

ARGOMENTI LEZIONE:

1. ACUSTICA: GENERALITA'

2. LA NATURA DEL SUONO

3. SUONI PURI E COMPLESSI

4. TIPI PRINCIPALI DI ONDE

5. PROPAGAZIONE PER ONDE PIANE PROGRESSIVE

5.1 La velocità del suono

5.2 Andamento Spaziale

5.3 Impedenza Acustica

5.4 Lunghezza d'onda (λ)

5.5 Campo di frequenza

5.6 Pressione sonora

5.7 Legame tra Pressione e Velocità

5.8 Densità Energetica Sonora (D)

6. PROPAGAZIONE PER ONDE SFERICHE PROGRESSIVE

7. OSSERVAZIONI SULLE GRANDEZZE FISICHE

1. ACUSTICA: GENERALITA'

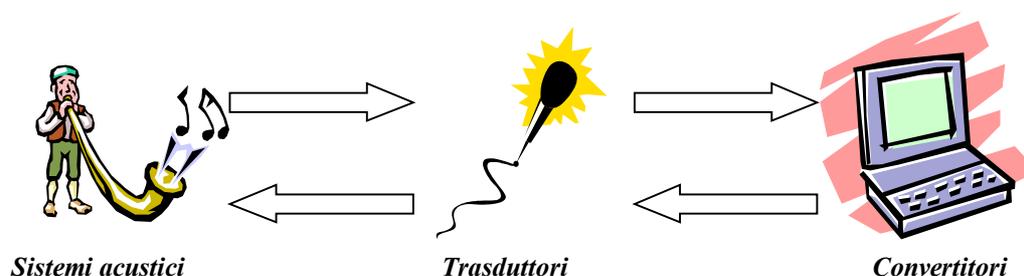
L'acustica è una scienza che nasce quando i sistemi elettronici di gestione del suono non erano ancora nati.

Questa conosce un grande sviluppo dal 1991. E' infatti da qui che il suo studio viene coadiuvato da dispositivi elettronici e da tecniche di elaborazione numerica del segnale il cui sviluppo ne è addirittura stato fagocitato.

L'acustica è quindi la scienza che studia il suono.

Oggi tuttavia la gestione del suono segue uno schema ben definito.

Il suono viene elettronicamente convertito in segnale elettrico tramite un'operazione di trasduzione divenendo poi una sequenza numerica; quest'ultimo passaggio da segnale elettrico a numeri è detto di conversione; è logico pensare che tale percorso si possa seguire anche in direzione opposta.



Lo schema illustra la logica con cui si esegue la progettazione di impianti per la riproduzione sonora.

Il funzionamento di un impianto di diffusione sonora che utilizza microfoni digitali, ad esempio, segue precisamente lo schema di figura in entrambi i versi.

Vi è tuttavia la possibilità di saltare uno di questi stadi. Esistono cioè apparati che non utilizzano tutti e tre i blocchi dello schema: i sistemi analogici, per esempio, si fermano alla trasduzione del segnale acustico in elettrico; altri, addirittura, si arrestano al primo stadio, cioè ai cosiddetti sistemi acustici che non necessitano di parte elettrica. Un esempio è costituito dagli interfoni metallici usati sulle vecchie navi.

Il nostro compito ed obiettivo rimane comunque l'apprendimento di tecniche che ci consentano di effettuare l'analisi sonora e il pieno controllo del suono.

[Torna indice](#)

2. LA NATURA DEL SUONO

Il suono costituisce un esempio d'onde elastiche: esso rappresenta la propagazione di una perturbazione, con trasporto di sola energia meccanica, e non di materia.

Le onde elastiche sono di due tipi:

- 1) quelle che non hanno bisogno di un mezzo elastico per potersi propagare (es. radiazioni elettromagnetiche)
- 2) quelle che hanno bisogno di un mezzo elastico per potersi propagare: le onde meccaniche (es. onde sonore)

Il suono insomma è una delle tante forme in cui si può presentare l'energia: si usa spesso infatti parlare di energia acustica; l'aspetto energetico è ancora una volta in primo piano.

Oggi si è in grado di misurare il flusso di energia e dimensionare proprio sulla base di queste misurazioni la potenza (watt) di un sistema acustico.

Il suono è dunque un'onda meccanica. Per generare un'onda meccanica è necessario produrre una perturbazione. Ogni causa in grado di generare un'onda, e quindi di fornire quest'energia che si propaga nel mezzo, rappresenta la sorgente del moto ondoso.

Che il suono sia dovuto a vibrazioni elastiche di una sorgente, si ha una prova anche toccandosi la gola con una mano mentre si parla: si sentono chiaramente le vibrazioni delle corde vocali.

Entro certi limiti, che variano da persona a persona, le onde elastiche che hanno una frequenza compresa tra 20 e 20.000 Hz vengono rivelate dall'orecchio sotto forma di suoni.

Queste vibrazioni elastiche stimolano l'orecchio e successivamente trasmettono un impulso al cervello, dando così origine a un processo auditivo. In altri termini, l'orecchio è uno strumento rivelatore di onde elastiche di particolare frequenza.

La risposta dell'orecchio umano ad uno stimolo sonoro è in generale un fenomeno molto soggettivo: essa dipende da vari fattori, come il deterioramento del sistema uditivo stesso dovuto a prolungate sollecitazioni. Un segnale sonoro è caratterizzato da due grandezze fondamentali: la pressione, legata all'intensità dell'onda che trasporta il segnale, e la frequenza. Sottoponendo individui otologicamente normali a diversi stimoli sonori, dei quali vengono variate pressione e frequenza, e analizzando le risposte uditive, è possibile tracciare un grafico, detto diagramma di sensazione, che mostri quali suoni sono percettibili dall'uomo.

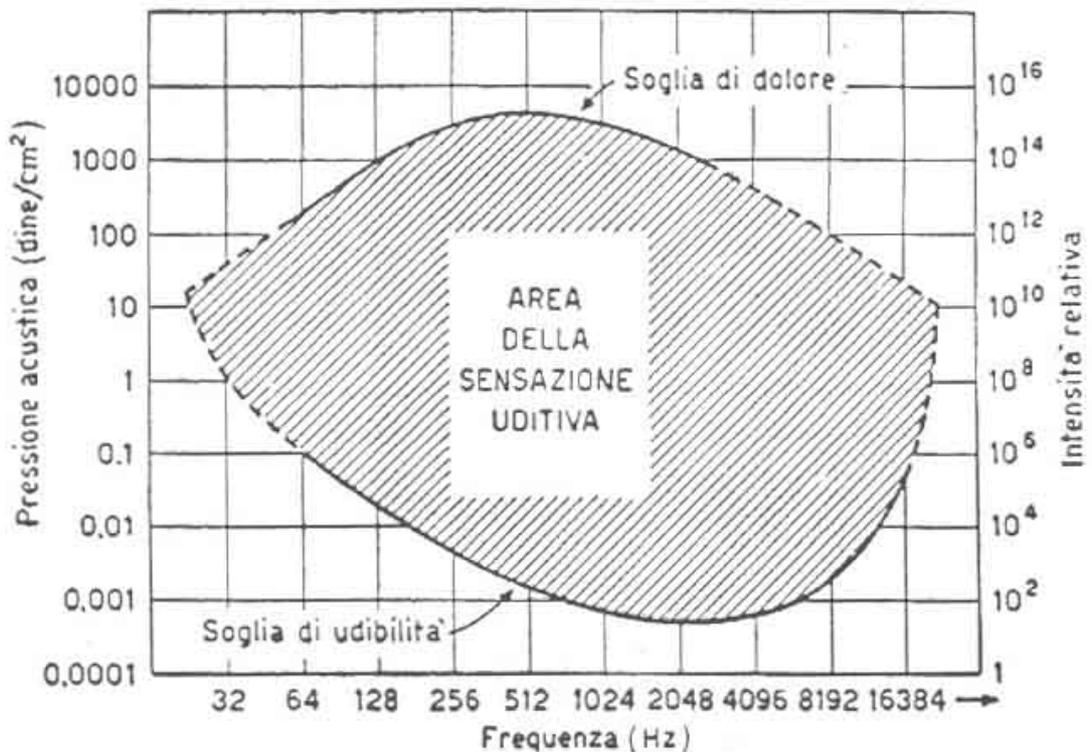


diagramma di sensazione

Il limite inferiore del grafico, la soglia di udibilità, rappresenta le pressioni minime, alle diverse frequenze, che vengono percepite dall'uomo; il limite superiore, la soglia del dolore, indica la massima intensità sonora che non provoca dolore; fra queste due linee si estende l'area della sensazione uditiva che contiene tutti i suoni udibili.

