

## MODULO 6

# SUONO

### OBIETTIVO:

Studiare e conoscere il fenomeno sonoro e le leggi dell'acustica.

### TARGET:

Scuola primaria

### TEORIA:

Tutte le volte che un corpo elastico viene perturbato dalla sua condizione di riposo, si mette a vibrare ed emette un suono. Il suono può propagarsi sia all'interno del corpo elastico, che nell'aria o in un qualsiasi altro fluido che eventualmente lo circonda, tuttavia non riesce a propagarsi nel vuoto. Per far propagare l'oscillazione sonora, occorre necessariamente un mezzo materiale di propagazione. Poiché la materia, può trovarsi in 3 stati di aggregazione, esistono quindi tre possibili vie di propagazione di un suono:

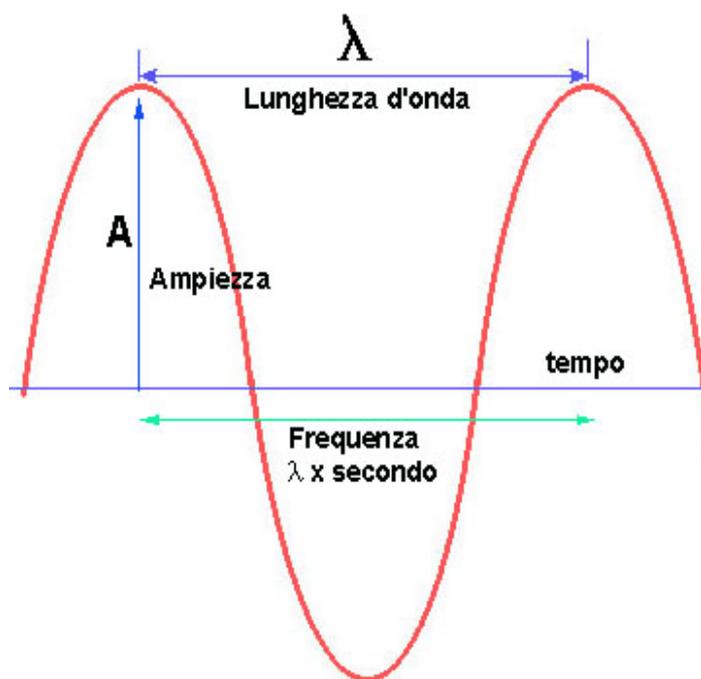
- Propagazione nei solidi
- Propagazione nei liquidi
- Propagazione negli aeriformi

Ciò che comunemente chiamiamo suono quindi, non è altro che una oscillazione avvertibile dai nostri organi di senso (le nostre orecchie), per questa ragione è anche chiamata "oscillazione acustica". In realtà però, non tutti i suoni sono rilevabili dai nostri sensi, esistono infatti, alcuni suoni non udibili dalle nostre orecchie: in tal senso, il concetto di suono assume un significato più ampio rispetto alla gamma delle frequenze acustiche direttamente percepibili.

Il suono è contraddistinto da tre elementi qualitativi.

- L'ampiezza
- La frequenza ( o anche la lunghezza d'onda)
- Il timbro

L'**ampiezza** del suono indica la quantità di energia sonora che viene prodotta oppure avvertita. In poche parole è la misura che ci permette di definire se ci troviamo di fronte a suoni forti oppure a suoni deboli.



La **frequenza** riguarda invece un aspetto qualitativo del suono che indica il numero di volte in cui l'oscillazione si ripete nel tempo. Parlare di frequenza è equivalente a parlare di lunghezza d'onda. Ambedue indicano la stessa caratteristica di un'onda sonora e ambedue dipendono dalla velocità di propagazione del suono. Sono due qualità interdipendenti. Facciamo un esempio: supponiamo di voler misurare la frequenza di scorrimento delle onde sonore prodotte in un laghetto quando vi buttiamo un sassolino al centro.

Fig. 1.6 - Oscillazione sonora semplice -

Se sulla riva, tramite un cronometro oppure un orologio, misuriamo per ogni secondo quante onde sono giunte sul bordo del lago stiamo misurando, senza saperlo, la frequenza delle onde costituite dalle increspature dell'acqua. Se invece, muniti di un righello, andiamo a misurare la distanza fisica che esiste fra due di tali increspature progressive, allora misuriamo la lunghezza d'onda. Queste due grandezze sono ovviamente legate fra loro, nel senso che, se la frequenza aumenta, la lunghezza d'onda diminuisce, mentre viceversa se la frequenza diminuisce, la lunghezza d'onda aumenta. Queste grandezze dipendono direttamente dalla velocità del fenomeno propagativo e poiché la velocità del suono varia in base al tipo di materiale che essa attraversa, è fondamentale conoscere anche questo parametro se vogliamo predire una delle due grandezze.

