

Liceo Scientifico Statale "A. Righi" Roma

Piccola dispensa sul

SUONO

prof. M. Savarese

una sola nota. Rispondiamo a queste asserzioni che il pianista, quando abbassa un tasto, ha un solo elemento variabile a sua disposizione cioè la forza con la quale lo colpisce. Ciò determina la velocità del martelletto nel percuotere le corde. Una volta avvenuto ciò, tutto il resto segue automaticamente. Con questo non si vuol dire che le varie note differiscano per l'intensità: differenti forze di percussione abbiamo visto che producono una differenza nelle proporzioni con le quali le varie armoniche concorrono al suono e ciò, naturalmente, altererà un po' la qualità emotiva della nota. Per esempio una percussione con un mezzo molto duro fa aumentare la proporzione relativa delle armoniche alte e conferisce perciò alla nota un timbro poco musicale, aspro e metallico. E' comprensibile che il suono che ne deriva faccia pensare all'ira, alla delusione o alla disperazione. Questo non toglie tuttavia che le varie sfumature di tonalità che il pianista può trarre da una nota siano tutte esclusivamente il funzione delle differenti velocità che animano il martelletto quando colpisce le corde.

Il pianista finché limita la propria bravura a suonare note isolatamente non dispone davvero di possibilità maggiori di quante ne abbia un bambino che strimpella il piano.

#### Bibliografia

J. Jeans - *Scienza e musica* - Bompiani, 1940

P. Righini - *Il suono* - Bocca, 1952

A. Frova - *Fisica nella musica* - Zanichelli, 1999

nella realizzazione pratica intervengono difficoltà assolutamente insormontabili. Vediamole in dettaglio.

La prima consiste nel fatto che il suono del pianoforte ha una intensità rapidamente variabile nel tempo. È un suono quasi impulsivo nel senso che è forte quando il martelletto tocca la corda ma poi l'intensità diminuisce poco a poco fino a spegnersi del tutto in qualche decina di secondi. Questo problema comunque è facilmente superabile; sarà sufficiente analizzare come varia l'intensità nel tempo e poi cercare di riprodurre un andamento simile. Questo si è fatto e gli odierni pianoforti digitali non hanno nulla da inviare sotto questo punto di vista agli *Steinway* da concerto.

Ben più difficile invece è il secondo tipo di difficoltà che riguarda il timbro. Il pianoforte, oltre ad avere un suono ricchissimo di armoniche (le intensità delle prime sono addirittura due o tre volte maggiori dell'intensità della nota fondamentale), possiede la caratteristica che il suo timbro varia con l'intensità con la quale si suona una nota. Spieghiamoci meglio: il suono del pianoforte, come tutti sanno, è prodotto dall'urto dei martelletti contro le corde; ora, a seconda della velocità con cui i martelletti percuotono le corde si producono suoni che oltre ad avere intensità ovviamente differente hanno anche timbro diverso. Possiamo renderci conto di questo fatto pigliando "piano" un tasto: otterremo un suono molto dolce mentre pigliandolo violentemente il suono diverrà aspro, addirittura metallico. Ciò dipende dal fatto che il martelletto essendo di feltro si deforma quando percuote la corda. Ora se si preme un tasto con forza la velocità dei martelletti aumenta notevolmente ed essi percuotendo la corda si comportano come oggetti durissimi, il suono prodotto perciò diviene molto simile al clangore metallico che si ottiene gettando un mazzo di chiodi sulle corde tese. Questo problema rende l'impresa sempre più difficile in quanto si dovrebbe riprodurre un timbro diverso per ogni possibile valore dell'intensità. Con un po' di pazienza comunque potremmo sperare di risolvere anche questa difficoltà emulando un numero grande (ma pur sempre finito) di timbri da associare a determinati intervalli di valori dell'intensità.

Il terzo tipo di difficoltà purtroppo non si può superare (almeno per il momento). Essa riguarda la risonanza. Come abbiamo detto il timbro del pianoforte è ricchissimo di armoniche (per le note gravi ne sono state contate fino a 40), quindi quando suoniamo (col pedale) una nota entrano in risonanza tutte le corde corrispondenti alle varie armoniche di quella nota. Si tratta evidentemente di una situazione molto difficile da riprodurre. Provare per credere.

## Il controverso dilemma del "tocco" del pianoforte

Molti pianisti sono convinti di poter conferire al suono una grande espressione, anche trattandosi di una sola nota, quasi possedessero una loro arte segreta con la quale premere il tasto: altri poi, a sentirli, sono capaci di trarre un mondo di emozioni diverse dal suono di

## 1.1 Che cosa è il suono?

### 1. Il suono

- Sfogliando un manuale di fisica si trovano varie definizioni di suono. Per esempio:
- *perturbazione meccanica che si propaga in un mezzo elastico, tale da eccitare il senso dell'udito;*
  - *sensazione uditiva determinata da vibrazioni acustiche.*

Notiamo che il termine "suono" significa sia il fenomeno meccanico della vibrazione acustica sia la reazione psicofisica allo stimolo stesso. Una volta definita la natura psicoacustica del suono dobbiamo vedere come caratterizzare la sua componente fisica e quali siano i rapporti fra questa ed il destinatario del messaggio acustico, cioè l'uomo.

Cominciamo con l'analizzare cosa intendiamo per perturbazione meccanica. Nel nostro caso le perturbazioni meccaniche che ci interessano consistono esclusivamente in variazioni di pressione del mezzo elastico le quali si propagano in tutte le direzioni per azione e reazione delle molecole fra di loro. Sottolineiamo che la presenza dell'aria o comunque di un mezzo elastico è condizione necessaria per la propagazione del suono. Nel vuoto, per esempio sulla luna, non ci sono rumori.

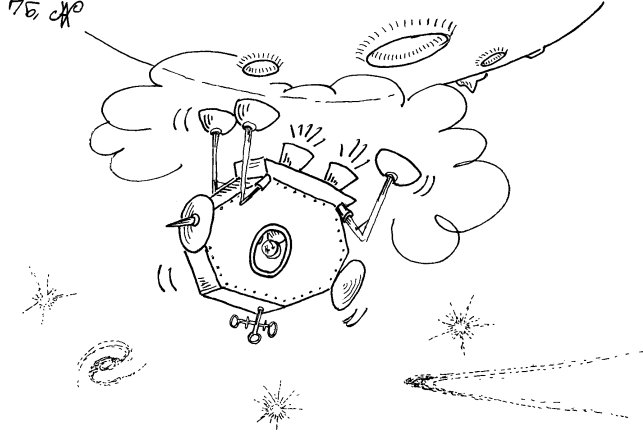


fig. 1.1 In molti film di fantascienza l'atterraggio sulla luna è accompagnato dal rombo fragoroso dei motori. Stanley Kubrick nell'indimenticabile "2001 Odissea nello spazio" non commenta questo banale errore: le sequenze degli allunaggi sono accompagnate solamente dai valzer di Strauss.

