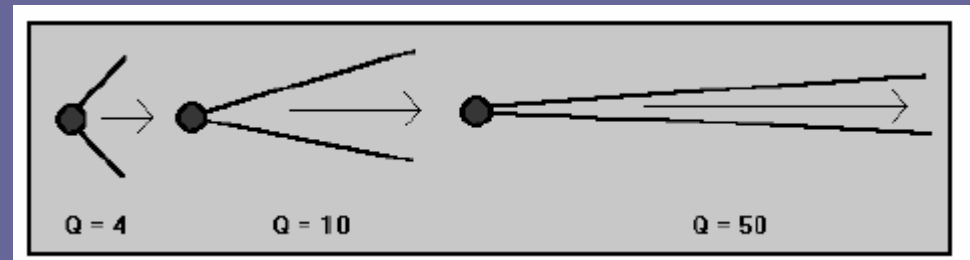
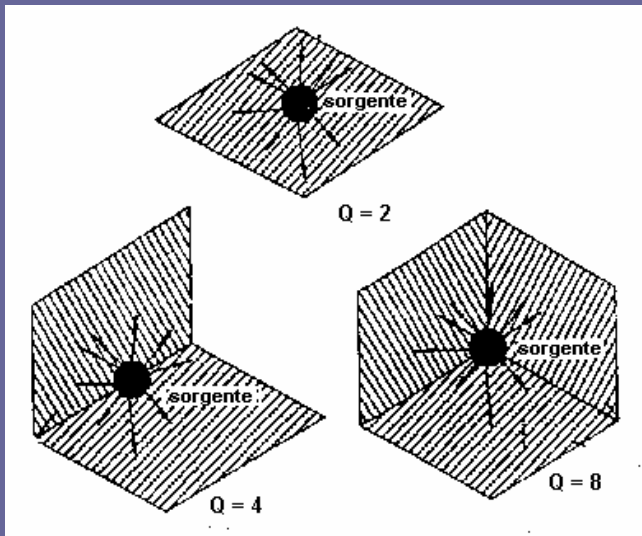
# Il suono - Propagazione

## Fattore di direzionalità della sorgente Q

Fattore di direttività : numero adimensionale, pari al rapporto tra l'intensità sonora generata dalla sorgente in un punto in una particolare direzione  $\theta$  e l'intensità sonora media

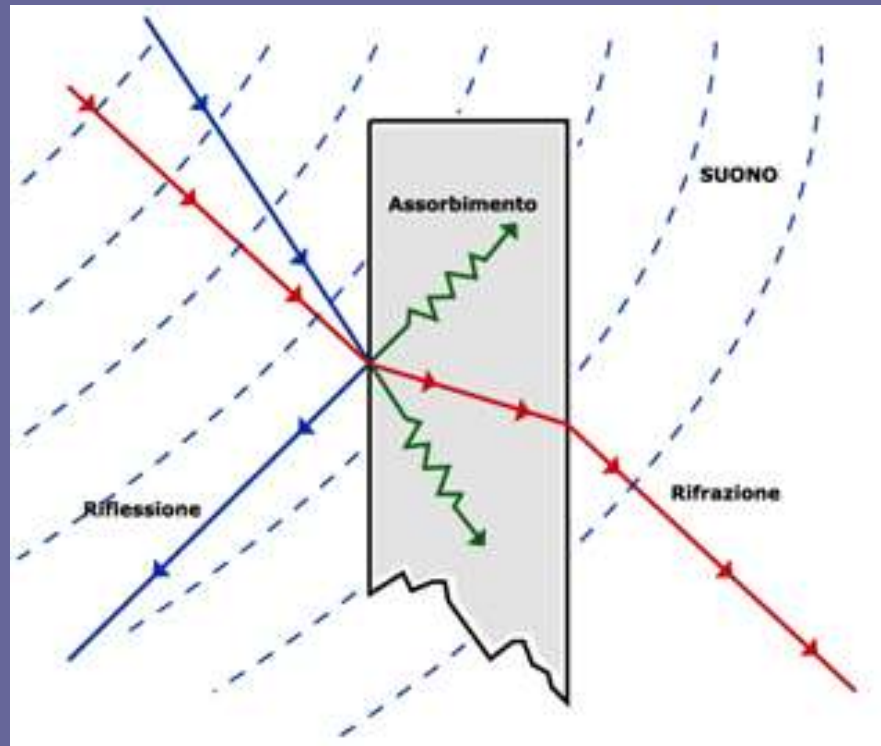
sferica nello stesso punto (intensità che verrebbe generata da una sorgente omnidirezionale), a parità di potenza della sorgente.

$$Q_{\theta} = I(\theta)/I_{\text{sfera}} = (p^2(\theta)/\rho c)/(W/4\pi r^2)$$



A parità di potenza, l'intensità generata da una sorgente direzionale in un punto è maggiore di quella generata da una sorgente omnidirezionale.

