

S.S.I.S. - Scuola di Specializzazione per  
l'Insegnamento Secondario della Toscana  
Sede di Firenze

Fisica classica

# Fenomeni ondulatori in acustica

Maria Rita Lungo



Anno accademico 2008/2009

# Introduzione

L'acustica e soprattutto l'acustica musicale è un argomento che suscita grande interesse negli studenti, molti dei quali suonano qualche strumento o più semplicemente sono forti consumatori di musica.

Questo lavoro si divide in due parti: la prima è una breve descrizione della metodologia didattica che secondo me si potrebbe utilizzare per introdurre l'argomento; la seconda una altrettanto breve descrizione dei contenuti, pensata per gli studenti (quindi con gli strumenti matematici in loro possesso) di un triennio della scuola secondaria di secondo grado.

In particolare ho assunto lo studio delle onde e delle onde armoniche come prerequisito, esponendo soltanto i fenomeni ondulatori relativi al suono.

## Metodologia didattica

PREREQUISITI:

- funzioni trigonometriche elementari;
- cinematica e dinamica;
- oscillazioni e onde (in particolare: periodo, frequenza, ampiezza, fase e lunghezza d'onda);
- onde armoniche.

Tentando di ripercorrere le fasi del metodo scientifico, si potrebbe iniziare lo studio sul suono, proponendo agli studenti qualche esperimento. Ne ho riportati due, di semplicissima realizzazione che possono essere addirittura riprodotti in aula.

### Esperimento 1

Materiale occorrente: sveglia, campana di vetro in cui è possibile creare il sottovuoto.

Scopo: il suono non si propaga in assenza di aria.

Descrizione: porre una sveglia sotto una campana di vetro trasparente entro la quale viene tolta l'aria: il suono si affievolisce, fino a scomparire.

Conclusione: il suono è una vibrazione di un corpo elastico che si propaga esclusivamente attraverso un mezzo.

Note: In alternativa alla sveglia, si può utilizzare un cellulare con suoneria e vibrazione attiva, per il maggiore interesse che suscita nei ragazzi. Inoltre se il laboratorio della scuola non è fornito di pompa ad aria si può togliere un po' d'aria dalla campana di vetro con l'introduzione di una candela accesa (in questo caso, però si avverte solo un affievolimento del suono).

## **Esperimento 2**

Materiali: bacinella con acqua, sassi, sbarre di metallo, legno, plastica.

Scopo: propagazione del suono in mezzi diversi.

Descrizione: Produrre suoni nell'acqua tramite i sassi e ascoltarli tramite bacchette di legno poi di ferro e immergere un orecchio nell'acqua ed ascoltarli. Attraverso quali materiali i suoni sono avvertiti con maggiore intensità?

In ordine decrescente d'intensità, la risposta (che dovrebbe essere fornita dagli studenti) è:

1. Bacchetta di ferro
2. Bacchetta di legno
3. Acqua
4. Aria

Conclusione: il suono si propaga nella materia e più efficacemente nei mezzi più densi.

A questo punto proponiamo agli studenti l'analisi di alcune esperienze di vita quotidiana, chiedendo loro di basarsi sul senso comune di suono.

**Le guide indiane** Avete visto sicuramente nei film western che le guide indiane, appoggiando l'orecchio sul terreno, erano in grado di prevedere l'arrivo di cavalieri e di carri, e che, appoggiando l'orecchio sui binari della ferrovia, potevano prevedere l'arrivo del treno. Come facevano?

**Il lampo ed il tuono** Durante i temporali, prima si vede il lampo e dopo un po' arriva il tuono. Perché, secondo voi?

**L'eco** In un cortile molto ampio o fra due gole in montagna, si può sentire l'eco: pronunciando ad alta voce una sillaba, si sente ripetuta. Come avviene il fenomeno? Come mai non si sente sempre?

Da queste osservazioni dovrebbero emergere già alcune importantissime proprietà del suono:

1. il suono si trasmette più velocemente nei solidi che nell'aria (per questo gli indiani prevedevano l'arrivo dei carri attraverso l'uso dei binari o del terreno);
2. il suono "viaggia" più lentamente della luce;
3. il suono è soggetto ad una caratteristica tipica delle onde, cioè la riflessione.

Da queste considerazioni si potrà poi costruire l'impianto teorico esposto di seguito. Ovviamente sono da preferire lezioni dialogate che diano largo spazio alle esperienze dei ragazzi ed alle loro conoscenze (e misconoscenze) sull'argomento.

In particolare, se si lavora in classi in cui c'è qualche allievo musicista, può essere interessante chiedere conferme ed approfondimenti sulle cose dette.