Tutti i disegni sono stati realizzati dall'amico Andrea Valli.

Questa perturbazione produce nell'aria un alternarsi di zone di compressione e rarefazione che fanno vibrare le molecole d'aria rispetto alla loro posizione di equilibrio; teniamo presente comunque che le molecole d'aria sono statisticamente ferme è solo l'energia che si propaga; per esempio verrebbe spontaneo pensare che quando parliamo mettiamo in movimento particelle d'aria che vanno a colpire il timpano del nostro ascoltatore. Ciò è falso, nel senso che ogni molecola disturba quelle vicino ma in pratica resta ferma; è l'energia che viene trasmessa rapidamente da una molecola all'altra in tutte le direzioni.

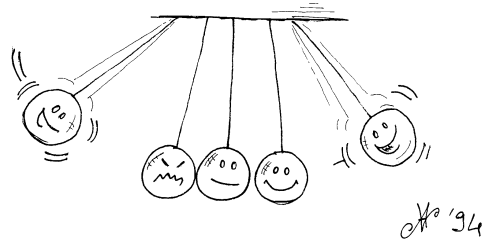


fig.1.2 I pendolini sono un classico esempio di propagazione dell'energia e non della materia.

### 1.2 Perché il suono si rappresenta con una sinusoidale?

Perché quando parliamo del suono usiamo grafici sinusoidali del tipo in fig. 1.3? Cosa c'è rappresentato sulle ascisse e sulle ordinate?

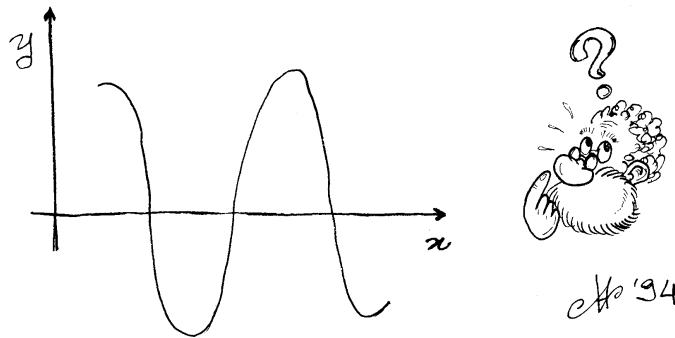


fig. 1.3 grafico sinusoidale del tipo  $y=\sin(x)$

dice consonanti e infatti formano l'accordo di *do* maggiore). La cosa importante è che queste note suonano bene insieme perché la nota fondamentale (che negli strumenti non è mai un suono puro) le contiene già dentro di se e suonandole insieme non si fa altro che rinforzare qualcosa che già esiste in natura.

Dalla metà del settecento, per motivi che non possiamo chiarire in questa sede, tutti gli strumenti ad intonazione fissa (organo, pianoforte, ecc.) sono accordati secondo la scala temperata. Questa scala divide l'ottava in 12 intervalli tutti uguali fra loro ognuno dei quali vale un semitono (e non in 8 perché oltre ai sette tasti bianchi ci sono anche i 5 neri). Tutti uguali non significa che le frequenze delle note sono messe in modo lineare. Queste frequenze, infatti, devono formare una progressione geometrica simile alla progressione di ragione<sup>4</sup> 2 dei vari *do* di ottave successive (100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, ecc.).

Ci chiediamo quanto valga questo rapporto costante (la ragione della progressione) fra le frequenze di due note successive. Sia  $x$  questo valore. Consideriamo per esempio un *do* di frequenza 100 Hz:

$$do_1 = 100 \text{ Hz}$$

Le frequenze delle note successive saranno:

$$do\# = (x \cdot 100) \text{ Hz}$$

$$re = (x \cdot x \cdot 100) \text{ Hz}$$

$$re\# = (x \cdot x \cdot x \cdot 100) \text{ Hz}$$

ecc.

dopo 12 note troverò il *do* successivo di frequenza doppia

$$do_2 = (x^{12} \cdot 100) \text{ Hz} = 200 \text{ Hz}$$

quindi

$$x^{12} = 2$$

cioè

$$x = \sqrt[12]{2}$$

### Perché è quasi impossibile costruire un pianoforte elettronico

Abbiamo visto che il timbro di un suono è determinato univocamente dalle sue armoniche quindi per riprodurre artificialmente il timbro di qualsiasi strumento è sufficiente analizzare il suono con un opportuno strumento (l'analizzatore di spettro) e poi riprodurlo combinando insieme le varie armoniche. Questo in linea di principio è vero ma

<sup>4</sup> la ragione di una progressione è il rapporto costante fra due termini successivi.

Letture

Quello che ci chiediamo ora è l'origine della scala musicale. Vogliamo sapere se le frequenze delle varie note hanno qualche ragione fisica per essere proprio quelle che sono oppure se l'unica motivazione della loro esistenza è dovuta a ragioni estetiche. Naturalmente esse sono state individuate così come noi le conosciamo solamente perché "suonano bene" una dopo l'altra. I calcoli sulla teoria delle armoniche che ora faremo sono stati formulati nel settecento quando la musica era già un'arte perfettamente sviluppata (pensiamo solitamente a J. S. Bach: 1685-1750). Le note quindi sono state trovate prima ad "orecchio" e poi si è scoperto che erano proprio quelle per un motivo ben preciso.

Cominciamo quindi la nostra spiegazione col premettere che dopo le sette note che tutti conosciamo ritorna un altro "do" che sembra praticamente identico a quello di partenza solo un po' più acuto. Guarda caso questo do è proprio il secondo armonico del do di partenza cioè ha frequenza doppia. Scriviamo adesso le note con le loro frequenze (prendiamo per esempio un do di 100 Hz)

do	re	mi	fa	sol	la	si	do
n	(9/8)n	(5/4)n	(4/3)n	(3/2)n	(5/3)n	(15/8)n	2n
100 Hz	112,5 Hz	125 Hz	133,3 Hz	150 Hz	166,6 Hz	187,5 Hz	200 Hz

Ora vedremo che se andiamo a calcolare le frequenze delle altre armoniche del do di partenza esse corrispondono alle frequenze delle note della scala. Dobbiamo solo ricordarci di dividerle per due perché ovviamente le frequenze delle armoniche vanno oltre l'intervallo considerato (dividere per due la frequenza di una nota non significa altro che andare a prendere la stessa nota dell'ottava precedente).