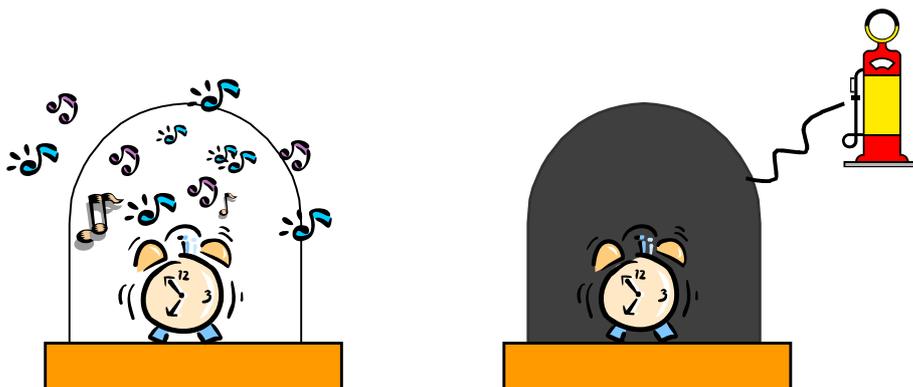
Come detto sopra, e come si vede dal grafico, il range di sensibilità uditiva umana va da 20 Hz a 20.000 Hz.



Come detto prima, il suono ha bisogno di energia per produrre delle vibrazioni e di un mezzo elastico che trasporti le vibrazioni fino al nostro orecchio.

Il mezzo deve soddisfare due caratteristiche: deve essere dotato di massa e di elasticità; proprietà che gli conferiscono il nome di elastico-massivo.

Interessante a questo proposito è l'esperimento della sveglia: se si pone una sveglia sotto una campana di vetro e si aziona la suoneria si osserva che il suono può propagarsi, ma non appena tramite una pompa da vuoto si toglie l'aria dalla campana il suono si affievolisce fino a scomparire.

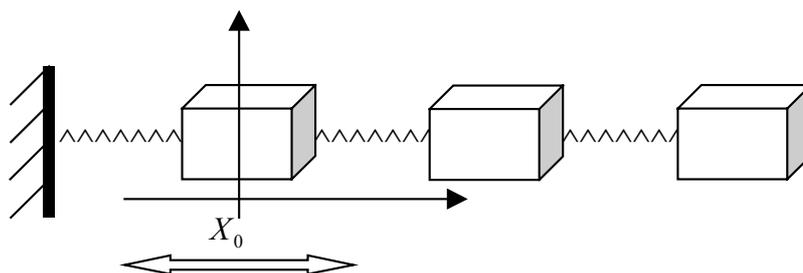


L'esperimento della sveglia dimostra che una volta spinto il vuoto, cioè privata l'onda acustica del mezzo, la propagazione acustica diventa nulla.

Questo conferma quanto detto fino ad ora: il suono necessita cioè di un mezzo, l'aria in questo caso, per potersi propagare.

Il modello fisico di tale mezzo è una successione di volumi dotati di massa e di molle connesse tra loro, se io perturbo la quiete di uno di questi volumi questo inizierà ad oscillare attorno alla sua posizione di equilibrio caricando e scaricando le molle che la connettono alle masse adiacenti che, a loro volta, iniziano ad oscillare.

Il fenomeno ha un certo tempo di propagazione che, come vedremo, dipende solo dal mezzo.



La figura rappresenta in maniera intuitiva il mezzo elastico massivo di cui necessita l'onda per propagarsi. Come si è cercato di rappresentare le particelle del mezzo vengono messe in movimento rispetto ad una posizione iniziale X_0 .

Il mezzo elastico è generalmente l'aria, ma può essere anche un solido o un liquido.

La velocità di propagazione del suono nell'aria alla temperatura di 0°C è circa 331 m/s e nei liquidi e nei solidi è ancora più elevata.

Nella seguente tabella sono riportate le velocità di propagazione del suono in alcuni mezzi:

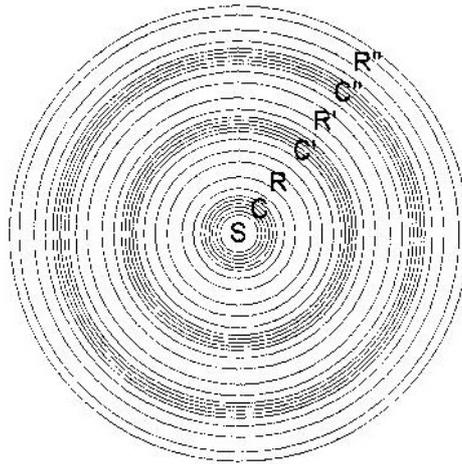
| MEZZO | t (°C) | V _l (m/s) | V _t (m/s) |
|--------------------------|--------|----------------------|----------------------|
| Biossido di carbonio | 0 | 259 | - |
| Aria atmosferica (secca) | 0 | 331 | - |
| Aria atmosferica (secca) | 20 | 340 | - |
| Azoto | 0 | 337 | - |
| Vapore d'acqua | 100 | 405 | - |
| Idrogeno | 0 | 1286 | - |
| Ossigeno | 0 | 316 | - |
| Ossido di carbonio | 0 | 337 | - |
| Acqua | 0 | 1402 | - |
| Acqua | 20 | 1480 | - |
| Acqua di mare | 20 | 1521 | - |
| Rame | 20 | 4760 | 2300 |
| Piombo | 20 | 2160 | 700 |
| Acciaio | 20 | 5980 | 3300 |
| Ferro | 20 | 5950 | 3200 |
| Zinco | 20 | 3900 | 2320 |
| Vetro | 20 | 5600 | 3400 |

Velocità di propagazione del suono in alcuni mezzi. Mentre nei gas e nei liquidi le onde sonore sono solo longitudinali (V_l), nei solidi vi sono sia onde longitudinali che onde trasversali (V_t)

Il meccanismo di propagazione del suono nell'aria è schematizzato nella prossima figura, ove si è supposto per semplicità che la sorgente sonora S sia puntiforme. Mentre S vibra, sono prodotte onde sferiche longitudinali di compressione e rarefazione, cioè superfici sferiche, luogo di punti in cui la pressione ha uguale valore.

Un'onda di compressione richiama molecole di aria dalle regioni attigue, ove si formano onde di rarefazione. Queste onde non restano naturalmente localizzate, ma si spostano con la velocità v del suono in ogni direzione uscendo da S e quindi, se il mezzo è omogeneo e isotropo, conservano sempre la forma sferica. La propagazione avviene perciò per onde sferiche. Come grandezza variabile lungo la direzione di propagazione si può assumere la pressione dell'aria, oppure lo spostamento delle particelle del mezzo dalla loro posizione di equilibrio. Ogni particella oscilla avanti e indietro lungo la direzione di propagazione della perturbazione, che invece si propaga con la velocità del suono.

Insisto ancora su questo fatto: ciò che si propaga è il moto vibratorio e non la materia, vincolata invece ad oscillare intorno alla posizione di equilibrio sotto l'azione di forze elastiche.



Meccanismo di propagazione del suono nell'aria: C, C', C'', ecc. sono onde di compressione, mentre R, R', R'', ecc. sono onde di rarefazione.

[Torna indice](#)

3. SUONI PURI E COMPLESSI

Se, per effetto della perturbazione, la pressione, la densità e la posizione delle particelle del mezzo variano nel tempo con legge sinusoidale, o con legge semplicemente periodica, il suono si dice puro nel primo caso, complesso nel secondo.

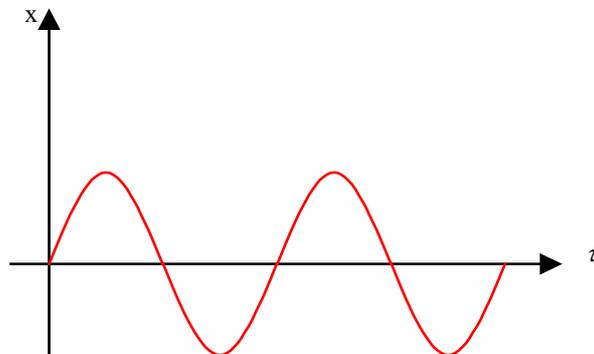


Grafico dello spostamento dalla posizione di equilibrio di una particella interessata in un processo di produzione di un suono puro

Se invece l'onda è molto irregolare, nel senso che presenta un andamento vibratorio nel quale manca un preciso carattere di periodicità, il suono è percepito come una specie di disturbo e viene generalmente chiamato rumore.