# Contenuti

## 1 La natura ondulatoria del suono

Nel linguaggio comune sono abitualmente utilizzati i termini onda sonora, riflessione del suono, suono armonico, che suggeriscono l'idea che il suono sia di fatto un fenomeno con caratteristiche ondulatorie. Qualunque suono è prodotto dalla vibrazione di un corpo e, più precisamente, possiamo dare la seguente definizione:

**il suono è l'insieme delle perturbazioni meccaniche che, modificando la densità locale dell'aria (o comunque del mezzo in cui si propagano), creano successive compressioni e decompressioni trasportando energia meccanica secondo le modalità dell'onda longitudinale.**

Ricordiamo che un'onda longitudinale è caratterizzata dal fatto che la direzione di propagazione dell'onda è sempre parallela ai movimenti complessivi delle molecole che costituiscono il mezzo stesso.

Quindi si può definire onda acustica qualsiasi onda longitudinale. Poiché il suono è un fenomeno ondulatorio, sono valide tutte le leggi derivate per i fenomeni delle onde in generale come la riflessione, la rifrazione, la diffrazione, il principio di sovrapposizione, le leggi sulle onde stazionarie, ecc. . .

### 1.1 La velocità del suono

La velocità di propagazione di un'onda sonora all'interno di un corpo si può esprimere come:

$$v = \sqrt{\frac{P_{el}}{\rho_v}}$$

dove  $P_{el}$  rappresenta la pressione cui è sottoposta la superficie del corpo e prende il nome di modulo di elasticità o di compressione. Il modulo di elasticità è tanto più grande quanto più è rigido il corpo;  $\rho_v$  rappresenta la densità volumetrica, misurabile in  $\text{Kg}/\text{m}^3$ .

### 1.1.1 La velocità del suono nell'aria

Volendo calcolare la velocità del suono in aria, sostituiamo il valore della pressione atmosferica in condizioni normali,  $p_0 = 10^5 \text{ N/m}^2$  e quello della densità dell'aria  $\rho = 1,29 \text{ Kg/m}^3$ ; si ottiene:

$$v = \sqrt{\frac{10^5}{1,29}} \text{ m/s} \simeq 278,4 \text{ m/s}.$$

Tale valore si discosta molto da quello misurato sperimentalmente, uguale a circa 330 m/s, alla temperatura dell'aria  $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La difficoltà che si incontra nel rappresentare con una teoria verificata per i corpi solidi un fenomeno che accade in un fluido come l'aria, deriva dal fatto che le particelle d'aria sono dotate di un movimento caotico che influisce sulla propagazione ordinata delle oscillazioni.

L'energia cinetica media complessiva, relativa a questi movimenti caotici è misurata dalla temperatura del gas. La velocità dell'onda sonora, oltre che dalla densità dell'aria, dipende quindi dalla sua temperatura.

Questa caratteristica non è contemplata nel modello a solidi, che ipotizza molecole rigidamente saldate tra loro a formare il materiale. Al contrario, l'agitazione termica delle molecole dell'aria favorisce la trasmissione delle onde di pressione e decompressione. Questa condizione si traduce matematicamente con il fatto che il modulo di compressione diventa  $P_{el} = \gamma p_0$ , dove  $p_0$  è la pressione atmosferica e  $\gamma$  il rapporto tra i calori specifici a pressione e volume costante, ossia l'esponente che figura nella legge per le trasformazioni adiabatiche  $pV^\gamma = \text{cost}$ .

Calcolando la velocità del suono in aria con questa correzione dovuta al fattore  $\gamma$ , che per l'aria misura (sperimentalmente) circa 1,4 otteniamo:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_v}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2}{1,29 \text{ Kg/m}^3}} \simeq 329 \text{ m/s}$$

che coincide con il valore sperimentale alla temperatura di  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . A temperatura ambiente il valore è leggermente superiore, circa uguale a 340 m/s.

Gas/vapore	Velocità del suono (Km/s)
Aria	0,332
Aria (20 °C)	0,343
Azoto	0,337
Anidride carbonica	0,259
Elio	0,972
Metano	0,430

Tabella 1: Velocità del suono negli aeriformi alla temperatura  $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

### 1.1.2 La velocità del suono nei liquidi e nei solidi

Nei liquidi, in particolare nell'acqua, come già accennato, la velocità del suono è più alta che nell'aria. Ciò corrisponde al fatto che il modulo di elasticità ha valori assai più elevati nei liquidi che nei gas.

Nei solidi si presenta una situazione analoga. Osservando i valori riportati nelle tre tabelle, si vede che la velocità di propagazione del suono è mediamente più alta nei solidi rispetto che nei liquidi e nei liquidi rispetto che nei gas.

E' bene sottolineare che il suono si trasmette in mezzi di ogni genere, ma *non nel vuoto*, dato che le onde elastiche si trasmettono solo nella materia.

