

L'acustica è una disciplina scientifica che si occupa delle caratteristiche dei suoni, cioè studia come gli effetti sonori si producono e si propagano. Inoltre opera sulla scala logaritmica dei **decibel** [dB].

## IL SUONO

Il suono è un fenomeno fisico che stimola il senso dell'udito: esso è provocato dal rapido movimento (vibrazione) di un qualsiasi corpo (una corda, un elastico, un pezzo di legno, una colonna d'aria, ecc.).

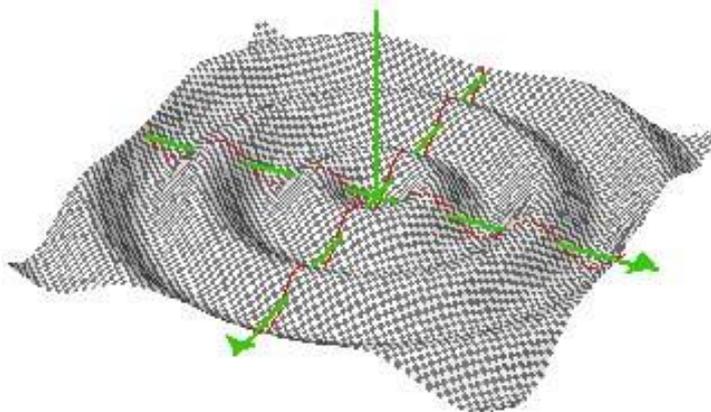
I suoni sono onde create da vibrazioni ottenute in migliaia di modi diversi, che generano una **variazione di pressione** che si propaga all'interno di un mezzo materiale senza trasporto di materia, (ad es. nel vuoto non c'è suono).

## LA PROPAGAZIONE SONORA

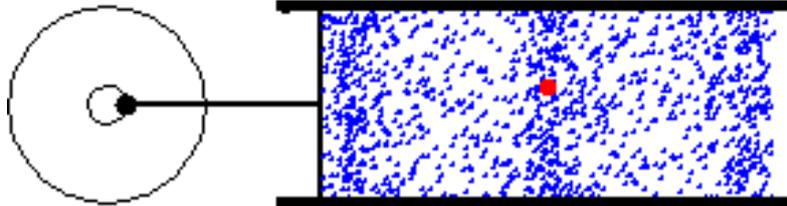
Il suono è un fenomeno fisico, non un oggetto. Per esistere ha bisogno di una **sorgente**, cioè di un **corpo vibrante** e di un **mezzo elastico** di propagazione in cui le onde possano viaggiare. Aria, acqua, legno, metalli, cemento, mattoni e vetro possono vibrare e propagare le onde sonore.

Abbiamo quindi un primo dato di fatto: all'origine del suono c'è un corpo vibrante.

Vibrando, questo corpo trasmette le proprie vibrazioni al mezzo che lo circonda (nel nostro caso, l'aria). L'energia sonora, quindi, è un'energia meccanica (o cinematica) che, partendo dalla sorgente, si irradia sotto forma di onde attraverso il mezzo di propagazione fino all'ascoltatore, senza trasporto di materia.



## LA SORGENTE SONORA E IL SUO MODELLO



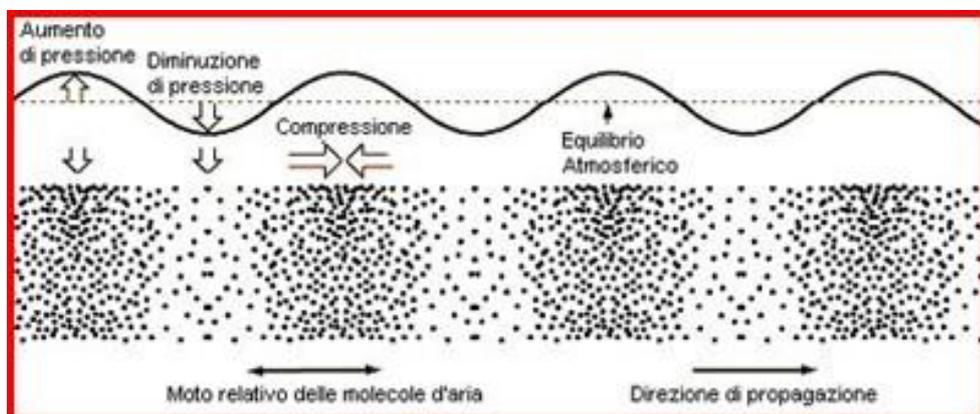
Per comprendere l'origine fisica del suono consideriamo un pistone che oscilla periodicamente grazie ad un albero rotante; il rapido succedersi di compressioni ed espansioni genera un movimento delle particelle del mezzo elastico: le particelle mosse dal pistone provocano, grazie a una reazione a catena, il movimento delle particelle contigue che generano onde meccaniche di tipo longitudinale.