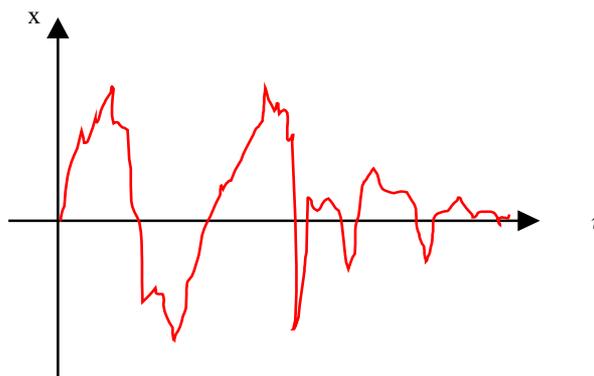
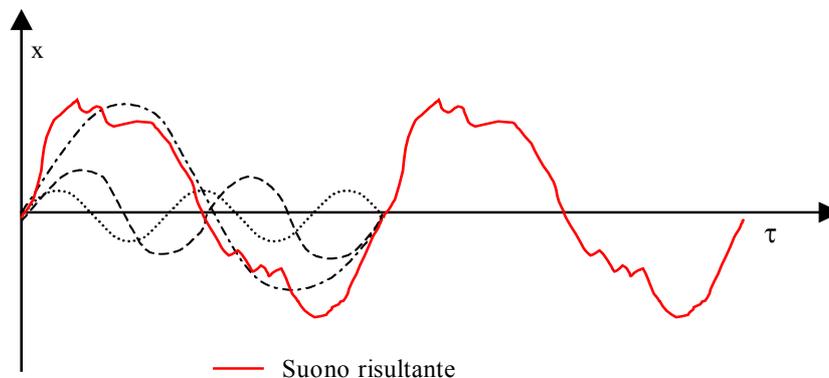


Grafico dello spostamento dalla posizione di equilibrio di una particella interessata in un processo di produzione di un rumore

Poiché, in genere, i suoni non sono per così dire puri, il loro diagramma temporale non è una semplice senoide.

Un moto periodico infatti si può considerare, per il teorema di Fourier, come somma di un certo numero di moti armonici semplici le cui frequenze sono multiple, secondo numeri interi, della frequenza del moto periodico considerato.

Nella maggior parte dei casi quindi un suono è prodotto dalla sovrapposizione di più suoni semplici, di cui quello con frequenza più bassa (coincidente con la frequenza del moto periodico risultante) è chiamato fondamentale, mentre i rimanenti, le cui frequenze sono multiple intere della frequenza fondamentale, sono chiamati armonici superiori.



Un suono complesso, rappresentato da un'oscillazione periodica (grafico in rosso) può esser considerato come somma di tre suoni semplici graficamente rappresentati in nero.

[Torna indice](#)

4. TIPI PRINCIPALI DI ONDE

Le onde principali che noi tratteremo sono di tre tipi:

1) *onde piane progressive:*

E' quell'onda che si sviluppa all'interno di un tubo di lunghezza indefinita, quando il fluido contenuto al suo interno viene sollecitato da un pistone che si muove di moto armonico

2) *onde sferiche progressive:*

Generata da una sorgente sonora di forma sferica che irradia in ogni direzione il suono.

3) *onde piane stazionarie:*

(nelle lezioni successive)

E' quell'onda che si sviluppa all'interno di un tubo di lunghezza finita quando il fluido viene sollecitato da un pistone che comprime il fluido periodicamente.

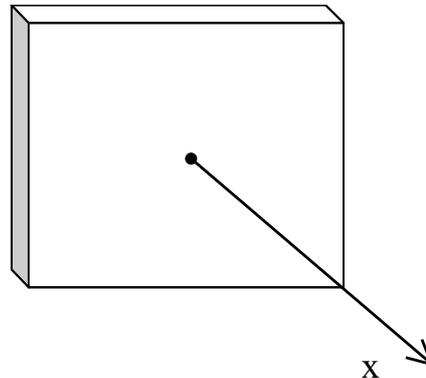
In particolare saranno trattate in maniera abbastanza approfondita le prime mentre delle seconde, vista la complessità delle equazioni in gioco, ne sarà solo una descrizione qualitativa. Naturalmente le definizioni delle grandezze acustiche trattate nel prossimo paragrafo sono valide anche per le onde sferiche.

[Torna indice](#)

5. PROPAGAZIONE PER ONDE PIANE PROGRESSIVE

Un'onda piana progressiva è quell'onda che si sviluppa all'interno di un tubo infinitamente lungo, quando il fluido al suo interno viene sollecitato da un pistone che si muove con una legge del moto di tipo sinusoidale (si pensi, ad esempio, alle canne di un organo o ai condotti di aspirazione e scarico di un motore a combustione interna).

Il campo sonoro assume la forma di un fascio d'onde sonore parallele e può immaginarsi generato da una sorgente costituita da una superficie piana d'estensione infinita che vibra in direzione normale alla superficie stessa.



L'onda si dice piana quando tutti i punti, rispetto a due delle tre coordinate cartesiane, si trovano nella medesima situazione, cioè in ogni istante hanno la stessa velocità e la stessa pressione. Per questo motivo, lo studio delle onde piane si affronta ricavando i campi di pressione p e velocità u .

$$P = p(x, y, z, \tau) \quad U = u(x, y, z, \tau)$$

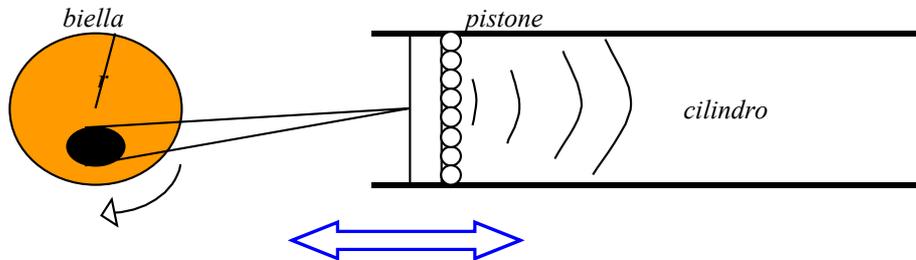
Dal punto di vista spaziale si tratta di un problema di tipo monodimensionale, perché la situazione geometrica in cui ci poniamo è un pistone piano infinito che si muove avanti e indietro lungo l'asse x (quindi dipende solo dalle variabili x e τ).

Quindi si distingue un'onda piana per la configurazione geometrica della sorgente, piano indefinito che vibra nella sola direzione dell'asse x , e per la legge del moto di tipo sinusoidale da cui è regolata.

[Torna indice](#)

5.1 La velocità del suono

Per intuire l'origine di un'onda sonora si pensi ad un cilindro pieno di aria, il mezzo, all'interno del quale scorre uno stantuffo azionato da un albero di raggio r e mosso a sua volta da un motore che possiede una certa velocità angolare (ω).



Il disegno rappresenta schematicamente un generatore di onde acustiche, il pistone infatti perturba lo stato di quiete delle particelle del mezzo che si mettono ad oscillare intorno ad una iniziale posizione di equilibrio.

Grazie alla legge dell'aderenza che ereditiamo dalla fluidodinamica avremo che il primo strato di particelle aderenti alla superficie del pistone asseconderanno il movimento di questo seguendolo nelle sue oscillazioni.

Se questo sistema si avvale di una biella con raggio r e velocità angolare ω allora le oscillazioni dello stantuffo ad essa collegato e quindi delle particelle che vi aderiscono segue la legge del moto armonico:

$$x(\tau) = r \cdot \sin(\omega\tau)$$

dove x rappresenta la posizione delle particelle al variare del tempo, r il raggio della biella che muove il pistone ed ω la frequenza.

La legge del moto appena vista ci impone l'introduzione alcune grandezze:

- 1) **Frequenza (f)** è definita come il numero di giri compiuto nell'unità di tempo. E' l'inverso del periodo.
Si misura con una regolare unità di misura, fornita dal sistema internazionale, l'Hertz (**Hz**) = num.giri/s.
(Es. Se il mio cilindro compie cinquanta oscillazioni al secondo l'onda acustica da esso prodotta avrà una frequenza di 50 Hz).