Liquido	Vel. suono (Km/s)	Solido	Vel. suono (Km/s)
Benzene	1,32	Acciaio	5,98
Alcool etilico	1,17	Alluminio	6,37
Mercurio	1,45	Ottone	4,37
Acqua	1,48	Rame	4,76
Acqua marina	1,51	Vetro pyrex	5,64

Tabella 2: Velocità del suono nei liquidi e nei solidi a  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 2 Rumore e suono

E' uso comune utilizzare il termine *rumore* come contrapposto ai termini suono o musica, anche in senso metaforico. Dal punto di vista fisico, sono classificati come rumori i suoni a bassissime frequenze oppure i suoni che non hanno solo componenti armoniche, ma anche componenti non periodiche, fluttuanti e casuali.

Più la componente non periodica è preponderante, rispetto alle altre e più viene avvertito il senso di "fastidio" del rumore. Quando la rappresentazione spettrale del rumore è praticamente uniforme per tutte le frequenze si parla di rumore bianco, in analogia con la luce bianca che è composta da tutte le frequenze del visibile. Si parla invece di rumore colorato quando esistono una o più componenti spettrali di ampiezza rilevante rispetto alle altre.

Lo spettro del rumore è comunque sempre continuo, perché è teoricamente e praticamente impossibile isolare delle frequenze particolari, data la natura assolutamente casuale del fenomeno.

### 2.1 I caratteri distintivi del suono

Le caratteristiche del suono sono tre: intensità, altezza e timbro. Esse possono essere rappresentate graficamente in un diagramma pressione-tempo. La rappresentazione grafica della pressione in funzione del tempo è una sinusoide.

L'*intensità* è il carattere che distingue i suoni forti da quelli deboli ed è tanto maggiore quanto più grande è l'ampiezza dell'onda e di conseguenza quella del

moto vibratorio delle particelle dell'aria. Essa viene definita come il rapporto tra la potenza media che attraversa perpendicolarmente una data superficie e l'area della superficie. Dal punto di vista grafico, nel diagramma pressione-tempo, i suoni più intensi sono rappresentati da “creste più alte”. Nel SI l'intensità sonora si misura in watt al metro quadro ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Le variazioni di pressione che generano le onde acustiche udibili dall'uomo sono molto piccole rispetto alla pressione atmosferica: infatti il suono più debole che l'orecchio umano può percepire (**soglia di udibilità**) corrisponde a circa  $20 \mu\text{Pa}$  ( $20 \cdot 10^{-6}\text{Pa}$ ), mentre il suono oltre il quale si possono avere gravi danni all'udito (**soglia del dolore**) è di circa  $20 \text{ Pa}$ .

In generale, l'intensità del suono è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente, che in pratica significa che il suono va affievolendosi via via che ci si allontana dalla sorgente.

Per questo motivo, per esprimere la pressione della vibrazione sonora non si usa una scala lineare, ma la scala dei decibel (dB), che è una scala logaritmica che consente di contenere l'intervallo da  $20 \mu\text{Pa}$  a  $20 \text{ Pa}$  tra i valori 0 e 120 dB.

La scala in decibel può anche essere riferita all'intensità sonora  $I$ , misurata in  $\text{W}/\text{m}^2$ , rispetto all'intensità di riferimento  $I_0 = 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ , che corrisponde alla soglia di udibilità, sino ad arrivare alla soglia del dolore che è circa  $1 \text{ W}/\text{m}^2$ .

In altri contesti, come ad esempio in elettronica, la scala in decibel viene utilizzata per rappresentare l'amplificazione di un segnale rispetto ad un'ampiezza di riferimento.

L'*altezza* permette di distinguere tra suoni gravi ed acuti e dipende dalla frequenza dell'onda. Una voce femminile emette, di norma, suoni più acuti (e quindi onde sonore caratterizzate da una maggiore frequenza) di una maschile; sulla tastiera di un pianoforte i suoni sono via via più acuti man mano che ci si sposta verso destra. In pratica un suono è tanto più acuto quanto minore è il tempo impiegato dalle particelle a compiere un'oscillazione completa e quindi nel diagramma pressione-tempo, i suoni più acuti sono caratterizzati da onde più “strette”.

Il *timbro* è ciò che distingue i suoni emessi da diversi strumenti musicali, anche a parità di intensità e di altezza e dipende dalla forma dell'onda. Infatti, mentre gli strumenti elettronici possono produrre suoni sinusoidali, i suoni emessi da uno strumento musicale (o dalla voce umana) sono la somma di un certo numero di suoni sinusoidali, detti armonici. La quantità di armonici necessari e le rispettive ampiezze (che, ricordiamo, sono funzioni della loro intensità, e quindi del loro “peso” all'interno del suono reale) determinano la forma dell'onda, e quindi il timbro di uno strumento musicale.