# Il suono - Propagazione



Quando l'onda sonora che si propaga in un mezzo incide sulla superficie di un altro mezzo, può essere riflessa, assorbita, o, se questa delimita uno strato, attraversarlo.

Il fenomeno è caratterizzato dai coefficienti  $r$ ,  $a$ ,  $t$ .

# Il suono - Propagazione

- ***a = coefficiente di assorbimento***
- ***r = coefficiente di riflessione***
- ***t = coefficiente di trasmissione***

Se  $I$  è l'energia sonora incidente, vale:

$$I = I_a + I_r + I_t$$

*quindi*

$$a + r + t = 1.$$

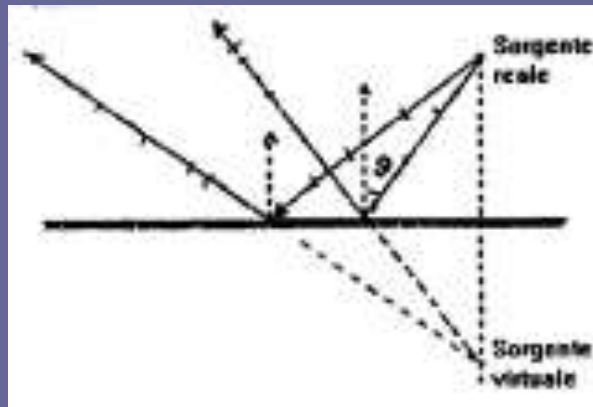
Attenzione a non confondere i termini:

**Fonoisolante** = che attenua la trasmissione del suono

**Fonoassorbente** = che attenua la riflessione del suono

# Il suono - Propagazione

Quando l'onda sonora investe la superficie di separazione tra due mezzi aventi proprietà acustiche diverse si assiste al fenomeno della riflessione e della rifrazione. Il raggio riflesso è complanare a quello incidente, e forma con la normale alla superficie nel punto di incidenza un angolo di riflessione uguale a quello di incidenza.



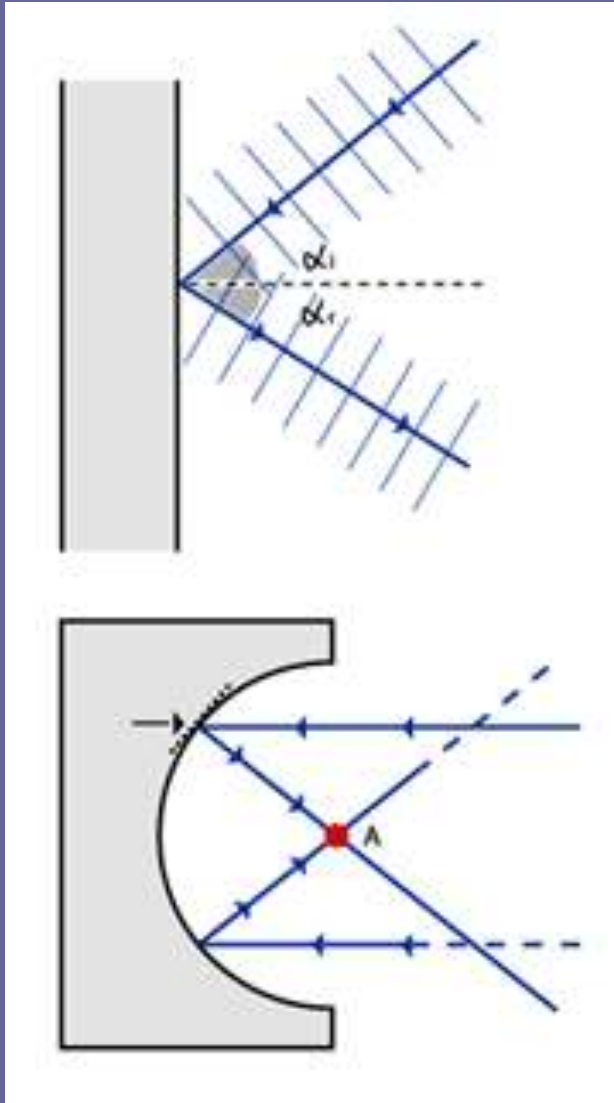
# Il suono - Propagazione

Riflessione regolare o speculare

- $\lambda \ll$  dimensioni ostacolo
- superficie “liscia”, cioè  $\lambda \ll$  dimensioni scabrezza dell'ostacolo

Un solo raggio riflesso.

# Il suono - Propagazione



Attenzione alla  
concentrazione del  
suono in superfici  
concave



# Il suono - Propagazione

## Rifrazione

Il raggio rifratto, che penetra nel secondo mezzo, ha una direzione che dipende dall'angolo di incidenza e dalla velocità del suono nei due mezzi.