Mentre le singole particelle oscillano continuamente attorno alla loro posizione iniziale (moto locale, *particle velocity*) l'onda generata si muove a velocità costante (moto d'insieme – *sound speed*).

La “*sound speed*” della suddetta onda è una costante fisica, detta  $C_0$ , e dipende solo dal mezzo elastico attraverso il quale si propaga.

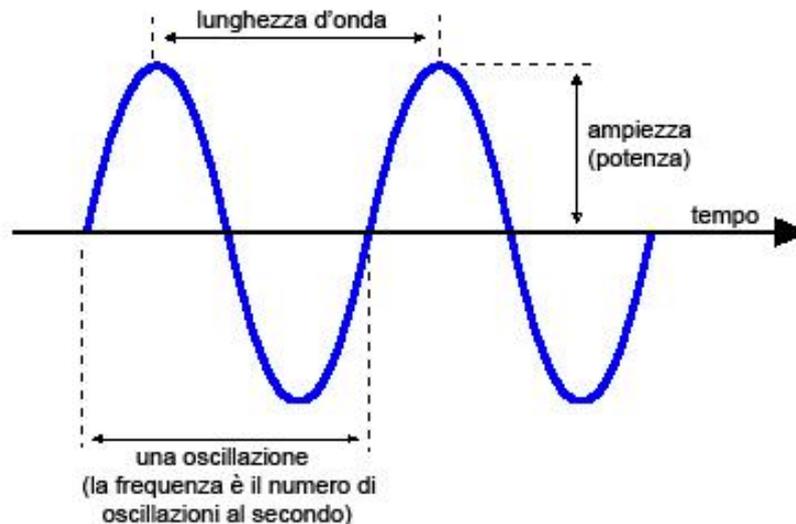
Il moto delle particelle genera l'onda ed il suono si propaga sotto forma di onda sonora.

Le onde sonore prodotte provocano dei movimenti periodici delle molecole d'aria formando strati alternati di aria compressa e rarefatta che si propagano in tutte le direzioni fino ad arrivare al nostro orecchio; lo stesso accade quando si parla, poiché si sposta una quantità finita di aria.



## GRANDEZZE FISICHE DEL SUONO

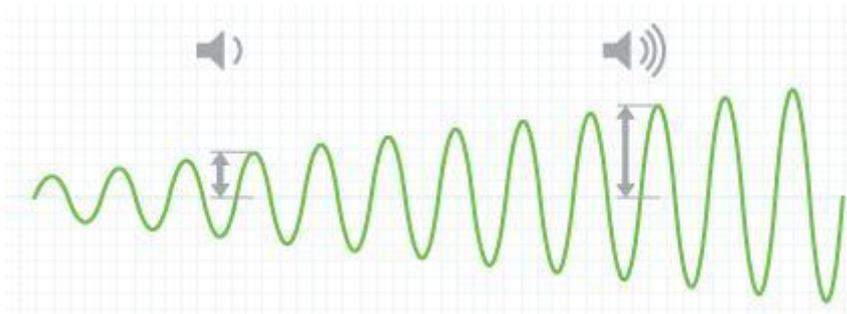
Il suono è caratterizzato da alcune grandezze fondamentali quali l'ampiezza, la frequenza (o periodo di oscillazione), la lunghezza d'onda e la velocità di propagazione nel mezzo attraversato.