### 3 Riflessione, rifrazione e diffrazione

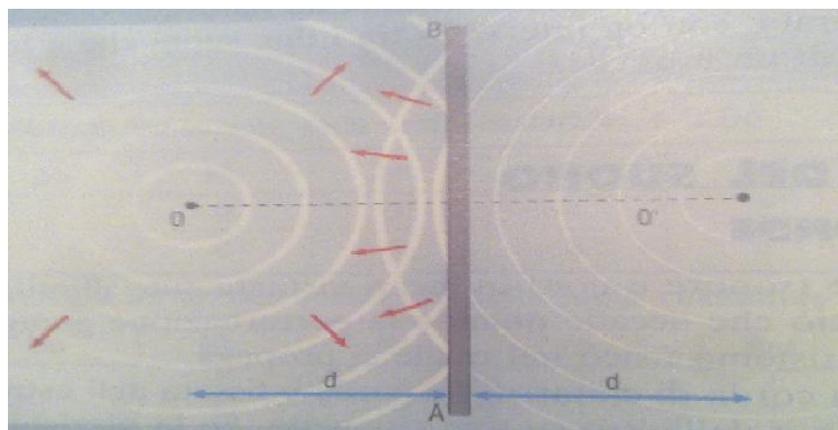
Il suono è un'onda e come tale è soggetto al fenomeno della *rifrazione*; ciò significa che l'onda sonora cambia direzione di propagazione quando attraversa regioni in cui

si propaga con diverse velocità. Naturalmente si ha rifrazione anche al passaggio del suono tra mezzi diversi.

La velocità del suono in un gas di composizione fissata e all'equilibrio, dipende solo dalla sua temperatura. La tendenza generale della temperatura dell'aria nell'atmosfera è di diminuire con la quota. Consideriamo allora, per esempio, un'onda sonora che parte da un punto a terra. L'onda diffusa da un punto è inizialmente sferica. Quando il fronte raggiunge una quota sufficiente, tuttavia, la sua velocità diminuisce, mentre la parte dell'onda che si propaga a bassa quota continua a propagarsi con la stessa velocità. Il risultato netto è quindi che il fronte si curva verso l'alto. Di conseguenza è possibile che, a terra, ad una certa distanza dalla sorgente, il suono non giunga affatto. I raggi sonori sono stati deflessi per rifrazione verso l'alto.

Ad esempio è riconducibile alla rifrazione del suono l'esperienza di suoni lontani "portati dal vento". Infatti un vento uniforme non ha sostanzialmente alcun effetto sul suono, dato che, in generale si propaga ad una velocità molto minore. Tuttavia, poiché l'intensità del vento è mediamente minore vicino al suolo che in quota, un raggio sonoro orizzontale che si propaga in favore di vento viene piegato verso il basso, mentre, se si propaga controvento, viene deflesso verso l'alto. Il suono che si propaga in favore di vento viaggia quindi più lontano.

Come tutte le onde, il suono è soggetto anche al fenomeno della **riflessione**: immaginiamo di avere una sorgente sonora nel punto  $O$ , posto ad una distanza  $d$  da una superficie solida  $AB$ , ad esempio la parete di una casa. Quando le onde sonore emesse da  $O$  giungono contro la parete, vengono riflesse, cioè si propagano all'indietro, come se fossero state emesse da una sorgente  $O'$  simmetrica di  $O$  rispetto ad  $AB$ .



Esse giungono di nuovo al punto  $O$  dal quale sono partite, in un intervallo di tempo pari a:

$$\Delta t = \frac{2d}{v}$$

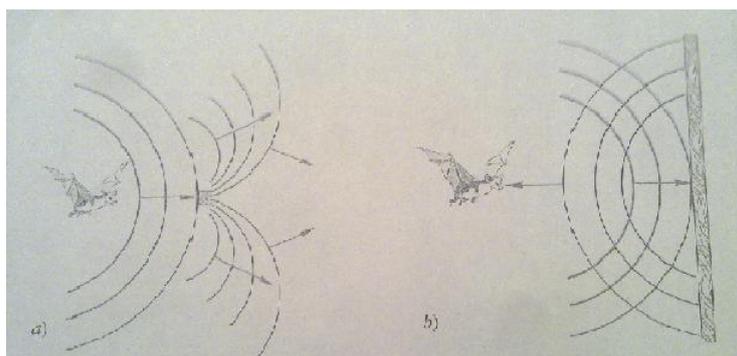
dove  $v$  è la velocità di propagazione del suono, dando luogo al fenomeno dell'*eco*. Perché l'orecchio umano avverta come distinti due suoni, è necessario che essi siano separati da un intervallo di tempo non inferiore a un decimo di secondo. Quindi si

sentirà l'eco se la distanza  $d$  è tale che il suono impieghi più di un decimo di secondo a percorrerla (circa una ventina di metri); se la distanza è minore si avvertirà, al più, un leggero rimbombo, cioè un sovrapporsi di sensazioni sonore.