Legge di rifrazione :

$$\sin\theta_1 / \sin \theta_2 = c_1 / c_2$$

$c_1$  ,  $c_2$  = velocità del suono nei due mezzi (i.e.: due strati d'aria a diversa temperatura)

# Il suono - Propagazione

Quando il secondo mezzo è costituito da una parete, con spessore modesto rispetto alla estensione della superficie, l'energia sonora incontra una duplice discontinuità costituita dalle due facce della parete. Parte dell'energia in queste condizioni attraversa la superficie e esce dalla faccia opposta, mentre la parte restante viene assorbita dalla parete stessa.

# Il suono - Propagazione

Tali fenomeni di propagazione possono essere studiati mediante semplici metodi geometrici (acustica geometrica).

Tuttavia nei casi pratici le ipotesi che  $\lambda \ll$  superficie di separazione dei due mezzi e che la superficie sia “liscia”, cioè  $\lambda \ll$  dimensioni della scabrezza della sup. dell'ostacolo e quindi tali metodi sono raramente applicabili, visto l'ampio campo di valori che possono assumere le lunghezze d'onda delle onde sonore, che vanno da 17 m (20 z) a 1,7 m (20000 Hz).

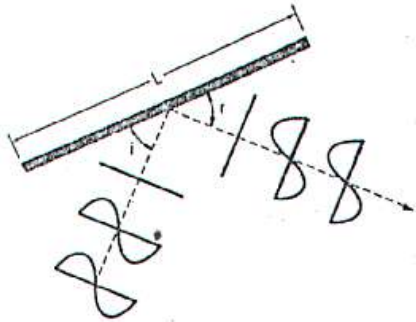
# Il suono - Propagazione

Quando una sola di queste condizioni non è soddisfatta, si manifestano il fenomeno della diffusione o della diffrazione.

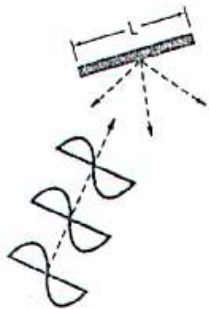
**Diffusione:** riflessione in tutte le direzioni

Di solito si verifica la diffusione agli estremi della banda di freq.: alle basse per le dimensioni limitate delle sup. riflettenti, alle elevate per la presenza di irregolarità superficiali e di oggetti di arredamento.

# Il suono - Propagazione



(A) Reflection: wavelength is less than  $L/2$ ; angle  $i$  is equal to the angle  $r$ .



(B) Diffusion: wavelength equals  $L$ .

Riflessione: lunghezza d'onda minore di 2 volte la dimensione dell'oggetto.

Diffusione: asperità sulla superficie di dimensione paragonabile alla lunghezza d'onda (almeno  $\frac{1}{4}$ ).

# Il suono - Propagazione

## Diffrazione



(C) Diffraction: wavelength is greater than  $2L$ .

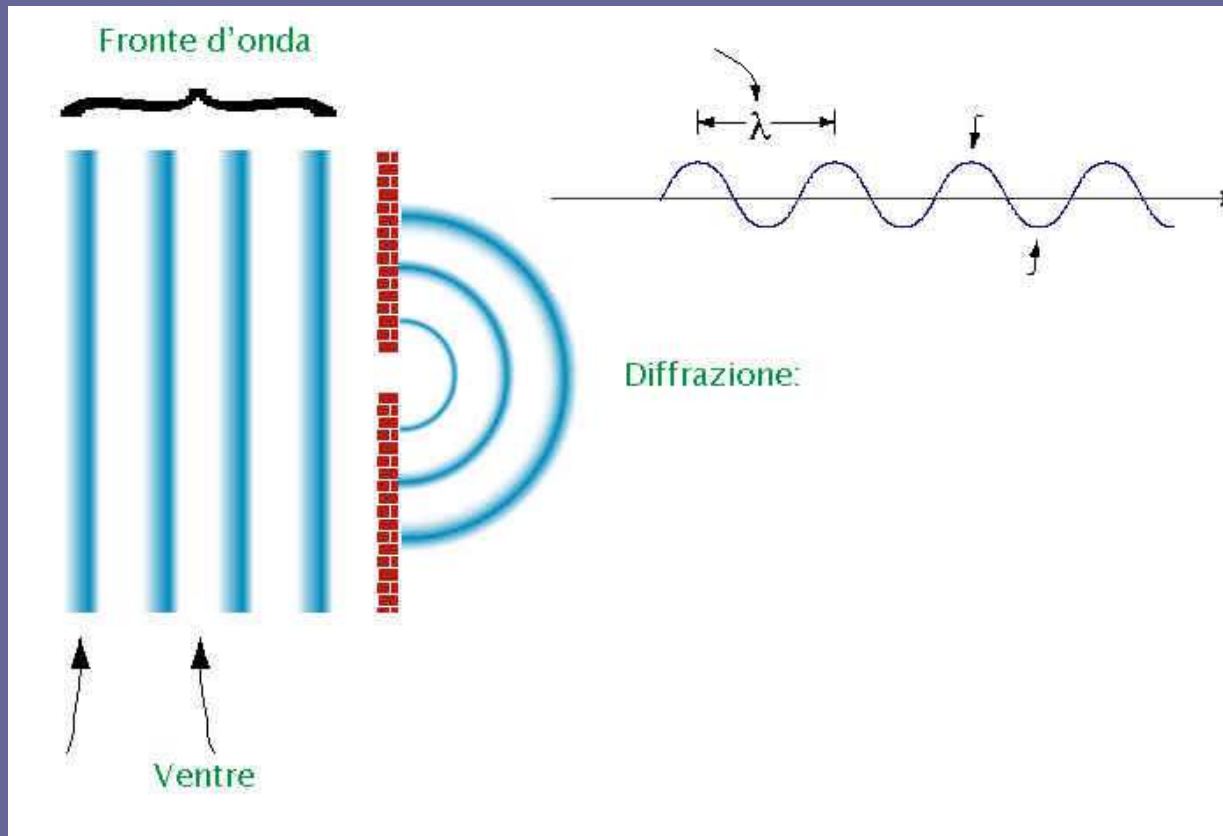
Diffrazione: lunghezza d'onda più grande di 2 volte l'oggetto, o in presenza degli spigoli.