La seconda armonica di do è semplicemente il do dell'ottava successiva.

La terza armonica ha frequenza di 300 Hz. Siccome dividendo per due otteniamo 150 Hz possiamo subito dire che essa corrisponde al sol dell'ottava successiva.

La quarta armonica è un altro do.

La quinta armonica ha 500 Hz, bisogna quindi dividere due volte per due per rientrare nell'intervallo considerato. Otteniamo  $500/4=125$ : è un mi!

A questo punto ci fermiamo (ma se continuassimo troveremmo altre note della scala). Abbiamo trovato che gli armonici più vicini di do sono le note sol e mi e chi suona qualche strumento sa benissimo che queste note suonano benissimo insieme (sono come si

Naturalmente sulle ordinate c'è qualcosa che quantifica la compressione e la rarefazione del mezzo elastico di cui abbiamo parlato e questo non può essere altro che la pressione. Per stabilire invece cosa c'è sulle ascisse immaginiamo di produrre un suono con una macchina del tipo rappresentato in figura 1.4

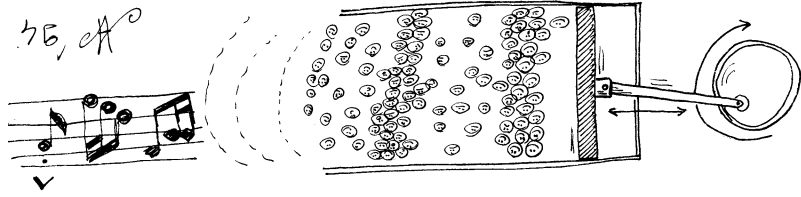


fig. 1.4 Esempio di macchina per produrre un suono

Quello che vedremo è che in realtà sull'asse delle ascisse ci può essere sia lo spazio che il tempo. Mettere lo spazio significa fotografare ad un certo istante l'aria contenuta nel cilindro e fare un grafico della pressione in funzione della distanza da un estremo. Siccome la perturbazione si muove con una certa velocità (nell'aria la velocità è di circa 340 m/s) possiamo anche metterci in un punto e vedere come varia la pressione al variare del tempo: questo è il caso in cui mettiamo sull'asse delle x il tempo. La cosa importante è che in entrambi i casi avremo dei grafici di tipo sinusoidale (fig. 1.5).

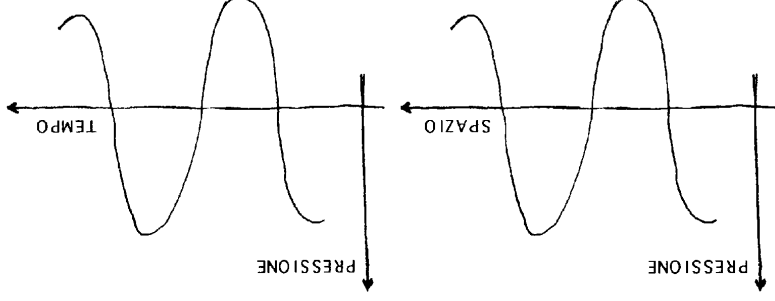
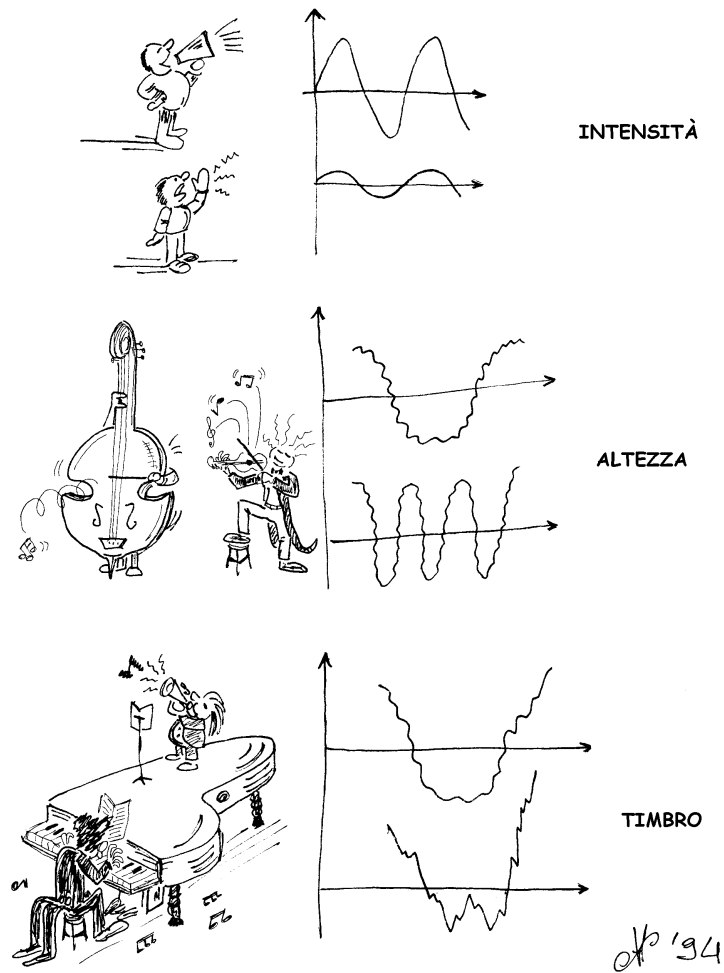


fig. 1.5 In entrambi i casi i grafici sono di tipo sinusoidale.

### 1.3 Caratteri distintivi del suono



I caratteri distintivi di un suono sono tre: intensità, altezza e timbro.

Una volta montato il circuito la prima cosa che si può mostrare agli studenti è la differenza fra suono e rumore. In questa fase gli studenti potranno divertirsi a fare qualsiasi sorta di rumore nel microfono verificando facilmente sull'oscilloscopio la non periodicità e la irregolarità della forma d'onda generata.