Il termine eco è utilizzato come suffisso per definire strumenti o attività che hanno come principio di base la riflessione delle onde sonore: ecografia, ecocardiogramma, ecoscandaglio, quest'ultimo meglio conosciuto col nome inglese di SONAR, acronimo di Sound Navigation And Ranging (navigazione e misura della distanza per mezzo del suono).

Usualmente gli strumenti che abbiamo citato, utilizzano le frequenze sonore nel campo degli ultrasuoni, per limitare il più possibile gli effetti di **diffrazione**. Vediamo perché con un esempio che ci arriva dalla natura.

I pipistrelli non sono dotati di vista, ma di un apparato emittente e ricevente onde sonore; quando volano, devono destreggiarsi tra ostacoli che possono anche essere di piccole dimensioni, ma ugualmente pericolosi per la loro incolumità. Tuttavia, i suoni emessi dai pipistrelli hanno una lunghezza d'onda di gran lunga inferiore alle dimensioni degli ostacoli naturali, rendendo così minimo l'effetto della diffrazione, che permetterebbe alle onde di aggirare l'ostacolo impedendo quindi di avere un corretto segnale di ritorno.



## 4 Interferenza

Il fenomeno dell'interferenza è dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde. Quello che si osserva è che l'intensità dell'onda risultante in quel punto può essere diversa rispetto alla somma delle intensità associate ad ogni singola onda di partenza; in particolare, essa può variare tra un minimo, in corrispondenza del quale non si osserva alcun fenomeno ondulatorio, ed un massimo coincidente con la somma delle intensità. In generale, si dice che l'interferenza è costruttiva quando l'intensità risultante è maggiore rispetto a quella di ogni singola intensità originaria, e distruttiva in caso contrario.

## 4.1 Battimenti

Un fenomeno piuttosto sorprendente legato all'interferenza tra onde sonore sono i cosiddetti **battimenti**.

Il fenomeno si verifica quando due suoni di frequenze quasi uguali (per esempio 300 Hz e 302 Hz) vengono emessi contemporaneamente da due sorgenti distinte.

Il risultato sonoro dovuto al fenomeno dell'interferenza non è un suono uniforme come quello emesso da ciascuna sorgente da sola, ma consiste di una successione di "picchi sonori" intervallati da progressivi affievolimenti e incrementi; si ha insomma un suono armonico ad ampiezza periodicamente variabile nel tempo.

La frequenza del suono armonico risultante è pari alla somma delle frequenze dei due suoni sorgenti diviso due. I picchi sonori invece, i massimi d'ampiezza detti appunto battimenti, sono tanto più frequenti (più o meno ravvicinati in un secondo) quanto maggiore è la differenza delle frequenze tra i due suoni. Ad esempio, con sorgenti sonore a 300 Hz e 302 Hz, si hanno due battimenti al secondo (frequenza di  $302 - 300 = 2$  Hz) in un suono armonico con frequenza pari a  $(300 + 302)/2 = 301$  Hz.

I battimenti si sentono solo se la loro frequenza non supera i 7-8 "picchi" al secondo (7-8 Hz), a causa del tempo di persistenza del suono nell'orecchio umano che è di circa 0,1 secondi.

Un caso in cui i battimenti si possono sentire chiaramente è durante l'accordatura dei vari strumenti di un'orchestra a partire dal La del diapason o del violino solista. In questo caso, ci sono molte note suonate dai vari strumenti, che inizialmente sono vicine al La ma non esattamente coincidenti. Il battimento è anzi il modo con cui in pratica avviene l'accordatura: quando non lo si sente più allora le frequenze delle note sono identiche.

## 5 L'effetto Doppler

E' noto a tutti il fenomeno sonoro dell'ambulanza che procede a sirena spiegata: il suono è più acuto quando si avvicina a noi ed è più grave quando si allontana. Lo stesso accade al rombo dei motori in una gara: la frequenza del suono è più alta quando l'automobile o la motocicletta si avvicinano all'osservatore, più bassa quando si allontanano.

Il fenomeno descritto nei due precedenti esempi prende il nome di effetto Doppler. Analizzeremo tre differenti situazioni in cui la sorgente e l'osservatore sono fermi oppure in moto l'uno rispetto all'altro.