Suoni gravi, alta  $\lambda$ - superano facilmente ostacoli es. testa – pertanto è più difficile riconoscerli per l'orecchio umano

Comuni ostacoli (un albero, un muretto, una colonna) hanno dimensioni piccole rispetto alla lunghezza d'onda di gran parte dei suoni usati nel parlato e nella musica. È per tale motivo che il suono li aggira facilmente.

# Il suono - Propagazione

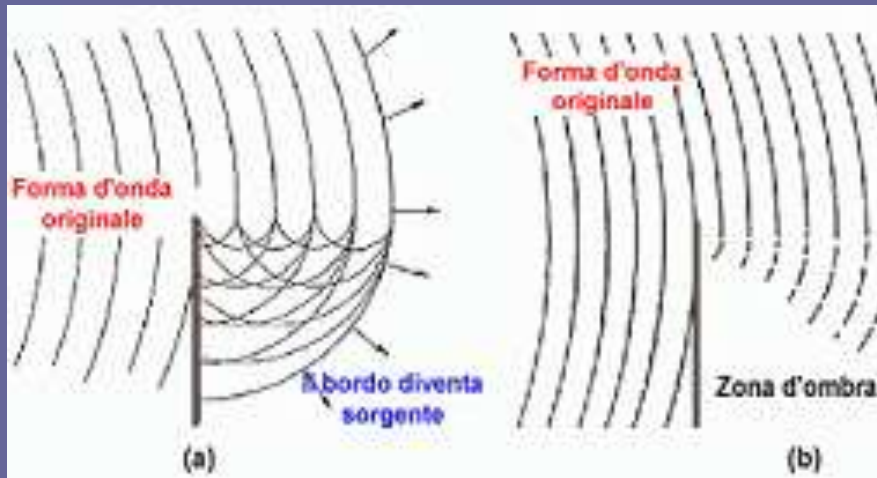
Fenomeni di diffrazione provocata da un'apertura circolare, con  $\lambda$  paragonabile alla dimensione dell'apertura