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \rightarrow \omega = 2\pi f$$

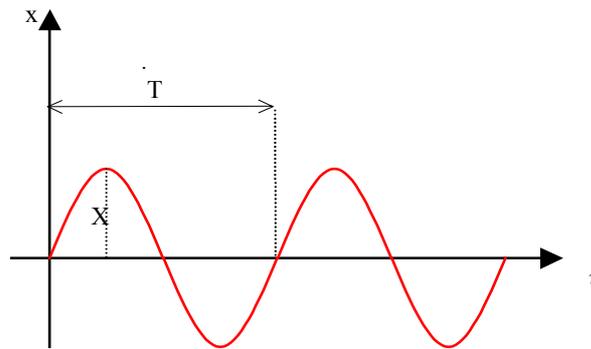
- 2) **Periodo (T)** è il tempo impiegato dal nostro pistone a compiere un ciclo del suo movimento oscillatorio; sarebbe il duale del periodo della sinusoidale. E' l'inverso della frequenza. Si misura in secondi [s].

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

- 3) **Ampiezza (X)** rappresenta l'escursione spaziale rispetto alla posizione di equilibrio che l'onda acustica porta ad avere alle particelle del mezzo. Si misura in metri (**m**). Essa dipende da quanto è "forte" il suono; è una grandezza fondamentale nelle operazioni di amplificazione che hanno il

solo scopo di aumentare l'ampiezza del segnale trattato, non variando la frequenza.

Nel caso dell'onda generata dal pistone questa è pari a r cioè al raggio della biella.



Andamento spaziale delle particelle in funzione del tempo.

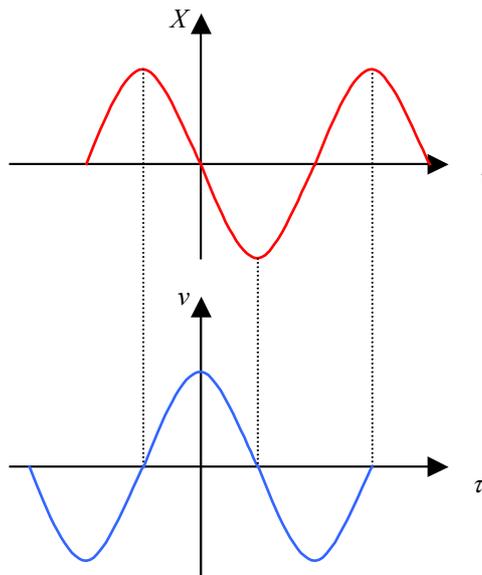
A questo punto possiamo ritoccare la legge del moto vista precedentemente inserendo l'ampiezza al posto di r e sostituendo il valore di ω trovato:

$$x(\tau) = X \cdot \sin(2\pi f \cdot \tau)$$

Come sappiamo questa legge indica la posizione dello stantuffo e quindi delle particelle ad esso aderenti al variare del tempo quindi la sua derivata dovrà indicare la velocità v con cui queste si muovono intorno alla loro posizione di equilibrio:

$$v = \frac{\partial X(\tau)}{\partial \tau} = X\omega \cos(\omega\tau)$$

Come si vede siamo passati da una funzione seno a una coseno, perciò quando l'oscillazione è massima la velocità è nulla e nell'istante in cui la particella si trova nella sua posizione di equilibrio la velocità è max.

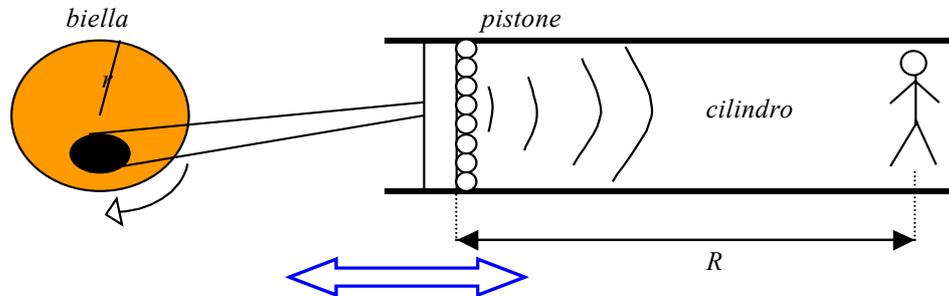


I due grafici mostrano la caratteristica di velocità delle particelle ed andamento spaziale di queste in funzione del tempo. Quando è massima una è nulla l'altra.

[Torna indice](#)

5.2 Andamento Spaziale

Per comprendere meglio i concetti che esprimeremo consideriamo nuovamente il cilindro in cui si muove il pistone e prendiamo un punto d'ascolto al suo interno posto ad una distanza R dal pistone; è ovvio pensare che la legge del moto delle particelle in tale punto sia a meno di un ritardo uguale a quella che ho per le particelle che aderiscono al pistone.



Il disegno mostra la ovvia e più probabile possibilità di porre un punto di ascolto ad una certa distanza dalla sorgente acustica; la distanza in questo caso è indicata con la lettera R .

Tale ritardo τ_{rit} è dovuto al tempo che l'onda acustica impiega a giungere all'orecchio dell'ascoltatore posto alla distanza R dalla sorgente:

$$\tau_{rit} = \frac{R}{c}$$

Nel punto dov'è posizionato l'ascoltatore la legge del moto sarà:

$$X(R, \tau) = A \sin\left[\omega\left(\tau - \frac{R}{c}\right)\right] = A \sin\left(\omega\tau - \frac{R\omega}{c}\right)$$

Il ritardo di propagazione può essere ben spiegato attraverso un esempio pratico: consideriamo un'aula universitaria, lunga 13 metri, ed una persona che parla dal fondo della stanza. Matematicamente il ritardo sarà:

$$\tau_{rit} = \frac{13}{343} \cong 0,0379s$$

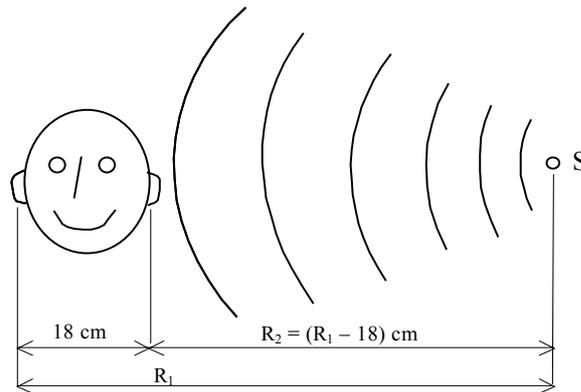
Come si vede benissimo, anche attraverso le normali esperienze, questo tempo non è tale da far sembrare il suono ed il movimento delle labbra fuori sincronia; ponendoci in un contesto di distanza molto più alta (130m), e contando sul fatto che normalmente un uomo parlando pronuncia 3 sillabe al secondo, notiamo un ritardo matematico di:

$$\tau_{rit} = \frac{130}{343} \cong 0,379s$$

e quindi uno sfasamento di circa una sillaba. Come sappiamo dalla psicoacustica, infatti, il nostro sistema uditivo ci permette di percepire un'onda sonora in un lasso di tempo compreso tra i 50 ed i 150 ms (secondo il tipo di suono: quelli più gravi e forti sono percepiti prima degli altri, a causa di fattori evolutivi). Un suono che quindi ci raggiunge in un tempo inferiore ai 100 ms viene da noi percepito praticamente come "istantaneo".

Un altro fenomeno connesso è il cosiddetto ritardo interaurale (IDT, interaural delay time o ILD, interaural level difference per le alte frequenze), grazie al quale

riusciamo a percepire la provenienza di un suono. Si consideri una sorgente sonora come in figura:



Poniamo la distanza dall'orecchio destro = R_1 e la distanza dall'orecchio sinistro = $R_2 = R_1 - x$ (dove x è la distanza fra le due orecchie, circa 18 cm).

Il tempo di ritardo sarà dunque:

$$\Delta\tau = \tau_{rit1} - \tau_{rit2} = \frac{R_1}{c} - \frac{R_2}{c} = \frac{R_1}{c} - \frac{(R_1 - x)}{c} = \frac{x}{c}$$

Il ritardo $\Delta\tau$ fra l'arrivo del suono all'orecchio destro rispetto a quello sinistro (ritardo interaurale) è:

- in aria: $\Delta\tau = \frac{0.18m}{340m/s} = 0.53ms$ (*millisecondi*)
- in acqua $\Delta\tau = \frac{0.18m}{1500m/s} = 0.12ms$

Si vede chiaramente che in acqua, a causa della maggiore velocità del suono, il tempo necessario a raggiungere un orecchio è pressoché uguale a quello necessario a raggiungere l'altro.