E' il caso di ricordare che la velocità di propagazione dell'onda dipende solo dal mezzo, ossia dalla sua risposta elastica e dalla sua densità, e non risente del moto della sorgente. Esiste quindi un sistema di riferimento naturale, quello del mezzo di propagazione, rispetto al quale sono misurate le velocità dell'osservatore e della sorgente.

## 5.1 Osservatore fermo rispetto alla sorgente

Consideriamo la situazione in cui un osservatore è fermo rispetto a una sorgente sonora. La sorgente emette onde sonore monocromatiche che presentano fronti d'onda sferici: in qualunque direzione o distanza dalla sorgente, l'osservatore potrà misurare la stessa lunghezza d'onda  $\lambda$ , ossia la distanza tra due punti di massima oscillazione (creste), costante in tutte le direzioni.

Conseguentemente, anche la frequenza  $f$  risulta costante, poiché  $f = \frac{v_s}{\lambda}$  e la velocità del suono  $v_s$  è costante per definizione in un mezzo omogeneo.

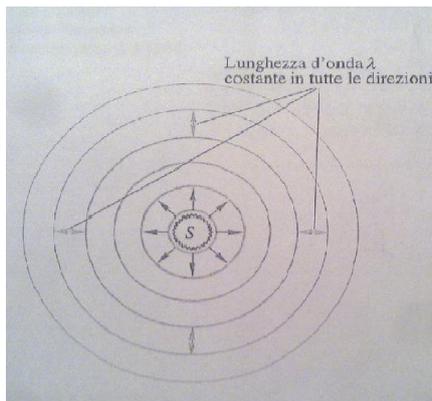


Figura 1: Effetto Doppler: osservatore fermo rispetto alla sorgente.

## 5.2 Osservatore fermo, sorgente in moto

Quando l'osservatore è fermo e la sorgente in moto rispetto al mezzo di propagazione dell'onda, la distanza tra i fronti d'onda emessi rimane costante lungo la direzione perpendicolare al moto della sorgente, non essendoci in questa direzione alcuna componente della velocità, ma cambia lungo la direzione parallela, a seconda che la sorgente si avvicini o si allontani rispetto all'osservatore.

Osserviamo che nel percorso della sorgente sonora dall'avvicinamento all'osservatore e al successivo allontanamento, esiste comunque un istante preciso in cui l'osservatore percepisce la vera frequenza della sorgente, ossia quando osservatore e sorgente si trovano affiancati lungo la perpendicolare del moto.

L'equazione che fornisce la frequenza percepita  $f'$  si può scrivere sinteticamente:

$$f' = f \frac{v_s}{v_s \mp V} = f \frac{1}{1 \mp \frac{V}{v_s}}$$

dove il segno superiore si riferisce all'avvicinamento e quello inferiore all'allontanamento. Analizzando quest'equazione si può notare infine che quando la velocità della sorgente  $V$  aumenta sino alla velocità del suono  $v_s$ , cioè  $V \rightarrow v_s$ , la frequenza di avvicinamento è altissima e tende a  $\infty$ , mentre quella di allontanamento è circa

la metà di quella a sorgente ferma. Infatti, nel primo caso, se  $V \rightarrow v_s$ :

$$f' = f \frac{1}{1 - \frac{V}{v_s}} \Rightarrow f' \rightarrow \infty.$$

Nel secondo caso:

$$f' = f \frac{1}{1 + \frac{V}{v_s}} \Rightarrow f' = f \frac{1}{1 + 1} \Rightarrow f' = \frac{f}{2}.$$

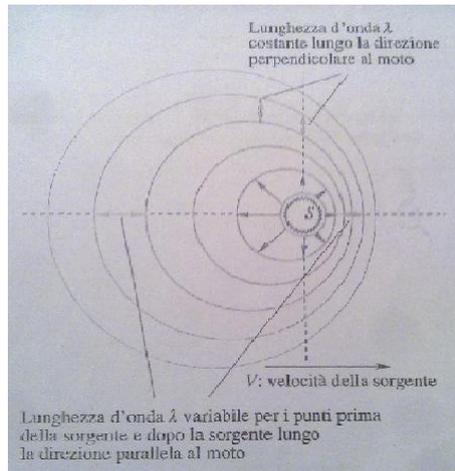


Figura 2: Effetto Doppler: osservatore fermo, sorgente in moto.