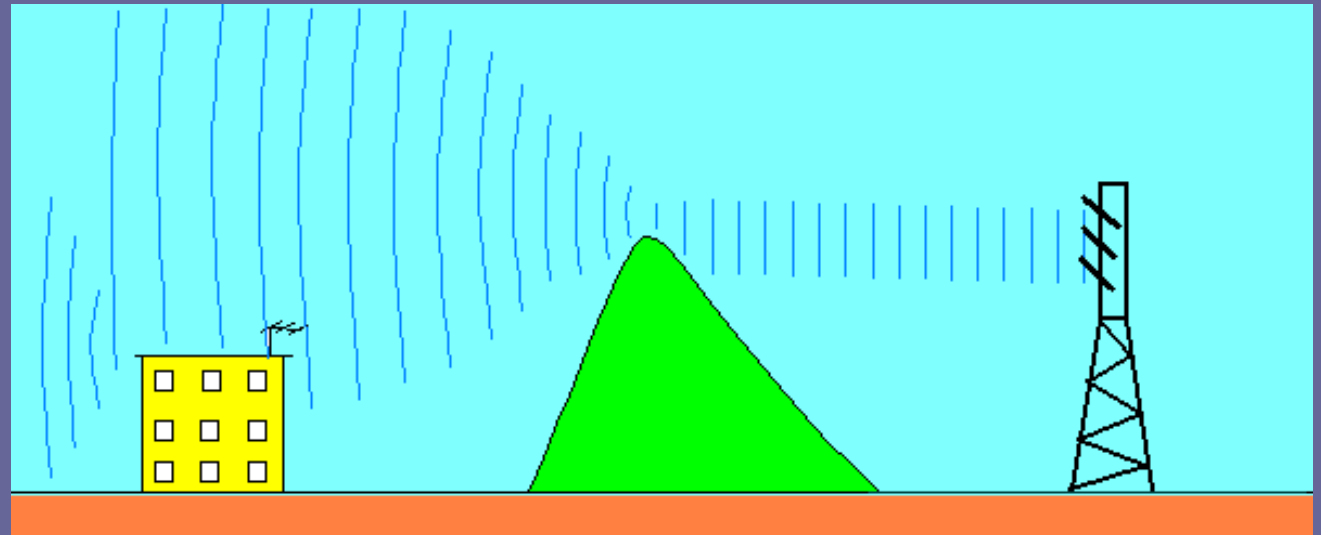
# Il suono - Propagazione

$L < \lambda$

$L > \lambda$

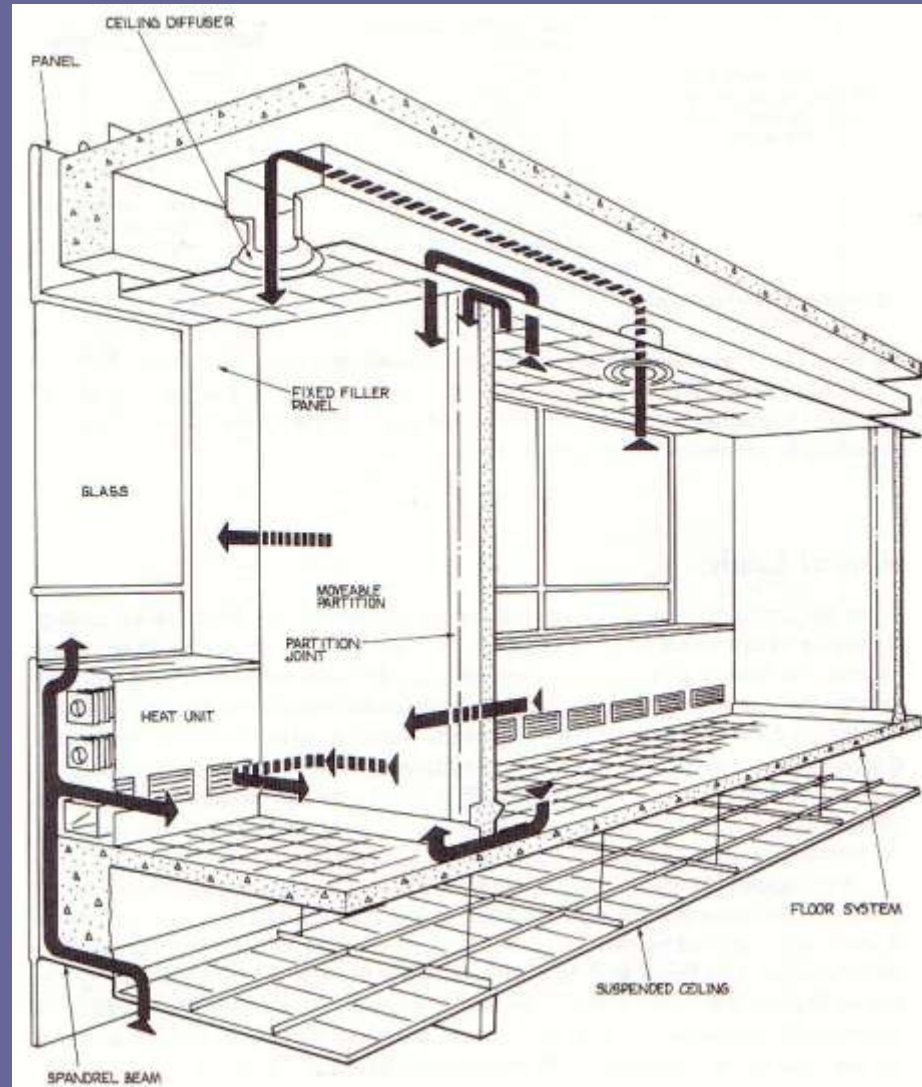


Diffrazione





# Il suono - Propagazione



Acustica dei  
suoni non  
desiderati

Modalità di  
trasmissione  
del rumore  
tra 2 ambienti  
limitrofi

# Il suono - Propagazione

**Campo sonoro:** è l'insieme dei valori che in ogni istante assumono le grandezze acustiche nei vari punti del mezzo interessato

**Campo libero:**

**Si verifica quando esistono solamente le onde sonore direttamente irradiate dalla sorgente, non ci sono onde riflesse**

E' una situazione limite che non si verifica mai, anche negli spazi aperti in genere c'è una parziale riflessione del suolo

All'aperto ci sono anche comunque altri fenomeni che inducono variazioni nelle caratteristiche del suono come i gradienti di temperatura, i venti, l'assorbimento dell'aria, barriere naturali...