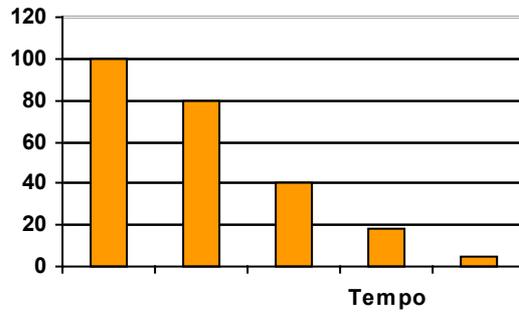
Questa è anche la causa delle diffusissime incapacità di determinare la provenienza di un suono quando siamo in immersione: il nostro sistema uditivo è infatti "calibrato" per ascoltare suoni provenienti dall'aria: in base al ritardo che impiega un suono a giungere alle nostre orecchie, capiamo da dove arriva.

In acqua, dove la velocità del suono è diversa, il nostro sistema uditivo non riesce a capire dove si trova la sorgente; è per questo che nei sottomarini per ovviare a questo problema e mantenere dunque un alto valore di $\Delta\tau$, si tende ad aumentare la distanza tra le due "orecchie" del sottomarino, applicando gli idrofoni a distanza di 0,80m l'uno dall'altro:

$$\Delta\tau = \frac{0,80m}{1500m/s} = 0.53ms$$

In questo modo siamo così in grado di localizzare correttamente l'origine del suono.

L'andamento nel tempo del suono è un accorgimento relativamente giovane, in quanto fino a 10 anni fa lo studio del suono era relegato alla frequenza e alla pressione. Tenendo però conto del fatto che il suono può riflettersi e formare delle onde diverse da quelle dirette, che in genere avranno un ritardo maggiore di quello precedente, verranno a crearsi delle code che incideranno sicuramente nell'effetto globale.



Andamento del suono distanza/tempo

Il rapporto (ω/c) è una nuova grandezza detta numero d'onda e le sue dimensioni sono $[m^{-1}]$ è solitamente rappresentata con la lettera k .

Alla luce di questa nuova grandezza la legge del moto diviene:

$$X(R, \tau) = A \sin(\omega\tau \pm kx)$$

in cui il segno della somma, in parentesi, è dettato dal fatto di considerare il punto di ascolto a monte o a valle della sorgente.

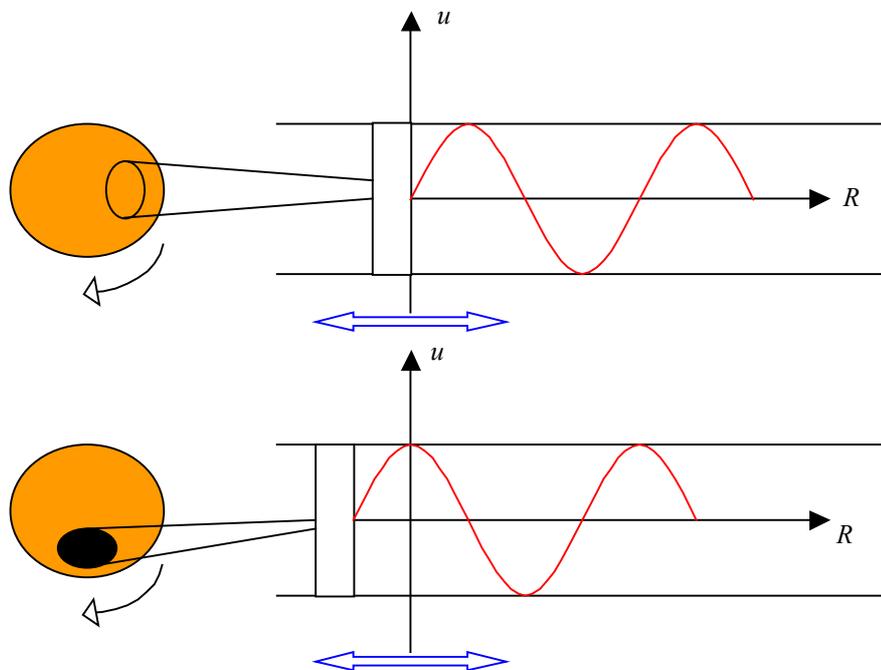
Rimane ora da mettere in luce il rapporto tra ω ed f ; la frequenza rappresenta infatti il numero di giri che il mio pistone, per esempio, compie nell'unità di tempo.

ω è la pulsazione che invece rappresenta il numero di radianti al secondo e poiché a fare un giro completo ci sono 2π radianti allora $\Rightarrow \omega = 2\pi f$.

Ancora una volta modifichiamo la legge del moto che diviene:

$$X(R, \tau) = A \sin(2\pi f\tau - kx)$$

Supponiamo ora di poter fotografare l'onda che si propaga nel cilindro ed ammettiamo che l'istante in cui la foto viene scattata sia quello di massima estensione del pistone.



I disegni mostrano come ad un'estensione massima del pistone corrisponda la minima velocità, mentre per posizioni d'equilibrio del pistone corrisponda la massima velocità.

Il diagramma, riportato in figura, riporta in ascissa la distanza R dal punto d'emissione e in ordinata la velocità delle particelle. Essa, come si vede dalla figura, è nulla quando l'estensione è massima, mentre sarà massima quando il pistone è nella posizione di equilibrio.

[Torna indice](#)

5.3 Impedenza Acustica

Si definisce impedenza acustica il rapporto tra i moduli di pressione e velocità:

$$Z = \frac{p}{v} \quad [Z] = \left[\frac{Pa}{m/s} \right] = [RAYL]$$

Il rapporto tra pressione e velocità dipende dal punto del campo sonoro che si va a calcolare

Z si può vedere anche come:

$$Z = \rho \cdot c$$

Z dipende dunque anche dal mezzo in cui l'onda si propaga.

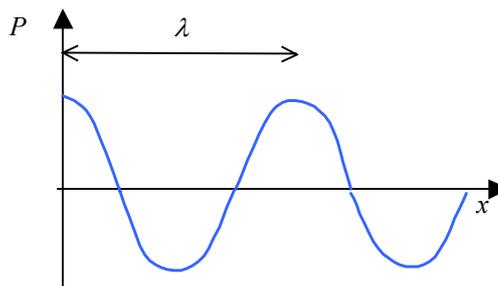
In particolare, per un'onda piana e progressiva:

$$Z = \rho_{ARIA} \cdot c_{ARIA} = 1.2 \frac{Kg}{m^3} \cdot 340 \frac{m}{s} \cong 400 \frac{Kg}{m^2 \cdot s} = 400 \frac{Pa}{m/s} = 400 RAYL$$

[Torna indice](#)

5.4 Lunghezza d'onda (λ)

La distanza tra due massimi o due minimi successivi si dice lunghezza d'onda; si indica con la lettera λ .



Se si passa dal dominio dello spazio al dominio del tempo questa grandezza corrisponde al periodo.

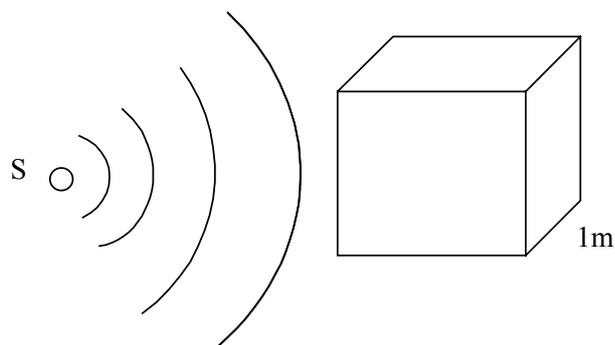
A questo punto siamo in grado data una certa frequenza ed una certa velocità del suono di determinare quale è la lunghezza d'onda corrispondente.

La frequenza infatti è il reciproco di un tempo; la lunghezza d'onda è uno spazio percorso, quindi, essendo la velocità spazio diviso tempo,

$$\lambda = T \cdot c \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

Dunque tanto più è elevata la frequenza tanto più la lunghezza d'onda è piccola. Quest'ultima relazione ha un notevolissimo significato pratico.

Si consideri infatti un cubo di lato un metro innanzi al quale è posta una sorgente sonora che emette suoni a diverse frequenze.



Cubo investito da un'onda sonora

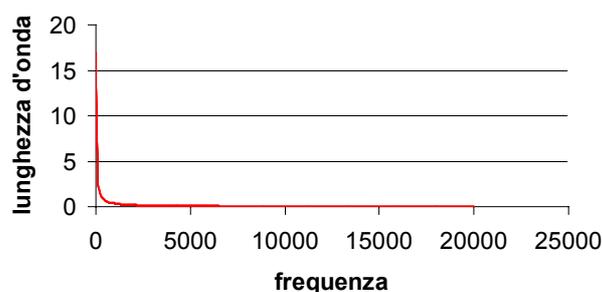
L'aumento della frequenza diminuisce la lunghezza d'onda e viceversa; quindi le dimensioni dell'onda ad alte frequenze divengono trascurabili rispetto a quelle del cubo che costituisce un ostacolo alla propagazione sonora. Un ostacolo è dunque tale per un'onda se e solo se è superiore alla lunghezza d'onda.