### 5.3 Sorgente ferma, osservatore in moto

Supponiamo ora che, rispetto al mezzo di propagazione, la sorgente sia ferma e l'osservatore in moto. La frequenza percepita  $f'$  è, come nel caso di sorgente in moto e osservatore fermo, maggiore della frequenza di emissione  $f$  se l'osservatore si avvicina alla sorgente. Se l'osservatore si allontana dalla sorgente, la relazione tra  $f$  ed  $f'$  si ottiene cambiando segno a  $V'$  (velocità dell'osservatore):

$$f' = f \left( 1 \pm \frac{V'}{v_s} \right)$$

dove il segno superiore si riferisce all'avvicinamento e quello inferiore all'allontanamento. Nel caso generale in cui la sorgente e l'osservatore siano entrambi in moto rispetto al mezzo di propagazione (la sorgente con velocità  $V$ , l'osservatore con velocità  $V'$ ),  $f'$  ed  $f$  sono legate da una relazione che si ottiene combinando i risultati di questo paragrafo e del precedente:

$$f' = f \left( \frac{1 \pm \frac{V'}{v_s}}{1 \mp \frac{V}{v_s}} \right) = f \left( \frac{v_s \pm V'}{v_s \mp V} \right)$$

dove i segni superiori sono validi quando sorgente e osservatore si avvicinano reciprocamente; i segni inferiori sono validi quando sorgente e osservatore si allontanano.

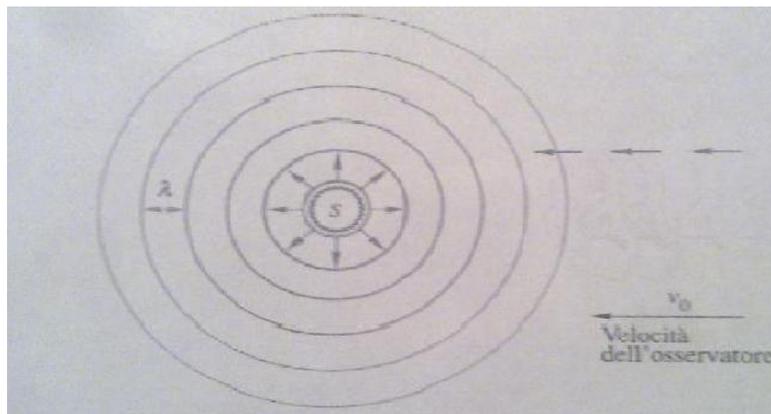


Figura 3: Effetto Doppler: sorgente ferma, osservatore in moto.

## 6 Suono e musica

Quando la sorgente del suono è un oscillatore armonico semplice, la frequenza generata è una sola, ossia l'onda è *monocromatica*; è il caso del diapason, che costituisce lo strumento elementare fondamentale.

### 6.1 La scala delle frequenze musicali

Quando il diapason viene percosso vibra alla frequenza di 440 Hz e la sua funzione d'onda ha una sola componente sinusoidale: per questo motivo il suono del diapason è detto suono puro e la relativa onda sonora **onda armonica**. Per una siffatta onda lo spostamento  $s(x, t)$  delle particelle si può scrivere come:

$$s(x, t) = s_0 \sin(kx - \omega t)$$

dove  $s_0$  è lo spostamento massimo di una molecola di gas rispetto alla sua posizione di equilibrio,  $k$  è il numero d'onda

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

e  $\omega$  è la pulsazione

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

A partire dalla frequenza emessa dal diapason si possono ricavare tutte le frequenze armoniche relative, come rapporti di numeri interi; così facendo si ottengono tutti i suoni puri musicali.

In termini musicali, al suono del diapason e a tutte le frequenze che si ottengono da questa moltiplicando o dividendo per due si dà il nome di La. Le altre note naturali e quelle alterate si ottengono da quella fondamentale tramite le armoniche successive o precedenti.

La scala naturale musicale è detta così perché rispecchia una particolare successione di suoni. Questa successione di suoni era già nota ai tempi di Pitagora, che, come narra la tradizione, riuscì a trovare in maniera “empirica” le relazioni tra i suoni già conosciuti e le tensioni delle corde vibranti: esse stavano in un rapporto razionale, cioè come divisione tra numeri interi, con la tensione di una corda di riferimento.

La scala naturale è lunga dall’essere una successione lineare di valori delle frequenze, in cui cioè, la differenza tra una frequenza e quella precedente sia costante, ad esempio tra il terzo ed il quarto grado e tra il settimo e l’ottavo le differenze tra le frequenze diminuiscono di molto rispetto alle precedenti; questi due intervalli sono detti **semitoni**, gli altri sono detti **toni**.

## 6.2 Analisi e sintesi armonica

Alla base del meccanismo di riconoscimento del timbro di una nota vi è la capacità del nostro sistema uditivo di rilevare le singole frequenze armoniche che compongono un suono complesso.

Infatti ogni oscillazione periodica può essere rappresentata con approssimazione arbitraria per mezzo di una somma di funzioni armoniche. L’esperienza, inoltre, ci dice che un suono musicale può essere ricostruito abbastanza fedelmente sommando anche soltanto una decina di componenti armoniche.