### *Ampiezza dell'Onda:*

L'ampiezza delle fluttuazioni della pressione sonora è la caratteristica che ci permette di distinguere i suoni forti da quelli deboli; in pratica quello che comunemente chiamiamo il "volume" del suono. L'orecchio umano è sostanzialmente un sensore di pressione. Normalmente però non si utilizza l'ampiezza della fluttuazione di pressione sonora espressa in Pa (pascal) per misurare la sensazione sonora percepita dall'uomo, si usa invece convertire tale valore di pressione sonora nella **scala logaritmica dei dB** (decibel), definendo così il Livello di Pressione Sonora (SPL, Sound Pressure Level). La pressione acustica necessaria perché un suono sia udibile dall'orecchio umano varia a seconda della frequenza dei suoni.

Un suono di 1.000 Hz è udibile a "0 dB", mentre scendendo a 30 Hz occorre un livello di pressione sonora di almeno 60 dB perché il suono sia udibile. L'esposizione prolungata a livelli di pressione sonora superiori agli 85 dB può causare forti disturbi o addirittura sordità permanente.



**Frequenza:**

L'altezza percepita dei suoni dipende dalla **frequenza (f)**, cioè dal numero delle oscillazioni che si verificano in un dato tempo (un secondo), quanto più numerose esse sono, tanto più acuto è il suono. La frequenza si misura in "Hertz" [Hz]; il termine Hertz si riferisce al nome del fisico tedesco che per primo studiò questi fenomeni.

Un Hertz corrisponde ad un'oscillazione completa nel tempo di un secondo.

Dire che un suono è di 300 Hz significa che il corpo che lo produce vibra 300 volte al secondo. In natura esistono suoni che vanno da un minimo di 1 Hz a un massimo di circa 1.000.000 Hz. L'orecchio umano può solo sentire i suoni compresi tra 20 e 20.000 Hz.

I suoni di frequenza inferiore ai 20 Hz vengono chiamati infrasuoni; quelli superiori ai 20.000 Hz vengono chiamati ultrasuoni. Molti animali sono in grado di udire questi tipi di suono, perché dotati di un udito con campo di frequenza più esteso di quello umano.

**PERIODO (T):** Si definisce periodo il tempo necessario per compiere un ciclo completo, anche definito come inverso della frequenza.

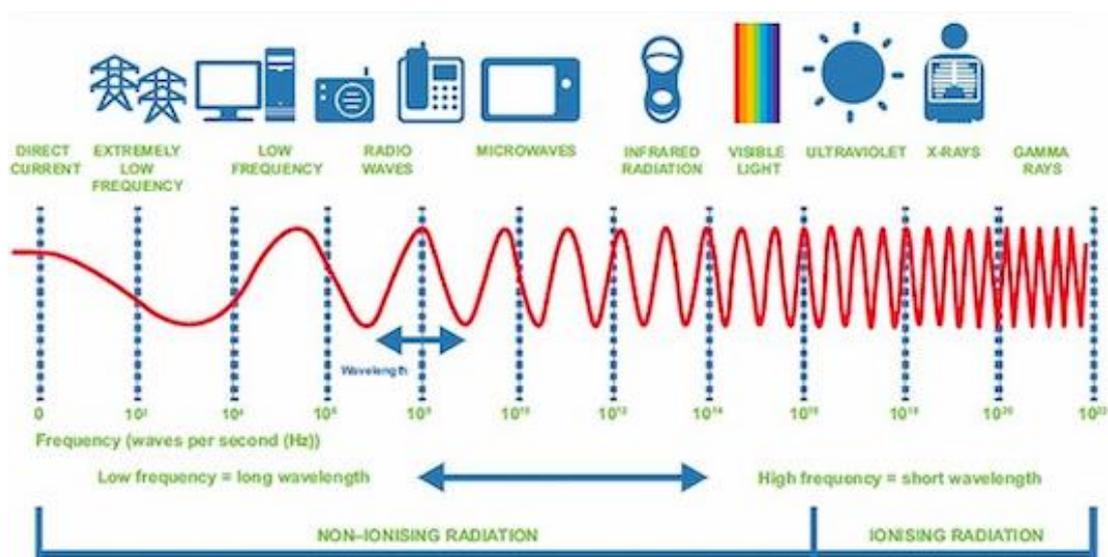
$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ed} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad [\text{Hz}]$$

dove:

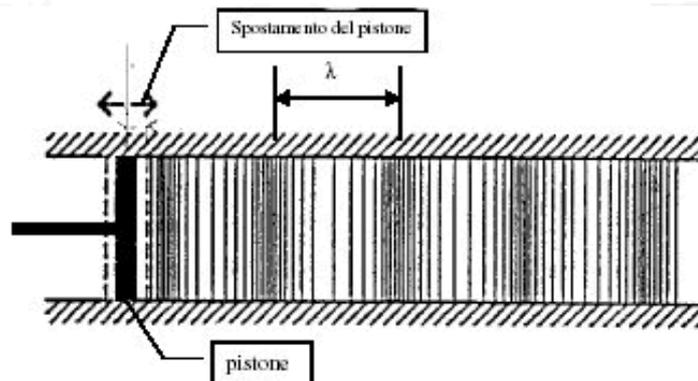
T è il periodo

f è la frequenza

$\omega$  è la velocità angolare



## GRANDEZZE CINEMATICHE DEL SUONO



*Spostamento:*

$$s(t) = s_0 \cdot \cos(\omega t)$$

Con  $s_0$  si intende il valore dello spostamento massimo della superficie vibrante, determinata dalla corsa del pistone che va avanti ed indietro.

*Velocità delle particelle  $\vec{v}$ :*

$$\vec{v} = \frac{ds}{dt} = -\omega s_0 \cdot \sin(\omega t)$$

La velocità delle particelle, essendo un vettore, permette agli animali aventi organi predisposti, come l'uomo, di percepire da quale direzione proviene il suono.

*Velocità del suono  $c_0$ :*

La velocità delle particelle  $\vec{v}$  (particle velocity) non va confusa con la velocità del suono (sound speed)  $c_0$ .

$$C_0 = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$$

dove:

- coefficiente di dilatazione adiabatica  $\gamma = 1.41$
- costante universale dell'aria  $R = 287 \text{ [J / kgK]}$
- temperatura assoluta  $T = 273 + t \text{ [K]}$

La velocità del suono dipende dalla temperatura.

Nell'aria, per esempio:

$$t = 20^\circ\text{C} \text{ quindi } T = t + 273(\text{K}) = 293 \text{ K}$$

$$\gamma = 1.41$$

$$R = 287 \text{ [J / kgK]}$$

$$C_0 = 344,34 \text{ [m / s]}$$

Nell'acqua distillata, per esempio:

Temperatura $T_c$ [°C]	Velocità del suono $c$ [m/s]
0	1407
10	1449
20	1484
30	1510

Sott'acqua, a causa della maggiore velocità di propagazione, diventa impossibile capire la direzione del suono.

Nelle strutture solide, per esempio:

Materiale	Densità $\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Velocità del suono $c$ [m/s]
Acciaio	7800	5000
Alluminio	2700	5820
Calcestruzzo	2000 – 2600	3500 – 5000
Gomma	1010 – 1250	35 – 230
Legno	400 – 700	3300
Marmo	2600	3800
Mattoni pieni	2100	3600
Piombo	11300	1260
Rame	8900	4500
Sabbia	1600	1400 – 2600
Stagno	7280	4900
Sughero	240	480
Vetro	2300 – 5000	4000 – 5000
Zinco	7100	3750

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Dove:

$E$  è il modulo elastico del materiale [ N / m<sup>2</sup> ]

$\rho$  è la densità del materiale [ kg / m<sup>3</sup> ]

I materiali con la maggiore capacità di propagazione sono acciaio e alluminio, a differenza del sughero e della gomma, ad esempio, che attutiscono molto il suono.