Cosa alquanto più difficile invece è far tacere gli studenti per mostrare loro forme d'onda di suoni diversi. Per generare suoni puri di qualsiasi frequenza si può usare se disponibile un generatore di segnali. All'uscita con impedenza di 50 ohm si potrà collegare un piccolo altoparlante. Teniamo presente che suoni di frequenza inferiore a 100 Hz, in questo modo non possono essere prodotti, a meno di non disporre di un altoparlante di notevoli dimensioni (woofer) e di un piccolo amplificatore a bassa frequenza (l'uscita a 50 ohm è di per se già non sufficientemente potente, inoltre con un altoparlante da 8 ohm è sbilanciata). Suoni di alta frequenza, con gli altoparlanti comunemente a disposizione (quello del telefono va sempre bene), possono essere riprodotti senza problemi e quindi si può determinare la soglia di udibilità di frequenza superiore e far vedere che essa varia da persona a persona. Inoltre si potrà rilevare come un suono puro è in realtà assai poco "musicale". E' interessante far notare inoltre che il generatore di segnali può essere collegato direttamente all'oscilloscopio senza operare il doppio passaggio corrente alternata -> altoparlante -> suono -> microfono -> corrente alternata. I due segnali, quello diretto e quello proveniente dal microfono, potranno essere visualizzati insieme e potranno essere rilevate le distorsioni introdotte dal microfono e la sua estrema sensibilità ai rumori dell'ambiente.

A questo punto ci si potrà sbizzarrire e mostrare la forma d'onda di tutti gli strumenti che la fantasia ci suggerisce. Per prima cosa consiglieri di cercare strumenti dal suono più puro possibile. Si può provare con il diapason ma questo purtroppo oltre ad avere un suono abbastanza flebile si smorza anche abbastanza velocemente. Uno strumento dal suono abbastanza puro è il flauto ma va benissimo per esempio anche il fischio che si fa con le labbra.

Una esperienza molto interessante consiste nel provare a comporre insieme varie armoniche per ottenere suoni dal timbro diverso. L'esperienza comporta purtroppo qualche difficoltà tecnica. Innanzitutto è abbastanza difficile reperire un numero adeguato di generatori di segnali. Anche se si trovano regolarli con precisione a frequenze multiple è ancora più difficile. Comunque con un po' di pazienza si può sperare di riuscire a far vedere qualcosa (per esempio che la terza armonica conferisce una certa nasalità, la quinta una certa tonalità che ricorda quella del corno mentre la settima è dissonante).

Se si è sprovvisti di generatori di segnali è sempre possibile usando il calcolatore mostrare sullo schermo che le armoniche modificano la forma d'onda del suono (con Derive per esempio).

**Intensità**  
 Da un punto di vista intuitivo l'intensità è semplicemente un parametro indicativo del volume. Più rigorosamente possiamo dire che l'intensità di un suono è correlata all'ampiezza della sinusoide.

**Altezza**  
 L'altezza è quella caratteristica del suono che ci consente di distinguere un suono basso (o meglio grave) da uno alto (o acuto) e di apprezzare per esempio la differenza fra due note di un pianoforte. È immediato verificare che un suono è tanto più acuto quanto maggiore è la sua frequenza (dove per frequenza si intende il numero di vibrazioni per unità di tempo; la frequenza si misura in Hertz (Hz = 1/sec).

**Timbro**

Il terzo carattere distintivo dei suoni è il timbro. Consideriamo ad esempio un pianoforte ed un violino che emettono la stessa nota con la stessa intensità: i due suoni sono evidentemente diversi. Il carattere che li distingue è il timbro. Il timbro è legato alla forma dell'onda; gli strumenti musicali comunemente noti non emettono suoni che abbiano come forma d'onda una sinusoide perfetta (uno strumento simile in realtà avrebbe un suono alquanto sgradevole) ma sono caratterizzati da forme d'onda fra loro molto differenti.

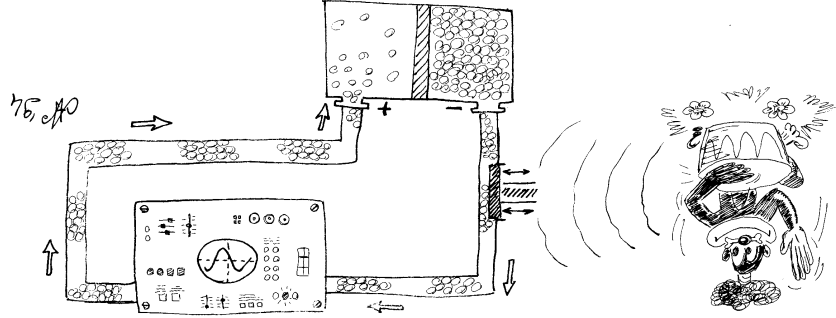


fig. 2.10 Il microfono fa variare la corrente elettrica.

**2.6 Qualche consiglio per l'insegnante**

Un semplice circuito per realizzare esperimenti sul suono è il seguente (fig. 2.11)

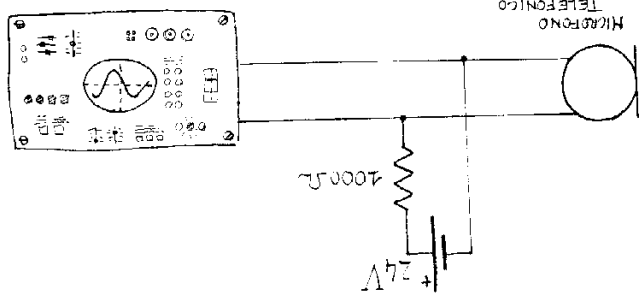


fig. 2.11 Semplice circuito per visualizzare la forma d'onda dei suoni

Per microfono si può usare quello del telefono che non avendo morsetti va collegato con un po' di nastro adesivo (e di pazienza). Il nostro ricevitore è quindi pronto e anche se un po' rozzo ha il vantaggio di essere realizzato con dispositivi facilmente reperibili e abbastanza familiari agli studenti.

## 2. La percezione del suono

Abbiamo detto che il suono è il prodotto delle vibrazioni acustiche a livello della sensazione uditiva. Questa affermazione un po' troppo sintetica richiede maggiori spiegazioni, poiché non è vero che tutte le vibrazioni sono idonee a produrre un suono.

### 2.1 Campo di udibilità

Non tutte le vibrazioni acustiche sono udibili, ma soltanto quelle la cui frequenza è compresa tra 16 e 16000 Hz. Misure recenti eleverebbero il limite superiore intorno a 20000 Hz, comunque questi limiti non sono assoluti in quanto possono variare sia da persona a persona sia con l'età (quello superiore sicuramente diminuisce con la vecchiaia).

In questi casi si fa sempre riferimento al cosiddetto "orecchio normale" e ciò pare l'unico indice logico di riferimento in quanto, trattandosi di osservazioni di carattere fisiologico, non si possono avere indizi obiettivi assoluti ma solo indici alquanto soggettivi, dato che tutto deve essere riferito alla naturalità umana, con tutte le differenziazioni che possono darsi da individuo ad individuo. Quando si parla di orecchio normale si intende riferirsi sempre a qualcosa che ha valore puramente statistico.