Facciamo alcuni esempi:

- * per $f = 20000\text{Hz} \Rightarrow \lambda = 17\text{mm}$: ho dimensioni irrisorie rispetto a quelle del cubo che quindi oscurerà l'onda acustica
- * per $f = 1000\text{Hz} \Rightarrow \lambda = 0.34\text{m}$: questa è una situazione ibrida infatti dietro al mio cubo si formeranno complessi fenomeni di interferenza
- * per $f = 20\text{Hz} \Rightarrow \lambda = 17\text{ m}$: questa volta sono le dimensioni dell'ostacolo ad essere trascurabili rispetto a quelle dell'onda che, quindi, non sarà schermata.

| f | lunghezza d'onda | f | lunghezza d'onda | f | lunghezza d'onda |
|------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| 20 | 17 | 6680 | 0,050898204 | 13340 | 0,025487256 |
| 686 | 0,495626822 | 7346 | 0,046283692 | 14006 | 0,024275311 |
| 1352 | 0,25147929 | 8012 | 0,042436345 | 14672 | 0,023173391 |
| 2018 | 0,168483647 | 8678 | 0,039179534 | 15338 | 0,022167167 |
| 2684 | 0,126676602 | 9344 | 0,036386986 | 16004 | 0,021244689 |
| 3350 | 0,101492537 | 10010 | 0,033966034 | 16670 | 0,020395921 |
| 4016 | 0,084661355 | 10676 | 0,031847134 | 17336 | 0,019612367 |
| 4682 | 0,072618539 | 11342 | 0,029977076 | 18002 | 0,01888679 |
| 5348 | 0,063575168 | 12008 | 0,028314457 | 18668 | 0,018212985 |

La tabella, compilata con un foglio di calcolo, riporta la lunghezza d'onda corrispondente ad una certa frequenza quando il mezzo propagante è l'aria.



Il grafico ottenuto interpolando i dati ottenuti tramite il foglio di calcolo mostra l'andamento della lunghezza d'onda al variare della frequenza.

[Torna indice](#)

5.5 Campo di frequenza

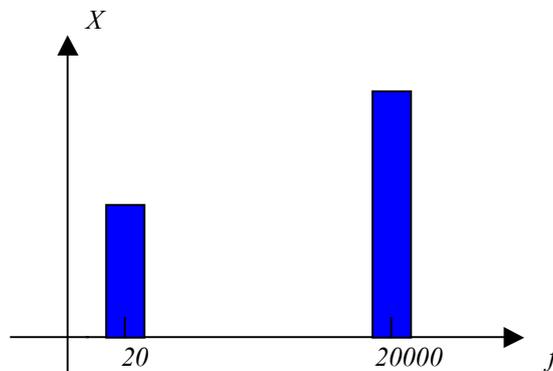
Oggi la definizione di campo di frequenza è dettata dalla normativa italiana, la quale definisce un suono come qualsiasi segnale con frequenza compresa tra venti e ventimila Hertz.

A questo range è consentito un margine di qualche Hertz, poiché le frequenze indicate sono quelle di centro banda di filtri che hanno una certa frequenza di taglio e quindi una certa ampiezza intorno a quella di centro banda.

Il notevole range di frequenze che il suono può assumere, tre ordini di grandezza, spesso può essere fonte di alcuni problemi.

Quando si lavora su segnali con lunghezza d'onda che assumono valori in un intervallo più ristretto, posso considerare i valori intermedi senza invalidare il risultato della sperimentazione.

Diversamente, per il suono, ciò che succede alle basse frequenze è diverso da ciò che succede alle medie od alle alte frequenze.



Campo di frequenza del suono

[Torna indice](#)

5.6 Pressione sonora

Fino ad ora abbiamo trattato uno dei fenomeni che caratterizzano l'acustica: tale fenomeno è il movimento delle particelle caratterizzato da spostamento, velocità ed accelerazione.

Tuttavia esiste una nuova grandezza fondamentale: la pressione sonora.

Ricordiamo la natura oscillatoria del campo sonoro: le particelle che lo costituiscono oscillano intorno ad una certa posizione di equilibrio. L'energia posseduta da tali particelle è la somma di due contributi energetici: quello cinetico e quello potenziale.

Il contributo cinetico è fruibile fino a che la particella è in movimento; quando questa si ferma per un attimo, prima di riportarsi nelle posizioni da cui proveniva, l'energia diviene potenziale.

Per il principio di conservazione dell'energia infatti l'energia posseduta deve essere sempre la stessa.

Ora non rimane che chiederci: sotto che forma è presente l'energia potenziale nel campo sonoro? Sotto forma di pressione.

Anche se questo fatto potrebbe essere difficilmente intuibile, si pensi al pistone che genera onde acustiche.

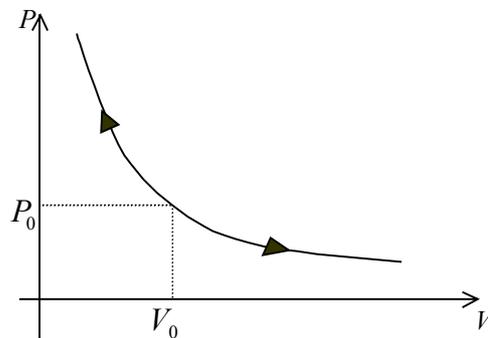
Quando lo stantuffo scorre in avanti, all'interno della cavità, sposta repentinamente una quantità di particelle.

Tuttavia, più a valle dello stantuffo, un'altra quantità di particelle è ancora in quiete e oppone una resistenza a tale evento.

Mi trovo quindi nella situazione di un pistone che, producendo una diminuzione di volume in una cavità contenente un gas, ne provoca l'aumento di pressione.

Dovendo tali movimenti ripetersi per centinaia di volte al secondo è ovvio che tali movimenti risultino essere molto repentini, quindi posso ritenere tale evento come una trasformazione adiabatica anche se il sistema non è isolato.

Questo significa che il gas all'interno della cavità si sta muovendo secondo una legge descritta dalla seguente formula: $pV^\gamma = \text{cost.}$

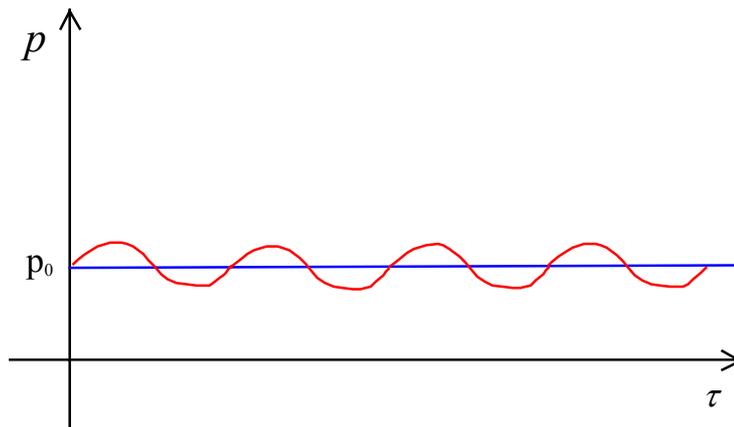


Il grafico mostra come la pressione acustica oscilli intorno ad un valore di pressione che è quello in cui si trova il mezzo di propagazione.

Sia allora p' la cosiddetta pressione sonora, $p(\tau)$ la variazione della pressione complessiva che fluttua nel tempo e p_0 la pressione atmosferica. Si avrà che:

$$p' = p(\tau) - p_0$$

Diagrammando questa legge avremo:



Fluttuazione con legge sinusoidale della pressione acustica attorno alla pressione atmosferica P_0 , in funzione del tempo.

Quando due particelle si avvicinano localmente la pressione s'innalza, mentre quando due particelle rimbalzano lontano l'una dall'altra, il gas si dirada e la pressione scende al di sotto del valore della pressione atmosferica.

Le pressioni in gioco in campo sonoro sono comunque sempre piccolissime, si raggiunge infatti la pressione di un Pascal quando il suono raggiunge un valore di

novantaquattro Decibel; si capisce quindi che le variazioni di pressione intorno a quella atmosferica sono pressoché infinitesime.

Dunque la fluttuazione di pressione rispetto a p_0 è trascurabile, perché è un valore centomila volte più piccolo del valore medio che ha la pressione atmosferica; stiamo quindi parlando di un fenomeno che implica un trasporto di informazione con una minima spesa dell'energia.