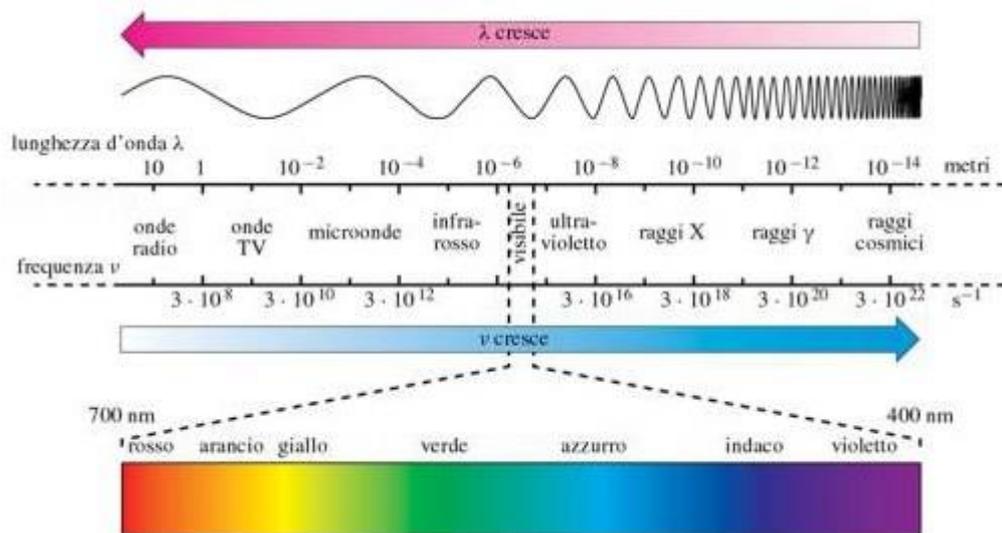
Il materiale solido noto con maggiore velocità di propagazione è il legno d'abete, nella direzione delle fibre.

Il suono è fatto di velocità (causa del fenomeno) e di pressione (effetto). In un caso monodimensionale, la velocità è un vettore che si sviluppa lungo l'asse x, mentre nella realtà, per avere l'informazione completa del campo sonoro, si compie una registrazione a quattro canali ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ,  $p$ ). La pressione  $p$  è in forma scalare e vale 1.

Le proprietà elastiche del mezzo determinano la velocità del suono e quindi anche la **lunghezza d'onda ( $\lambda$ )**; essa è la distanza che separa i due massimi, ossia si rileva da picco a picco, di un'onda sinusoidale "fotografata" nel suo sviluppo spaziale in un certo istante.

Può essere calcolata come  $\lambda = \frac{c_0}{f}$  [m]

Frequenza e lunghezza d'onda hanno un rapporto di inversa proporzionalità: all'aumentare di  $f$ , la lunghezza d'onda  $\lambda$  diminuisce.



Accelerazione:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 s_0 \cdot \cos(\omega t)$$

L'accelerazione è poco usata, in quanto solitamente si preferisce usare la velocità delle particelle come grandezza cinematica.

## GRANDEZZE FISICHE

Si definiscono **grandezze di campo**:

- Pressione sonora  $p = [\text{Pa}]$
- Velocità di particelle  $\vec{v} = [\text{m} / \text{s}]$

Queste grandezze di campo sono difficili da calcolare in modo previsionale. Sono quelle realmente percepibili dal sistema uditivo umano, esse variano in ogni punto del campo. Solo in ambienti molto piccoli è possibile effettuare una simulazione numerica, con tecnica FEM (finite elements) o BEM (boundary elements), in grado di prevedere numericamente il valore di pressione e velocità in ciascun punto del campo.

In ambienti più grandi si deve rinunciare al calcolo deterministico delle grandezze di campo, e ci si deve accontentare di un calcolo "statistico" delle sole grandezze energetiche, che risulta fattibile anche per ambienti molto vasti, o all'aperto...

Si definiscono **grandezze energetiche**:

- Densità di energia sonora  $D = [\text{J} / \text{m}^3]$
- Intensità sonora  $I = [\text{W} / \text{m}^2]$
- Potenza sonora  $W = [\text{W}]$

Tutte le suddette grandezze possono essere espresse in DECIBEL (dB); la scala dei decibel è una scala logaritmica utilizzata per compattare il grande range di valori delle grandezze energetiche percepiti dall'essere umano, più precisamente il decibel è 10 volte il logaritmo decimale del rapporto tra il valore energetico in esame e il valore energetico di riferimento.