Nella figura 2.1 è riportata l'estensione di alcuni strumenti musicali. Notiamo che lo strumento in grado di emettere la nota più grave è l'organo. Frequenze così basse sono paragonabili a quelle dei terremoti; un simile suono più che a una nota ascoltata con l'orecchio assomiglia ad un grande brivido che investe tutto il corpo. Notiamo inoltre che per essere "udito" un simile suono ha bisogno di una intensità notevole perché l'orecchio umano, come vedremo meglio in seguito, non è ugualmente sensibile a tutte le frequenze.

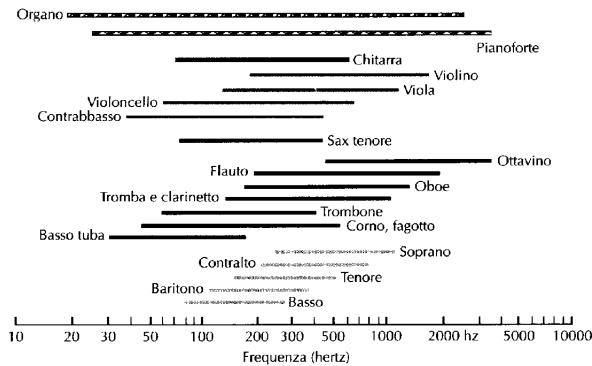


fig. 2.1. Estensione degli strumenti musicali.

L'idea che vogliamo mettere in pratica per vedere la forma d'onda di un suono è quella di mettere lungo il conduttore un dispositivo capace di far variare il flusso degli elettroni nello stesso modo di come variano nel tempo gli strati di compressione e rarefazione dell'onda sonora. Questo dispositivo è il microfono. Un microfono, per esempio quello del telefono, contiene dei granuli di carbone i quali hanno la proprietà di far passare più o meno elettroni in base alla pressione su di essi esercitata (fig. 2.9).

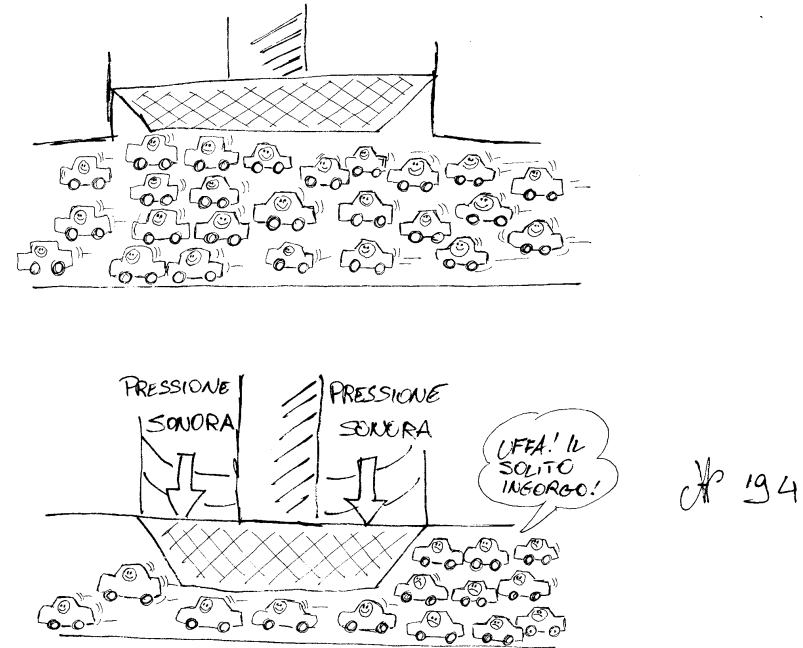


fig. 2.9 Il funzionamento del microfono.

Con un dispositivo del genere è quindi possibile creare una corrente elettrica che varia nel tempo (fig. 2.10) e le cui variazioni riproducono esattamente le variazioni di pressione generate dal suono che vogliamo studiare e quindi la sua forma d'onda.



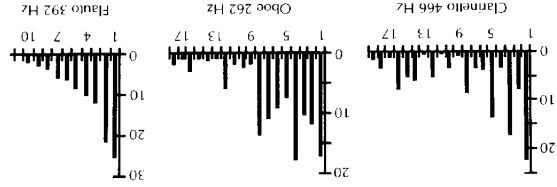


Fig. 2.7 Spettro di un clarinetto, di un oboe e di una tromba

### 2.5 Come si può realizzare qualche semplice esperimento sul suono

Quasi tutti gli esperimenti sul suono richiedono uno strumento abbastanza complicato: l'oscilloscopio. Non è assolutamente possibile spiegare in modo esauriente come faccia l'oscilloscopio a visualizzare la forma d'onda di un suono. Possiamo, in questa sede, dare soltanto dei cenni sul funzionamento di questo strumento che in realtà non riguarda in modo specifico l'acustica ma l'elettronica. Cominciamo col dire che l'oscilloscopio è in grado di far vedere su uno schermo come quello di un piccolo televisore come varia una corrente elettrica al variare del tempo (pensate la corrente elettrica come un flusso di elettroni che si muove attraverso un conduttore). Ora, se questo flusso è costante (cioè in un secondo passano sempre lo stesso numero di elettroni) sullo schermo vedremo solamente una riga orizzontale (vedi figura 2.8).

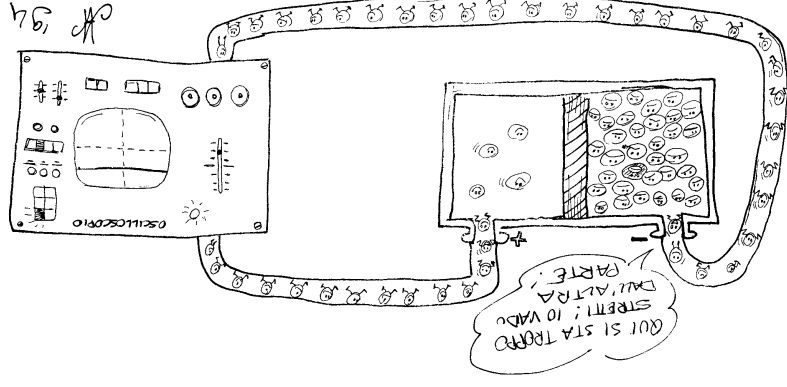


Fig. 2.8 Se la corrente è costante e costante nel tempo sull'oscilloscopio si vede una riga orizzontale.

Nessuno strumento oltre qualche migliaio di Hz. Per esempio l'ultimo tasto del pianoforte ha frequenza di 4186 Hz e la frequenza più alta in assoluto è quella dell'ottavino, un flauto di dimensioni ridotte, che arriva a 4752 Hz. Frequenze superiori risultano per l'orecchio umano alquanto sgradevoli e più che suoni sono fischi.