Una tale legge del moto si propaga anche in istanti molto grandi con pochissima variazione: è vero che cambierà ampiezza, che ruoterà la fase, ma la forma d'onda viene trasportata priva di alterazioni a distanze anche notevoli e rimane perfettamente decifrabile il significato del suono.

La capacità di trasportare informazione è grandissima in rapporto alla quantità di energia impiegata (solo recentemente si è riusciti a trasportare lo stesso livello di informazione – voce umana, parlando di telefonia cellulare – a distanze maggiori di quelle di cui è in grado di fare il campo acustico impegnando potenze confrontabili con queste). È un efficiente sistema di trasporto: con segnali dotati di pochissima energia si è in grado di trasportare un quantitativo di informazione notevole anche a grandi distanze.

[Torna indice](#)

5.7 Legame tra Pressione e Velocità

Per capire il rapporto tra pressione e velocità si pensi all'esempio del pendolo: quando la velocità è massima l'energia potenziale è nulla e quando è massima l'energia potenziale è nulla la velocità. Se si diagramma la pressione in funzione della velocità, si nota che laddove la velocità è massima la pressione è nulla e dove la pressione è massima la velocità è nulla.

Matematicamente questo si spiega dicendo che la velocità è descritta da una funzione cosinusoidale

$$v = X\omega \cos(\omega\tau - kx)$$

mentre la pressione da un sinusoidale anche se quest'ultima relazione verrà dimostrata in seguito:

$$p = P_{\max} \sin(\omega\tau - kx)$$

In proposito è significativo sottolineare un'interessante analogia tra la propagazione acustica attraverso un mezzo elastico-massivo e la propagazione di una corrente alternata in un circuito elettrico.

Facendo viaggiare corrente in esso si hanno infatti due grandezze imprescindibili la tensione V e la corrente I si può giungere alla conclusione che la pressione in acustica sta alla tensione in elettrotecnica come la velocità sta alla corrente. Anche per l'acustica come per la situazione elettrica il trasporto energetico risulta essere massimo quando le due componenti pressione e velocità sono in fase.

$$I = pv \cdot \varphi$$

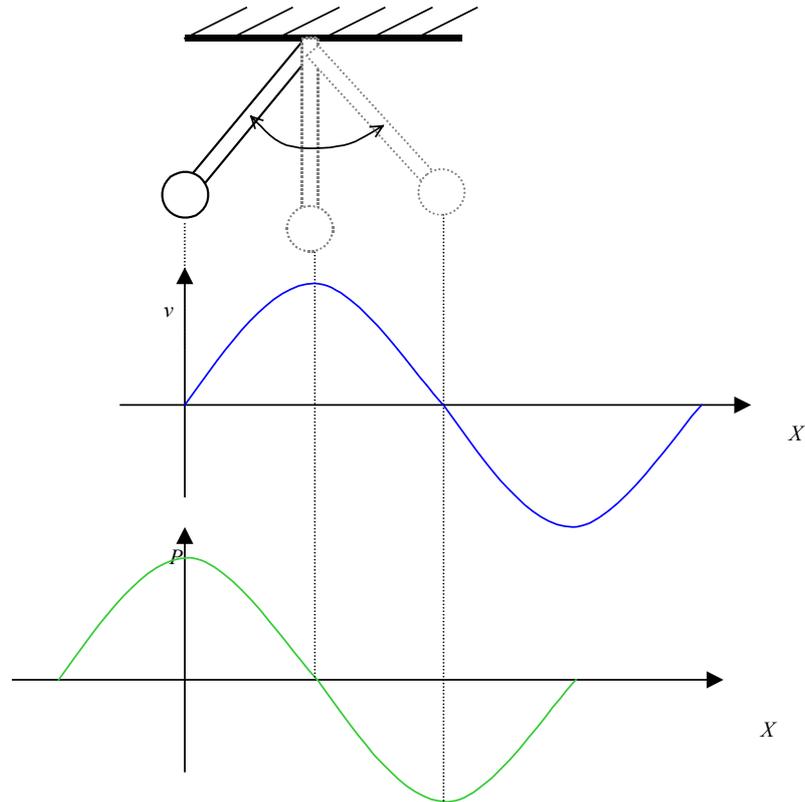
Da questa formula si ricava che:

$$1) \varphi = 90^\circ \rightarrow \cos\varphi = 0 \rightarrow I = 0$$

Quando lo sfasamento è di novanta gradi si dice che il sistema è energeticamente conservativo, cioè l'energia non si propaga (es. tubo tappato alle due estremità).

La situazione in questo caso rispecchia la figura seguente, cioè quando ho forza non ho velocità e quando ho velocità non ho forza e il trasferimento di energia è nullo.

Quest'ultimo sarebbe un caso di onda stazionaria, cioè un sistema dove l'energia c'è, ma oscilla spostandosi periodicamente tra energia cinetica e potenziale; considerazione che dovrebbe riportarci all'idea del pendolo in cui l'incessante travaso di energia cinetica in potenziale e viceversa fa sì che questa si conservi ma non si propaghi.



Il disegno raffigura, tramite l'idea del pendolo, come in casi di completo sfasamento tra velocità delle particelle e pressione il massimo di una corrisponde all'annullamento dell'altra e viceversa.

2) $\varphi = 0^\circ \rightarrow \cos\varphi = 1 \rightarrow I = pv \neq 0$

Siamo qui in condizioni di propagazione e di onde progressive. Pressione e velocità sono in fase e quindi si ha trasporto di energia.

3) $0^\circ < \varphi < 90^\circ$

Questa situazione rispecchia la realtà: pressione e velocità non saranno mai né in fase né sfasate di novanta gradi ma saranno generalmente di un determinato angolo compreso tra zero e novanta gradi.

Questo fatto è stato compreso solo all'inizio degli anni novanta e solo di recente è stata elaborata una teoria matematica in grado di studiare il suono in questa più veritiera situazione che tiene conto di una quota di campo che propaga energia e di una quota di campo oscillante che non propaga energia.

[*Torna indice*](#)

5.8 Densità Energetica Sonora (D)

La propagazione di un'onda in un mezzo comporta anche la propagazione di energia data dalla presenza di variazione di velocità e pressione a livello locale.

Per misurare tale energia si introduce il coefficiente di densità di energia (D).

D si può esprimere in due modi:

$$1) D = \frac{E}{V} \quad [D] = \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

Come si vede, tale coefficiente misura l'energia per unità di volume.

In campo sonoro $E = E_C + E_P$

Dato che:

$$* E_C = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} \rho V v^2 \rightarrow \frac{E_C}{V} = \frac{1}{2} \rho v^2 = D_C \text{ Densità cinetica}$$

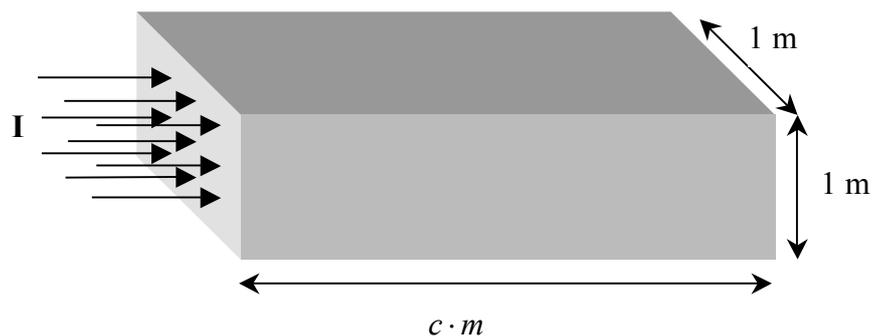
$$* E_P = \frac{1}{2} \frac{p^2 \cdot M}{\rho^2 \cdot c^2} \rightarrow \frac{E_P}{V} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho c^2} = D_P \text{ Densità potenziale}$$

Dunque D diventa:

$$D = \frac{E_C + E_P}{V} \rightarrow D = \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho c^2}$$

- 2) Prendendo come riferimento un'onda piana di area pari ad 1 m² che in un secondo percorre c m (dove c è la velocità del suono) si osserva che l'intensità I dell'onda si "diluisce" all'interno del parallelepipedo di volume c m³.

Graficamente:



Da quest'osservazione si ricava la definizione del coefficiente D :

$$D_{PROP} = \frac{I}{c}$$

Dunque

$$D = D_{PROP} + D_{STAZ} = \frac{I}{c} + D_{STAZ} \text{ per una generica onda}$$

Questo vale per una generica onda.