La possibilità di analizzare un suono in termini di componenti armoniche e di ricostruirlo sommando moti armonici semplici di opportuna fase, ampiezza e frequenza è stabilita da un importante teorema, dovuto al matematico francese Fourier (1768-1830).

Secondo questo teorema, se  $f(t)$  è una qualunque funzione periodica di periodo  $T$ , essa può essere scritta come

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi_1\right) + A_2 \cos\left(2\pi \frac{2t}{T} + \varphi_2\right) + A_3 \cos\left(2\pi \frac{3t}{T} + \varphi_3\right) + \dots \quad (1)$$

I coefficienti  $A_i$  divengono progressivamente più piccoli al crescere di  $i$ , di modo che i termini corrispondenti possono essere praticamente trascurati da un certo punto in poi.

Ciascuno degli addendi al secondo membro della (1) rappresenta una delle armoniche del suono; il termine di indice 1 è l’armonica fondamentale. Le frequenze delle altre armoniche sono multipli interi della frequenza fondamentale.

La possibilità di studiare oscillazioni complesse in termini delle oscillazioni sinusoidali è una caratteristica importantissima che contraddistingue tutte le funzioni periodiche. Quando si scompone un moto complesso, individuando i moti armonici componenti, si dice che si compie un’**analisi armonica**.

Viceversa, si parla di **sintesi armonica** quando si crea un segnale complesso mediante la sovrapposizione di oscillazioni sinusoidali semplici. La gran parte degli strumenti musicali elettronici funziona in questo modo.

# Approfondimenti

## L'ecocardiogramma

L'ecocardiogramma è una tecnica di diagnosi medica che consente di visualizzare l'anatomia del cuore, sia le pareti, sia le sue strutture interne, come le valvole, gli arti e i ventricoli. Le immagini sono ottenute con l'impiego di ultrasuoni che vengono diretti sulle strutture cardiache e da queste riflessi con modalità differenti a seconda della loro densità, con un procedimento analogo a quello utilizzato nei SONAR delle imbarcazioni. I segnali riflessi sono raccolti ed elaborati dalla stessa sonda che li emette e il risultato ottenuto ha un elevato grado di affidabilità, soprattutto nella valutazione della motilità delle differenti parti del cuore nelle varie fasi dell'attività cardiaca.

Le informazioni ottenibili con l'ecocardiogramma sono state recentemente accresciute dalla possibilità di seguire più dettagliatamente il flusso del sangue all'interno delle cavità e delle valvole cardiache, con una tecnica chiamata color-doppler.

## L'inquinamento acustico

L'inquinamento acustico è causato da un'eccessiva esposizione a suoni e rumori di elevata intensità. Questo può avvenire in città e in ambienti naturali. La legge n. 447/1995 art. 2 fornisce la definizione di inquinamento acustico: "l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo e alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi".

L'inquinamento acustico può causare nel tempo problemi psicologici, di pressione e di stress alle persone che ne sono continuamente sottoposte. Le cause dell'inquinamento acustico possono essere fabbriche, cantieri, aeroporti, autostrade, circuiti per competizioni motoristiche, ecc. . .

Gli effetti del rumore sull'uomo sono molteplici e possono essere distinti in:

- **effetti di danno** (alterazione non reversibile o solo parzialmente reversibile di un organo o di un sistema, obiettivabile da un punto di vista clinico e/o anatomico-patologico);
- **effetti di disturbo** (alterazione temporanea di un organo o di un sistema, obiettivabile attraverso procedure cliniche o strumentali);
- **annoyance** (sensazione di scontento o di fastidio generico, spesso influenzata oltre che dalla specifica sensibilità del soggetto, da fattori extra esposizionali e motivazionali).

L'inquinamento acustico urbano ed in particolare quello dovuto a traffico di veicoli in superficie, determina in prevalenza effetti di annoyance e di disturbo, assai raramente si può parlare di danno.

Il problema dei suoni elevati è un fatto risaputo fin dall'antichità, quando alcune civiltà allontanavano le professioni particolarmente rumorose dalla città. L'inquinamento acustico viene combattuto all'interno dell'ambiente casalingo con l'utilizzo di particolari materiali per la costruzione, come il sughero o l'utilizzo di tessuti per i rivestimenti interni.

## Bibliografia e siti web consultati

[Tip] P.A. Tipler. *Corso di fisica*, vol. 1. Zanichelli.

[Ama] U. Amaldi. *La fisica per i licei scientifici*, vol. 2. Zanichelli.

[POM] G.P. Parodi, M. Ostili, G. Mochi Onori. *L'evoluzione della fisica*, vol. 2. Paravia.

<http://it.wikipedia.org>

<http://www.cpdm-td.unina.it>

<http://www.uop-perg.unipa.it/promonda/pagine>