# Il suono - Propagazione

- **Campo sonoro**

## Campo **riverberato**

**Caratterizza la propagazione negli ambienti confinati, in cui è presente il fenomeno della riverberazione, conseguenza dei successivi rinvii dell'energia sonora da parte delle pareti di confine e degli eventuali oggetti in ambiente. L'insieme delle onde riflesse costituisce il campo di riverberazione.**

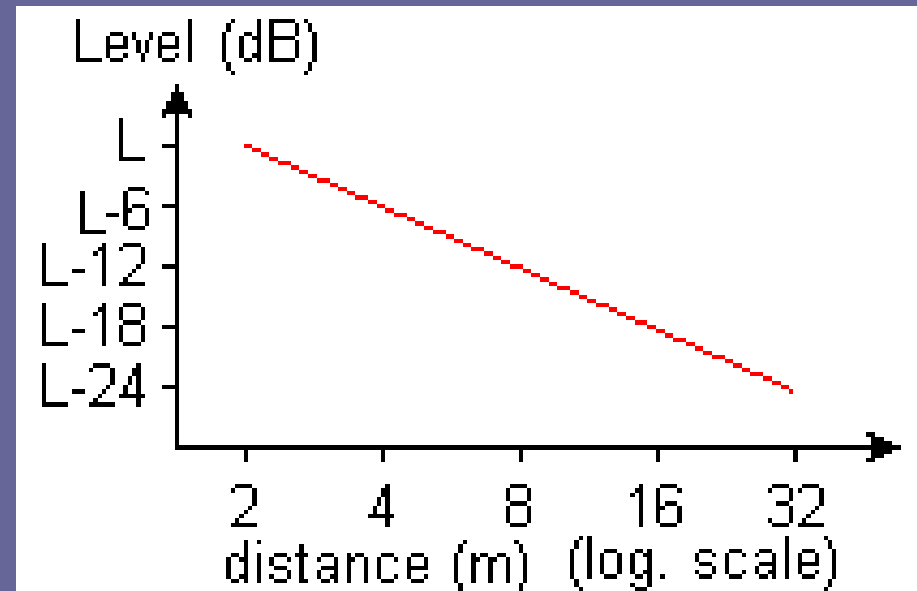
In un ambiente confinato, il campo sonoro risulterà dalla sovrapposizione del campo diretto e di quello riverberato.

# Il suono - Propagazione

- **Campo libero**

- In una zona aperta si può supporre che non ci siano riflessioni. Il livello di intensità acustica dipende dalla *potenza sonora* della sorgente, dalla *direzionalità*  $Q$ , dalla *distanza* dell'ascoltatore dalla sorgente.
- Nel caso di propagazione per onde sferiche,  $L_p$  diminuisce all'aumentare della distanza tra sorgente e ricevitore.

- Il livello di pressione diminuisce di 6 dB per ogni raddoppio della distanza



# Il suono - Propagazione

$$L_p = L_w - 10 \log_{10} (4\pi^2 d) + 10 \log_{10} Q$$

Differenza di livello tra due punti posti a distanza  $d$  e  $2d$  (doppio) dalla sorgente: svolgendo risulta che la differenza è pari a 6db

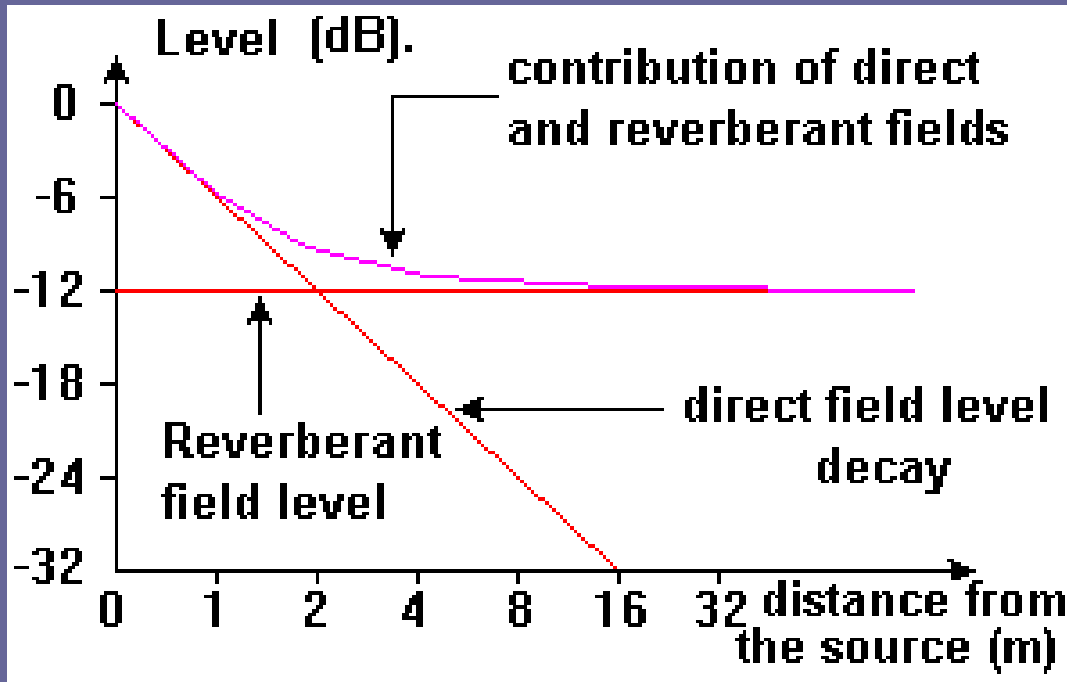
$$L_{p1} - L_{p2} = L_w + 10 \log_{10} [Q/(4\pi^2 d_1)] - [L_w + 10 \log_{10} [Q/4\pi^2 (2d_1)]] = 20 \log_{10} (2d_1/d_1)$$