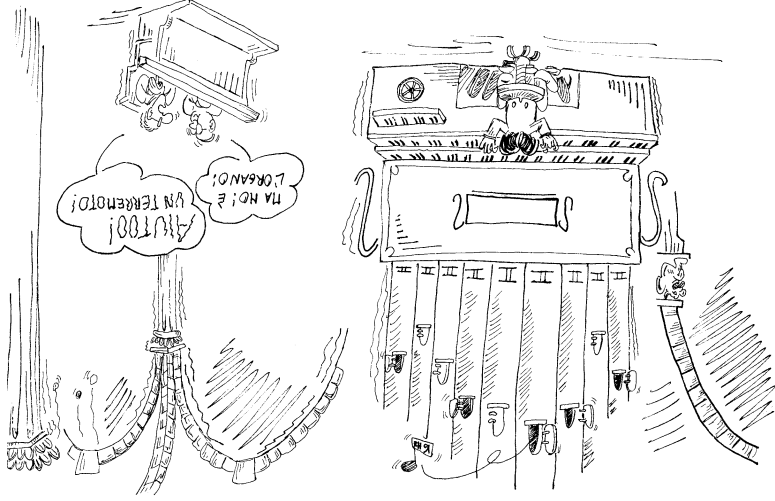


fig. 2.2 L'organo e l'ottavino.

### 2.2 Sensibilità dell'orecchio umano

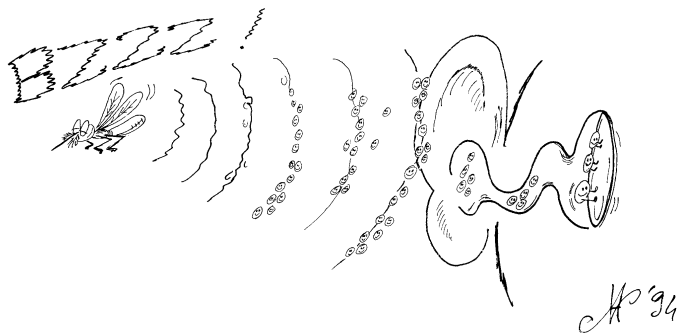
L'orecchio umano è in grado di percepire le più piccole variazioni di pressione causate da un'onda sonora attraverso l'aria e di trasformarle in vibrazioni meccaniche del timpano (costituito da una sottile membrana).

La sensibilità dell'orecchio è meravigliosa e nel campo delle sensazioni non ha equivalenti. Si pensi che lo spostamento che subisce la membrana del timpano dovuto alla

differenza di pressione provocata dal suono più debole che si possa udire equivale grosso modo, al diametro della molecola di idrogeno (che è dell'ordine di  $10^{-8}$  cm).

La variazione di pressione provocata da un'onda sonora di questa debolezza è dell'ordine di  $10^{-10}$  atmosfere. Concludiamo pertanto che l'orecchio umano è infinitamente più sensibile di qualsiasi barometro che sia mai stato costruito. Infatti, un barometro normale può al massimo avvertire la differenza di pressione che c'è fra il pianterreno e il primo piano di casa nostra. Invece la variazione di pressione corrispondente a quell'onda sonora di cui parlavamo prima, rappresenta, spazialmente, uno spostamento verticale di 0.8 micron. Quando, in segno di assenso, accenniamo lievemente con il capo, la variazione di pressione che al movimento consegue è più che sufficiente per far muovere il timpano e se non udiamo nulla questo è dovuto al fatto che non muoviamo il capo con la rapidità necessaria. Infatti, perché al cervello giunga un messaggio sonoro occorre che la variazione di pressione sia ripetuta almeno 16 volte al secondo.

Per fissare meglio le idee pensiamo al ronzio di una zanzara udito alla distanza di 2 metri. A questa distanza l'insetto si trova al centro di una sfera immaginaria il cui raggio è 2 metri, con una superficie di circa  $500.000 \text{ cm}^2$ . Poiché l'energia acustica generata dalla zanzara è uniformemente distribuita su tutta la superficie, è evidente che su ogni centimetro quadrato di questa si distribuirà una energia pari a  $1/500.000$  di quella prodotta dall'insetto. Ma non è tutto, poiché bisogna considerare che la sezione del condotto uditivo è grosso modo  $1/2 \text{ cm}^2$ , per cui la quantità di energia che va a sollecitare la membrana del timpano deve essere ancora dimezzata.



Oltre ad essere così sensibile l'orecchio copre un intervallo di intensità sonore semplicemente incredibile (almeno per frequenze da 1000 a 3000 Hz), infatti l'intervallo in potenza fra la soglia di udibilità e quella del dolore è di ben 14 ordini di grandezza. In altre parole: prendiamo una sorgente di 1 watt di potenza e cominciamo ad allontanarci fino quasi a non percepirla più. Ora ci chiediamo a quale potenza dovrò arrivare perché alla stessa distanza quel suono procuri dolore. Ebbene la potenza richiesta è 100.000 miliardi di Watt, cioè la soglia del dolore è  $10^{14}$  volte maggiore di quella di udibilità.

Questo fatto è molto interessante perché ci fa intuire che la forma d'onda dipende dalle armoniche nel senso che sommando opportunamente varie armoniche, eventualmente di intensità differenti, possiamo costruire qualsiasi forma d'onda e quindi in pratica qualsiasi timbro.

Questo risultato è stato dimostrato in generale da Fourier per qualsiasi moto periodico (periodico significa che dopo un po' di tempo si ripete sempre uguale). Il teorema si può enunciare in modo un po' grossolano dicendo che qualsiasi moto periodico può essere sempre decomposto in una somma di moti sinusoidali di cui il primo termine (cioè il fondamentale) ha la stessa frequenza del moto considerato e gli altri termini sono altrettante armoniche ognuna con opportuna ampiezza. Inoltre tale decomposizione è unica.

Nel caso del suono quindi possiamo affermare che quando pigiamo il tasto di un pianoforte (il cui suono non è affatto puro) il suono che viene emesso è la composizione di vari suoni puri (come quelli del diapason).