Per le onde stazionarie, $D_{PROP} = 0$

Per le onde progressive, $D_{STAZ} = 0$

Dunque, per le onde piane progressive:

$$D_{PROP} = \frac{I}{c}$$

$$D_{STAZ} = 0$$

Ma $I = I_i + I_r$ (vedi lezione successiva)

$$\text{Dunque } D = \frac{I_i + I_r}{c} \rightarrow D \cdot c = I_i + I_r \text{ per le onde piane progressive}$$

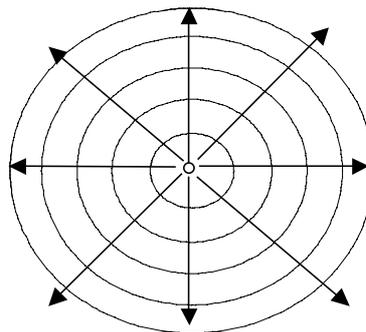
[Torna indice](#)

6. PROPAGAZIONE PER ONDE SFERICHE PROGRESSIVE

La trattazione fino ad ora eseguita, riguardo lo studio delle onde acustiche, è stata incentrata sul comportamento delle onde piane, cioè di quelle particolari manifestazioni oscillatorie riguardanti l'aria, che si manifestano all'interno di cilindri (nell'idealità di lunghezza infinita) come possono essere, ad esempio, le canne di un organo o i condotti di aspirazione e scarico di un motore a combustione interna.

Anche dall'inattuabilità pratica della 'ipotesi pistone infinito', nasce l'esigenza di considerare in termini per quanto possibili rigorosi, la situazione di onde che si propagano nello spazio tridimensionale, come accade in effetti, per onde in uscita da un cilindro di lunghezza finita, o più semplicemente per quelle onde che vengono emesse da un comunissimo altoparlante.

Focalizzeremo la nostra attenzione sulla cosiddetta sorgente sonora sferica. La sua principale caratteristica è quella che tutti i punti della sua superficie vibrano uniformemente in fase, spostandosi radialmente rispetto alla posizione di equilibrio per effetto di contrazioni ed espansioni. Le onde generate da una simile sorgente, dette appunto onde sferiche, si propagano con le stesse modalità in tutte le direzioni, mantenendo sempre la simmetria sferica, per cui il fronte d'onda sarà costituito da superfici sferiche concentriche.



Come detto prima, tralascio qua tutte le formule che riguardano le onde sferiche, troppo complicate e non trattate a lezione, limitandomi a considerazioni generali.

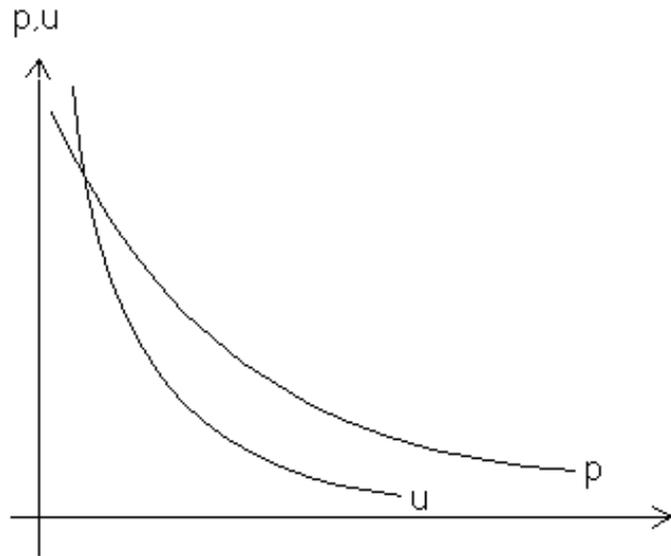
Da queste formule si può notare come sia il modulo della velocità, sia il modulo della pressione sono termini non costanti (dipendendo dal raggio r) e sono grandezze complesse costituite da una parte reale e da una parte immaginaria. Ricordiamo tuttavia che pressione e velocità, essendo grandezze fisiche, devono aver anche significato fisico, cioè devono assumere valori reali: a noi dunque interessano prevalentemente le loro parti reali.

Sia la pressione che la velocità dipendono dal raggio r . In particolare:

- la pressione è direttamente proporzionale al raggio

$$P = P_0 \cdot \frac{R_0}{r} \cdot \cos(\omega \tau)$$

- la velocità è proporzionale al quadrato del raggio.



andamento del modulo di p ed u

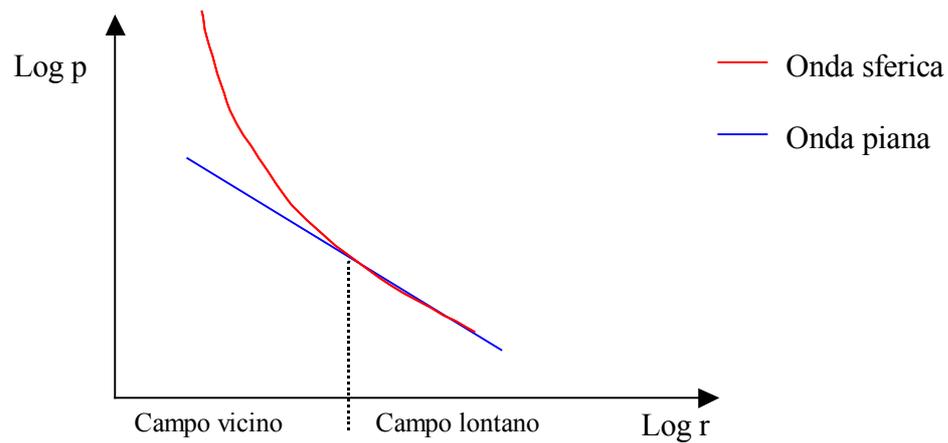
A parte l'andamento non rettilineo che ci si poteva immaginare, notiamo un fenomeno d'inversione delle due grandezze in prossimità dell'origine del riferimento (il centro della sfera). Man mano che ci si avvicina, la velocità tende a crescere molto più rapidamente di quanto non faccia la pressione, cosa che non succede lontano dall'origine, dove quest'ultima, pur andando a valori infinitesimi come la velocità, si mantiene sempre ad una soglia più sensibile. Ne scaturisce una riflessione del tutto generale: lontani dalla sorgente sonora, è più probabile udire un suono (l'orecchio umano è sensibile alla pressione acustica e la utilizza come "veicolo" sonoro) che avvertirne gli effetti perturbativi su particelle circostanti.

Sempre dal grafico sovrastante si può dedurre che l'impedenza, definita come il rapporto fra i moduli di pressione e velocità, varia anch'essa con il raggio. Vi è quindi uno sfasamento variabile fra pressione e velocità: ciò implica che il trasporto dell'energia è imperfetto dato che il miglior trasporto possibile si ha quando pressione e velocità sono in fase. Tale fenomeno è tanto più evidente quanto più piccolo è il raggio R della sorgente sonora, poiché tale sorgente è caratterizzata da una potenza d'irradiazione limitata.

A questo proposito è interessante osservare come varia la funzione $Z(r)$ nei casi estremi di distanza r molto piccola e molto grande rispetto alla lunghezza d'onda λ :

* $r \gg \lambda$ (campo lontano) \rightarrow l'impedenza assume valore puramente reale e la sua fase è ovviamente nulla: ci si ritrova pertanto nel caso di un fronte d'onda piano precedentemente studiato.

* $r \ll \lambda$ (campo vicino) \rightarrow l'impedenza si approssima allo zero, ma essa è fortemente reattiva: ciò significa che pressione e velocità sono completamente sfasate, determinando un'efficienza di radiazione pessima dovuta ad una riflessione di energia che ritorna sulla sorgente sferica.



[Torna indice](#)

7. OSSERVAZIONI SULLE GRANDEZZE FISICHE:

In generale per avere una caratterizzazione completa del campo si deve disporre di due tipi di grandezze:

* *grandezze di campo* = pressione, velocità

* *grandezze energetiche* = intensità, densità

Esse sono omogenee tra loro ma non tra i due gruppi (pressione e velocità sono omogenee, pressione e densità sono disomogenee).

Per questo motivo è errato pretendere di calcolare il rapporto tra intensità e pressione (permesso solo nel caso dell'onda piana progressiva)! Il risultato a cui si arriverebbe è un numero indefinito, in quanto si effettua il rapporto tra una grandezza intensimetrica, vettoriale, e una grandezza scalare. Bisogna fare molta attenzione perché questo problema è stato fonte di numerosi errori in passato. Solo recentemente, negli anni Novanta, l'ente normativo internazionale ISO (International Standard Organization) ha emesso delle norme tecniche in riguardo.

[Torna indice](#)