In generale, noto il livello di pressione in un punto 1 a distanza  $d_1$  dalla sorgente, si può ricavare il livello in un punto 2 a distanza  $d_2$ .

$$L_{p2} = L_{p1} - 20 \log_{10} (d_1/d_2)$$

# Il suono - Propagazione

- **Campo riverberato**



In un ambiente chiuso, il suono che un ascoltatore percepisce dipende dalla *potenza sonora* della sorgente e dalle sue caratteristiche di *direzionalit *, dalla *distanza*, dal *volume* e dalla *forma* dell'ambiente, dalle *caratteristiche fonoassorbenti* dell'ambiente.

C'  una sovrapposizione tra campo diretto e campo riverberato; al variare della distanza dalla sorgente si ha una prevalenza dell'uno o dell'altro.

# Il suono - propagazione

Nel campo riverberato si somma l'effetto del campo diretto con quello delle riflessioni, legato ad un parametro detto costante d'ambiente, che dipende dall'assorbimento medio in ambiente.

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

(per sorgente puntiforme)

$$R = \frac{\sum S_i \cdot a_m}{1 - a_m}$$

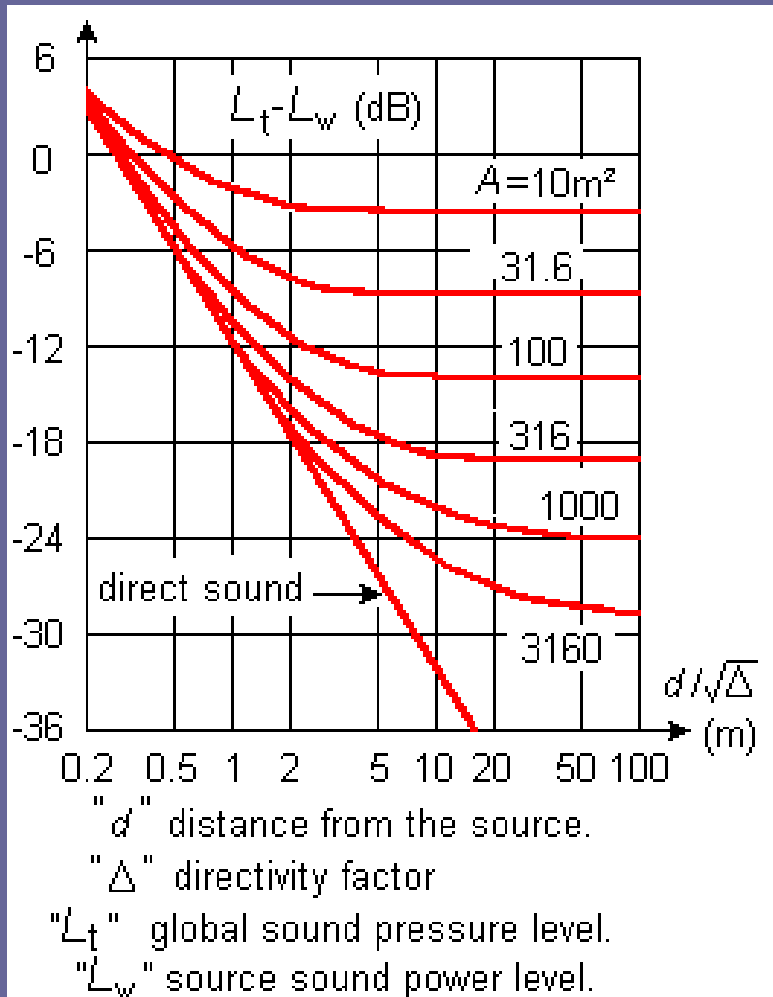
$$a_m = \frac{\sum S_i \cdot a_i + \sum A_i}{\sum S_i}$$