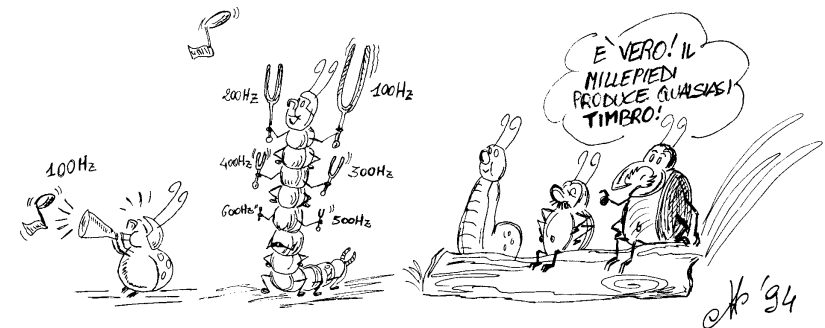


fig. 2.6 Con diapason di frequenze multiple si produce qualsiasi timbro.

Inoltre siccome il teorema di Fourier ci assicura che le armoniche, anche se in linea di principio sono infinite, da un certo punto in poi si possono trascurare perché hanno intensità sempre minore possiamo dire che un suono complesso è univocamente definito dal numero e dalle intensità delle sue armoniche. Lo spettro di un suono è un modo grafico per visualizzare facilmente le armoniche e la loro intensità. Nella figura 2.7 è riportato lo spettro di un clarinetto, di un oboe e di una tromba.

## 2.4 Il timbro e le armoniche

Abbiamo visto che la differenza di timbro fra due suoni dipende dal fatto che, in genere, i due suoni presentano una diversa forma d'onda. Vogliamo mostrare ora che la forma d'onda dipende dalle cosiddette armoniche.

Per prima cosa quindi, definiamo questo nuovo concetto. Le armoniche di un suono puro (cioè la cui forma d'onda è perfettamente sinusoidale) sono semplicemente i suoni di frequenza multipla. Per esempio se consideriamo un suono di 100 Hz le sue armoniche saranno i suoni di frequenza 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz e via dicendo. Più precisamente il suono di 200 Hz è detto seconda armonica quello di 300 terza armonica mentre il suono di partenza è chiamato fondamentale o primo armonico.

Cominciamo subito con l'osservare che se sommiamo un suono puro con una qualsiasi delle sue armoniche otteniamo un suono che ha la stessa frequenza di quello fondamentale ma una forma d'onda non più sinusoidale bensì un po' diversa. Per esempio sommiamo il primo ed il terzo armonico (vedi fig. 2.5)

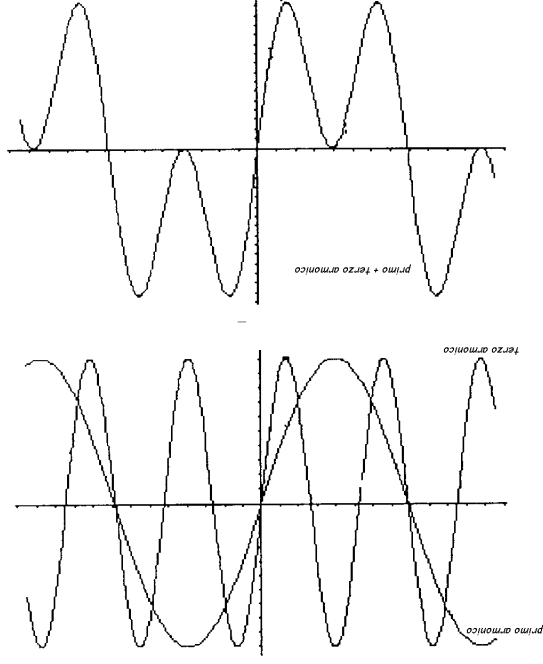


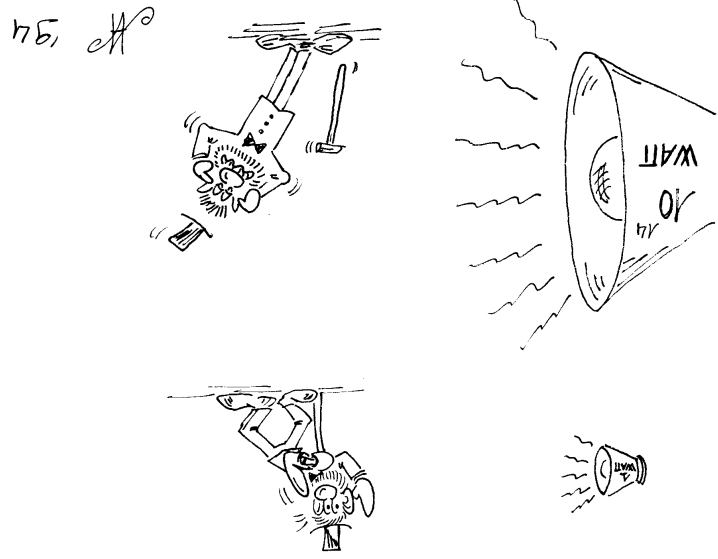
fig. 2.5 Forma d'onda risultante sommando il primo e il terzo armonico.

Viene quindi spontaneo indicare l'intensità di un suono semplicemente dicendo quante volte questo suono è più grande della soglia di udibilità invece che utilizzare la potenza per unità di superficie che l'onda trasporta. Siccome purtroppo abbiamo a che fare con numeri alquanto grandi è utile servirsi dei logaritmi e più precisamente del decibel. Il decibel è un numero puro (perché dato dal rapporto fra due grandezze omogenee) che ci indica, senza dover scrivere troppi zeri, quante volte una grandezza è più grande di un'altra infatti:

$$1 \text{ db} = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

Nel nostro caso  $P_0$  è la potenza della soglia di udibilità. Un suono di 50 db è semplicemente  $10^5$  volte più "forte" del corrispondente suono che sentiremmo appena.<sup>2</sup> Nella tabella diamo l'intensità in decibel di alcuni suoni fra i più comuni:

<sup>2</sup>Uno dei parametri fondamentali dell'alta fedeltà (ben più importante della potenza) è il rapporto segnale/rumore (*Signal/Noise Ratio*) che esprime il rapporto, in decibel, tra il segnale e i rumori introdotti dall'apparecchio. Prima dell'avvento del Compact Disk (e questo vale ancora per i registratori a cassette) un rapporto segnale/rumore accettabile era considerato intorno ai 60 db, e vi ricordate come il fruscio in assenza di musica si sentisse molto chiaramente. Con il CD si arriva ben al di sopra dei 100 db (ricordiamo, ancora una volta, che avere un segnale rumore di 100 db significa che il segnale è  $10^{10}$  volte più grande del rumore) ed effettivamente andare oltre questo valore non ha molto senso. Un apparecchio con più di 120 db (140 db vale solo per un ristretto intervallo di frequenze) in effetti non permette di sentire rumore di fondo o almeno per sentito dovremmo mettere il volume così alto da farci del male. Un'ultima considerazione sul rumore. Avrete sicuramente notato come il fruscio dei vecchi dischi fosse localizzato proprio sulle alte frequenze e infatti per toglierlo si usava un bel filtro che benché rendesse la musica un po' "sorda" lo eliminava. Ebbene, in realtà il rumore essendo un fenomeno casuale è localizzato sull'intero spettro delle frequenze. Noi lo sentiamo solo sulle note acute perché ad esse siamo più sensibili.