## IMPEDENZA ACUSTICA (Z)

Al passaggio dell'onda sonora nel mezzo elastico si originano una sequenza di compressioni ed espansioni dello stesso, ciò implica una variazione della pressione ambiente rispetto al valore di equilibrio. Tali compressioni ed espansioni danno origine alla **pressione acustica**  $p'$  che dipende dalla frequenza ed ampiezza del moto armonico della sorgente, dalle caratteristiche elastiche e dalla massa del mezzo acustico. Il legame tra la **velocità delle particelle** del mezzo elastico  $v'$  e pressione acustica  $p'$  vale:

$$\frac{p'}{v'} = \rho_0 \cdot c_0 \quad [\text{kg} / \text{m}^2\text{s}] = 400 \text{ rayl}$$

Dove:

$\rho_0$  è la densità del mezzo elastico

$\rho_0 \cdot c_0$  è detta impedenza acustica (Z) dell'onda piana ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ ) (rayl).

## VALORE MEDIO EFFICACE (RMS\_Root Mean Square)

Quando la forma d'onda è complessa, diventa ambigua la definizione dell'ampiezza media del segnale da analizzare, e l'uso del valore istantaneo massimo non è rappresentativa della percezione umana. Si impiega allora il cosiddetto Valore Medio Efficace o Valore RMS del segnale stesso:

$$P_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [p(\tau)]^2 \cdot d\tau}$$

### Energia contenuta nel mezzo elastico:

Nel caso di onde piane in un mezzo elastico non viscoso, l'energia per unità di volume o densità di energia sonora  $w$  trasferita al mezzo è data dalla somma di due contributi:

- Energia cinetica  $D = \frac{E}{V} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_{\text{eff}}^2$  [J / m<sup>3</sup>]

Dove:

$v_{\text{eff}}$  è la velocità della superficie del pistone e, per onde piane in un mezzo non viscoso, anche delle particelle del mezzo.

- Energia potenziale  $D = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{eff}}^2}{\rho_0 \cdot v_{\text{eff}}^2}$  [J / m<sup>3</sup>]

Essa correla una grandezza direttamente misurabile, come il valore efficace della pressione sonora  $p_{\text{eff}}$ , con l'energia immagazzinata causa la compressione elastica del mezzo.

Nel caso di onde piane, i due contributi suddetti sono fra loro uguali. Nel caso generale di onde non piane, o in presenza di onde stazionarie (che rimbalzano avanti ed indietro) l'energia non è equamente suddivisa fra cinetica e potenziale, ed occorre valutare separatamente, in ciascun punto e in ciascun istante, i due contributi e sommarli:

$$D = \frac{E}{V} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \rho_0 \cdot v_{\text{eff}}^2 + \frac{P_{\text{eff}}^2}{\rho_0 \cdot c_0^2} \right] \quad [\text{J} / \text{m}^3]$$

In generale, quindi, la valutazione corretta del contenuto energetico del campo sonoro richiede la simultanea ed indipendente misurazione sia della pressione sonora, sia della velocità delle particelle (che è un vettore con 3 componenti cartesiane).

## INTENSITÀ SONORA

L'Intensità sonora  $I$  è il parametro di valutazione del flusso di energia che attraversa una determinata superficie.

E' definita come l'energia che nell'unità di tempo attraversa, in direzione normale, una superficie unitaria ( $W/m^2$ ).