**R** costante di ambiente

**$a_m$**  coefficiente di assorbimento medio

# Il suono - propagazione

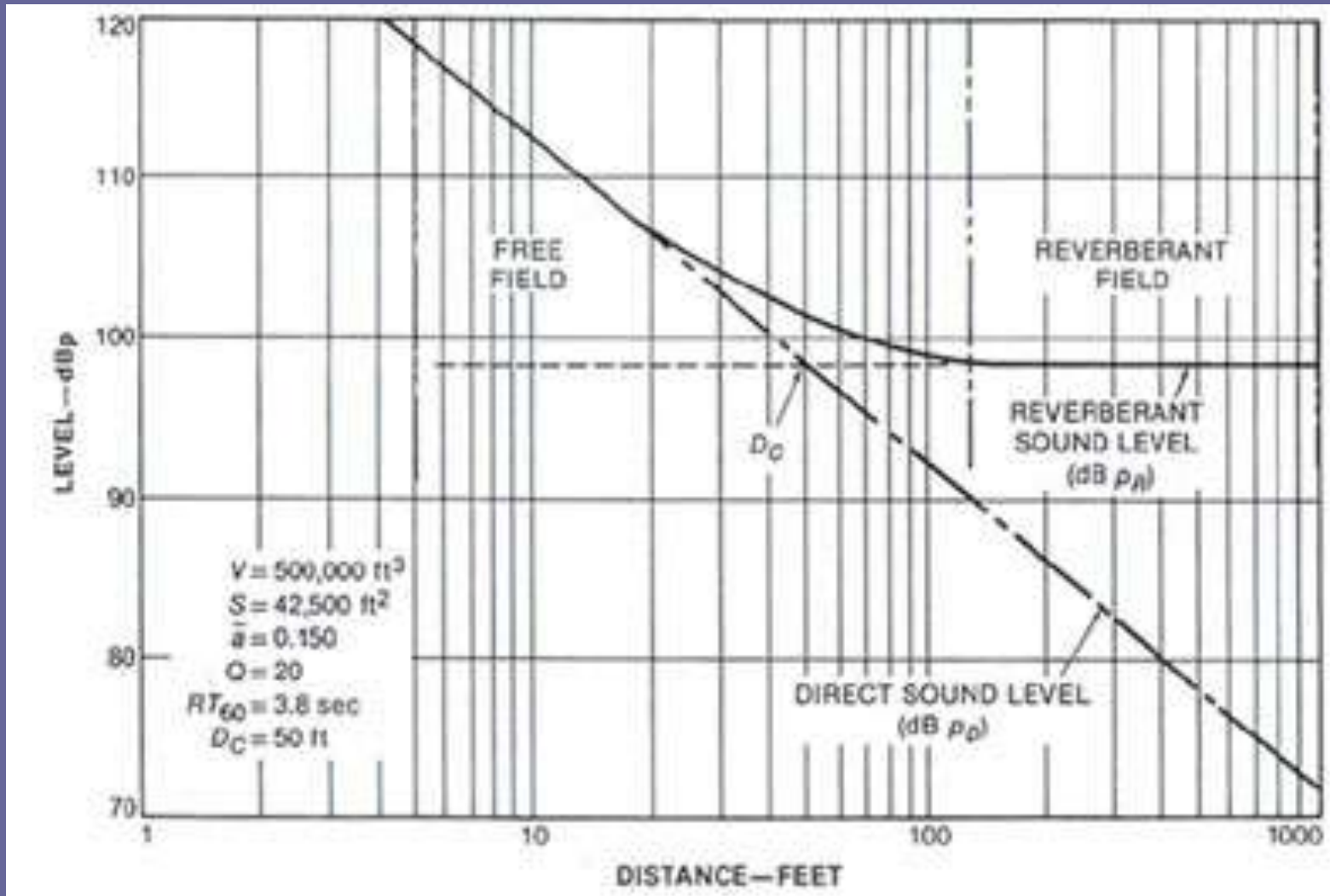
- Campo riverberato



Per bassi valori dell'assorbimento (bassi valori di  $R$ - elevata riverberazione) il livello di pressione sonora tende ad un valore pressochè costante ad una distanza relativamente piccola dalla sorgente. Per  $R$  elevati (elevato assorbimento, scarsa riverberazione) il livello di pressione mantiene un andamento prossimo a quello di campo libero fino a distanze più elevate dalla sorgente, dove è minore la prevalenza del campo diretto.



# Il suono - propagazione



# Bibliografia

Barducci I. – Acustica applicata, Ed. ESA, 1981

Bianchi F., Carratù R. – L'acustica in architettura, Ed. Cittàstudi, 2007

Santoboni S., Moncada lo giudice G. - Acustica, Ed. Masson, 1995

Manuale di acustica applicata a cura di R. Spagnolo, Ed. UTET, 2001

Simone Secchi - Fondamenti di acustica edilizia 1- Stima delle prestazioni acustiche passive degli edifici e dei loro componenti

[http://www.dpmpe.unifi.it/fisica\\_tecnica](http://www.dpmpe.unifi.it/fisica_tecnica)

Architecture for acoustics

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

Frova A., Nuovo Auditorium di S. Cecilia, anatomia di una megaopera