Soglia dell'udito	0 db
Fruscio di foglie	10 db
Parole sussurrate ad un metro di distanza	20 db
Rumori in una via tranquilla	30 db
Centro di New York nel silenzio della notte	40 db
Conversazione a due metri di distanza	60 db
Traffico stradale a Roma	82 db
Leone ruggente a cinque metri	88 db
Metropolitana al passaggio di un treno	95 db
Fabbrica di caldaie	98 db
Corazza d'acciaio martellata da quattro uomini a mezzo metro	112 db

### 2.3 La soglia di udibilità dipende dalla frequenza

Mentre la sensibilità dell'orecchio è così grande per frequenze dell'ordine di poche migliaia di Hz, per le altre le cose vanno un po' diversamente. Quello che si è fatto sperimentalmente è stato di cercare per ogni frequenza quale fosse la potenza necessaria affinché il suono fosse udibile. Ci potremmo aspettare, per esempio, che questa potenza sia costante per qualsiasi frequenza, cioè che la sensibilità sia uniforme nell'intera banda dell'udibile. Invece il grafico sperimentale del cosiddetto orecchio "normale" non viene affatto una costante ma varia al variare della frequenza. Nella figura 2.3 mostriamo questo andamento e dato che ci siamo anche quello della soglia del dolore, che si ricava allo stesso modo alzando solo "un pochino" il volume (solo  $10^{14}$  volte!).

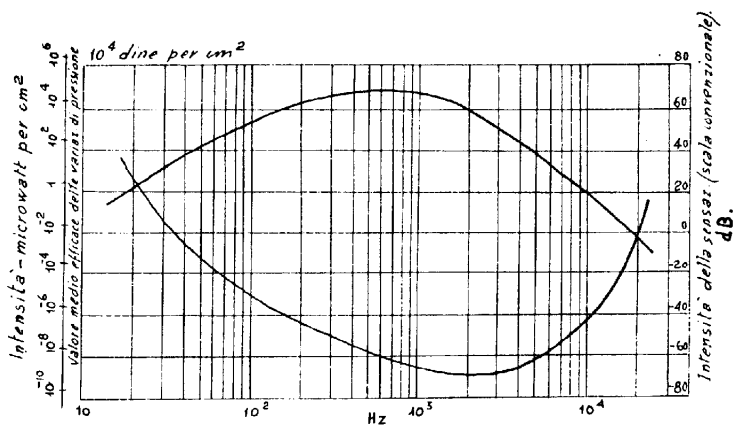


fig. 2.3 Soglia di udibilità e soglia del dolore.

Il grafico è molto interessante. Notiamo subito che suoni di bassissima frequenza (fino a 50 Hz) per essere uditi hanno bisogno di una potenza enorme. I nostri orecchi, sensibilissimi a suoni di frequenze intorno a qualche migliaio di Hz sono invece quasi sordi, a confronto, ai suoni che si trovano molto sotto o molto sopra a questo intervallo. Così, per esempio, per rendere udibile la nota *do* di 16 Hz (che non esiste nel pianoforte) occorre una quantità di energia  $10^{12}$  volte maggiore di quella occorrente per trasformare in suono una nota che sia sette ottave più alta<sup>3</sup>.

La stessa cosa vale per frequenze molto alte dove la curva, dopo i 10.000 Hz, sale rapidamente mentre quella del dolore scende, infatti, come abbiamo già detto questi suoni sono alquanto sgradevoli perché assomigliano a fischi. Nella parte centrale dell'area di udibilità, che è quella che più resiste all'età ed alle malattie, si trova l'area della parola, la cui collocazione dimostra la coerenza dell'adattamento naturale nel salvaguardare al massimo la più preziosa via di comunicazione fra gli uomini.

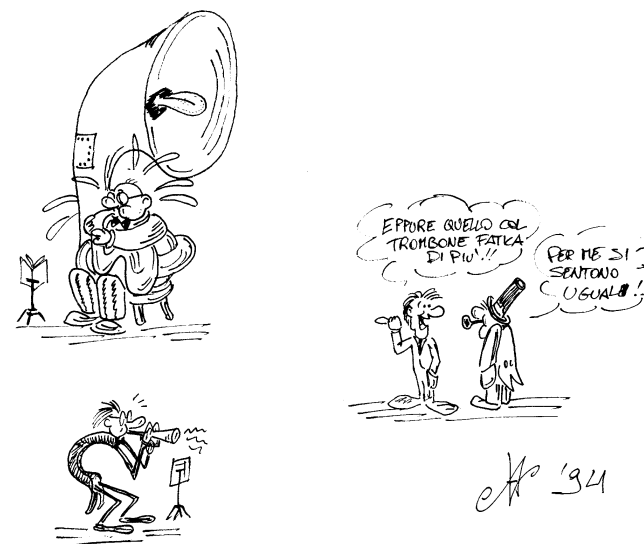


fig. 2.4 Il trombone (tuba) è faticoso da suonare ma non si sente più forte.

<sup>3</sup>La struttura di una normale canna d'organo ci dà conferma di questo fatto. Per esempio la canna del *do* di frequenza 16 Hz è enorme in quanto è alta ben 9,6 metri. È dotata di un'apertura, al piede, che assorbe una considerevole quantità d'aria eppure produce un suono che certamente non è più intenso di quello emesso da una piccola canna, lunga 7,5 centimetri, degli acuti. Basta il fiato di un bambino per far suonare quest'ultima, mentre tutta la forza di cui dispongono i polmoni di un uomo, non riuscirà a strappare un suono percepibile alla canna del *do* di 16 Hz. La non uniforme sensibilità dell'orecchio umano alle varie frequenze spiega molti altri fatti interessanti dell'acustica musicale. Per esempio il fatto che le melodie di solito sono realizzate con suoni acuti ed ai suoni gravi è riservato spesso il secondario ruolo di "accompagnarle": oppure la disposizione dei tasti di un pianoforte: con la sinistra che è meno abile si suonano le note gravi e con la destra quelle acute. Infine il famoso *loudness* (frastuono) che è quell'abusato pulsante disponibile ormai anche sul più modesto amplificatore non fa altro che esaltare le basse frequenze per venire incontro alle deficienze dell'orecchio.