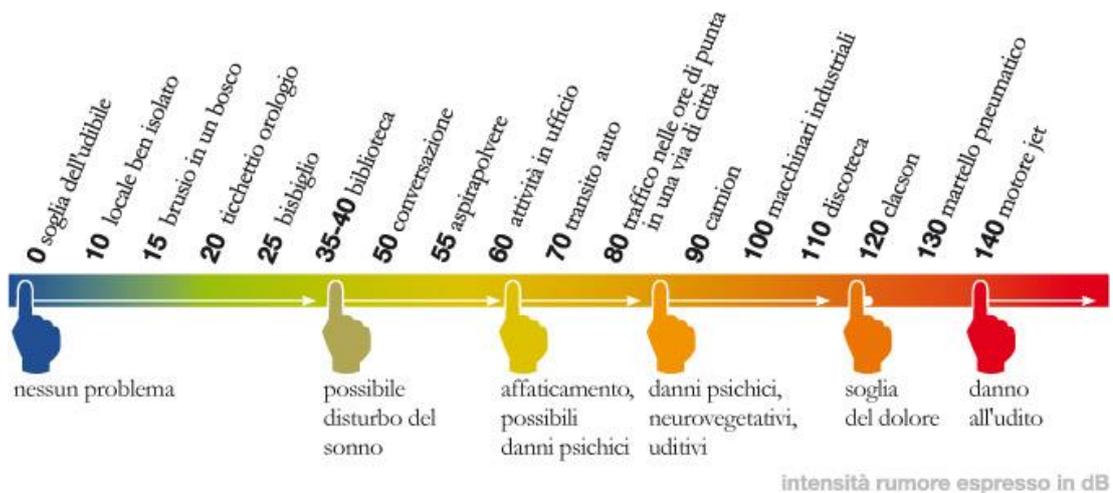
L'intensità  $\vec{I}$  è un parametro vettoriale definito da un modulo, una direzione ed un verso:

$$\vec{I} = (P, t) = p(P, t) \cdot v(P, t)$$

Nel caso di onde piane, in un mezzo in quiete non viscoso, tra densità ed intensità di energia sonora, intercorre la relazione:

$$I \ll D c_0 \quad [W / m^2]$$

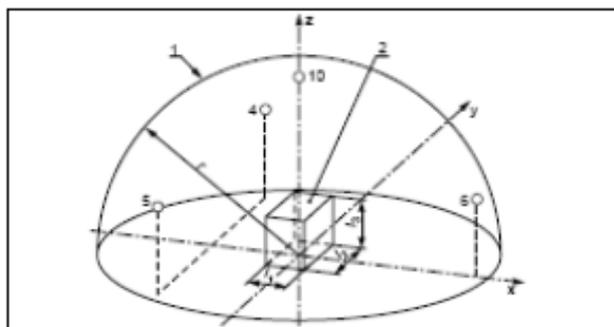
$$r_E = \frac{|\vec{I}|}{D \cdot c} \quad 0 < r_E < 1 \quad \text{in un campo riverberante } r_E \text{ tende a zero}$$



## POTENZA SONORA

Descrive la capacità di emissione sonora di una sorgente e viene misurata in Watt (W). La potenza non può essere misurata direttamente, ma richiede metodi particolari per la sua determinazione.

La potenza sonora è un descrittore univoco di una sorgente sonora è, infatti, una quantità oggettiva indipendente dall'ambiente in cui la sorgente è posta.



Considerata una superficie chiusa  $S$  che racchiude una sorgente sonora, la potenza acustica  $W$  emessa dalla sorgente è data dall'integrale dell'intensità sonora  $I$  sulla superficie considerata:

$$W = \int_S \vec{I}(P, t) \cdot n dS$$

Nel caso in cui la superficie chiusa  $S$  sia scomponibile in  $N$  superfici  $S_i$  elementari, l'espressione della potenza sonora diventa:

$$W = \sum_{i=1}^N I_i \cdot S_i$$

### LIVELLI SONORI - SCALA DI DECIBEL

Si definisce livello di pressione sonora  $L_p$  la quantità:

- $L_p = 10 \log p^2/p_{\text{rif}}^2 = 20 \log p/p_{\text{rif}}$  [dB]

Si definisce livello di velocità sonora  $L_v$  la quantità:

- $L_v = 10 \log v^2/v_{\text{rif}}^2 = 20 \log v/v_{\text{rif}}$  [dB]

Si definisce livello di intensità sonora  $L_I$  la quantità:

- $L_I = 10 \log I/I_{\text{rif}}$  [dB]

Si definisce livello di densità sonora  $L_D$  la quantità:

- $L_D = 10 \log D/D_{\text{rif}}$  [dB]

Nel caso di onde piane, in un mezzo in quiete non viscoso ( $\rho_0 c_0 = 400$  rayl):

- $p/u = \rho_0 c_0 \quad I = p^2/\rho_0 c_0 = D \cdot c_0$

=> quindi  $L_p = L_v = L_I = L_D$

Ma l'onda piana progressiva non esiste nel mondo reale

=> quindi  $L_p \neq L_v = L_I \ll L_D$

Si definisce infine livello di potenza sonora  $L_W$  la quantità:

- $L_W = 10 \log W/W_{rif} \quad [dB]$

Ma, mentre i 4 livelli “di campo” precedenti si identificano in un unico valore numerico (almeno nel caso dell’onda piana e progressiva), il livello di potenza assume, in generale, un valore assai diverso, spesso molto maggiore.

Sempre nel caso di onda piana e progressiva (pistone di area  $S$  all’estremità di un tubo), il legame fra livello di potenza e livello di intensità è:

- $L_W = L_I + 10 \log S/S_0 = L_I + 10 \log S \quad [dB]$

Questa relazione, in realtà, è sempre vera, anche nel caso di altri tipi di onde, purché la superficie  $S$  considerata rappresenti l’intera superficie attraverso cui la potenza emessa fuoriesce dalla sorgente.

## SOMMA DI LIVELLI SONORI

*Somma “incoerente” di due livelli (due suoni diversi):*

$$L_{p1} = 10 \log (p_1/p_{rif})^2 \quad (p_1/p_{rif})^2 = 10^{L_{p1}/10}$$

$$L_{p2} = 10 \log (p_2/p_{rif})^2 \quad (p_2/p_{rif})^2 = 10^{L_{p2}/10}$$

$$(p_T/p_{rif})^2 = (p_1/p_{rif})^2 + (p_2/p_{rif})^2 = 10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}$$

$$L_{pT} = L_{p1} + L_{p2} = 10 \log (p_T/p_{rif})^2 = 10 \log (10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10})$$

*Somma “incoerente” di livelli:*

- Esempio 1:

$$L_1 = 80 \text{ dB} \quad L_2 = 85 \text{ dB} \quad L_T = ?$$

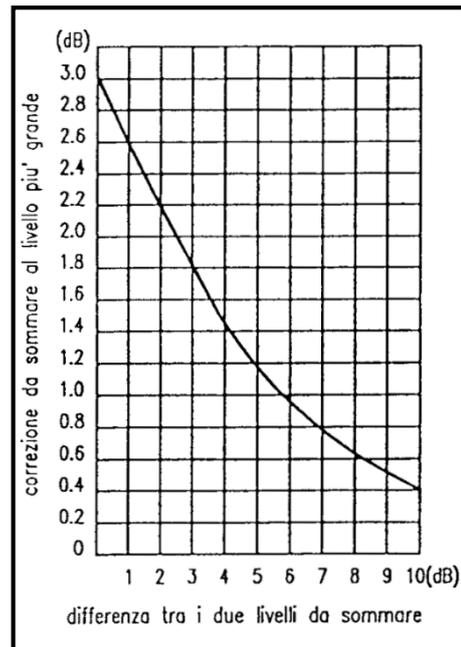
$$L_T = 10 \log (10^{80/10} + 10^{85/10}) = 86.2 \text{ dB}$$

- Esempio 2:

$$L_1 = 80 \text{ dB} \quad L_2 = 80 \text{ dB} \quad L_T = ?$$

$$L_T = 10 \log (10^{80/10} + 10^{80/10}) =$$

$$L_T = 80 + 10 \log 2 = 83 \text{ dB}$$



*Differenza di livelli:*

- Esempio 3:

$$L_1 = 80 \text{ dB} \quad L_T = 85 \text{ dB}$$

$$L_2 = ?$$

$$L_2 = 10 \log (10^{85/10} - 10^{80/10}) = 83.35 \text{ dB}$$