Esprimendoci in ambito musicale, diremo che in questo caso la frequenza di un suono è anche chiamata "**Altezza**". Questo termine non deve essere confuso con l'ampiezza del fenomeno oscillatorio di cui abbiamo parlato poc'anzi. L'altezza di un suono, infatti, come già detto, non è altro che un modo alternativo utilizzato per indicare la frequenza più o meno elevata che possiede il suono stesso. In tal senso un suono, si dice basso, se la sua frequenza è piuttosto piccola di valore. Il trombone, il tamburo, provocano suoni bassi, invece il violino, la viola ecc. producono suoni alti.

Il **timbro** è invece un aspetto dell'onda sonora che riguarda la sua composizione spettrale. Per composizione spettrale, si intende un certo numero di oscillazioni a frequenza diversa, che compongono l'onda sonora. In pratica, ogni suono in natura può essere visto come la sovrapposizione di un certo numero di suoni elementari (puri) che ne caratterizzano le qualità acustiche. In poche parole il timbro, è proprio la misura di queste componenti del suono: esso ci permette quindi di riconoscere le differenze fra le voci di due diverse persone che profferiscono la stessa parola. Le nostre corde vocali

possono sforzarsi nel migliore dei modi per raggiungere un certo grado di somiglianza con un determinato suono ma, irrimediabilmente esse vengono tradite dal fatto che producono componenti acustiche quasi totalmente diverse da quelle che appartengono alla voce che si vuole imitare. Tali sostanziali differenziazioni fra le voci sono dovute alle diversità morfologiche delle corde vocali e a determinate abitudini gutturali, le quali, nel contempo, ci permettono di avere una certa unicità nel tono della voce. Gli imitatori sono persone che hanno una dote naturale nel modificare le strutture dinamiche delle loro corde vocali per riprodurre suoni, molto simili come timbro, a quelli prodotti dai personaggi che appunto imitano.

## Cosa è il suono ?

Abbiamo già detto che il suono è un'oscillazione che si propaga come un'onda, e giunge fino a noi dalla sorgente che l'ha emessa. Ma cosa è in realtà il suono ? Perché riesce a giungere fino alle nostre orecchie ? Per rispondere a questa domanda dobbiamo riprendere l'esempio, delle onde che vediamo formarsi in uno stagno o in un laghetto, quando facciamo cadere sulla sua superficie una piccola pietra. Appena la pietra tocca la superficie, si generano delle onde circolari che si allargano una dopo l'altra fino a giungere verso la riva del laghetto o il bordo dello stagno. Sulla superficie dell'acqua, il fenomeno ondulatorio è ben visibile, ma bisogna tener presente che le stesse onde (o quasi) si producono anche sotto la superficie dell'acqua. Anche nell'aria vengono generate le stesse onde, solo che nell'aria è molto difficile riuscire a vederle.

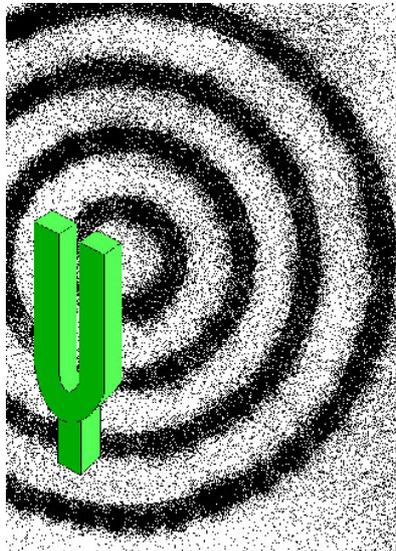


Fig. 2.6 - Le onde sonore consistono in una distribuzione di stati rarefatti e stati più densi di aria -

Se potessimo vedere le onde sonore che partono dalla nostra bocca, quando parliamo, oppure dai rebbi di un diapason quando lo facciamo oscillare (vedi il modulo "Oscillatori e oscillazioni"), potremo constatare che queste oscillazioni producono una variazione spaziale continua della densità dell'aria con andamento sinusoidale. In parole semplici, cominciando dalla prossimità dei rebbi del diapason, avremo zone d'aria molto compressa (a densità maggiore) e zone d'aria successive meno compresse (a densità minore). A tal

proposito potete riferirvi alla figura n. 2.6. Nell'acqua, quando queste onde si propagano in profondità, accade la stessa cosa. In questo caso però, le oscillazioni di densità, riguarderanno le molecole di liquido. Nei solidi avviene un fenomeno molto simile. Tutti i materiali solidi hanno una struttura molecolare dotata di proprietà elastiche. La struttura molecolare del solido si comporta quindi come la superficie dello stagno. Essa si contrae e si distende propagando quindi il fenomeno sempre attraverso un regime oscillatorio tendenzialmente sinusoidale. Ecco, in sintesi, in cosa consiste l'oscillazione sonora: un susseguirsi di compressioni e decompressioni del mezzo nel quale si propagano.

## Velocità del suono

Il suono si propaga con differente velocità a seconda del tipo di materiale che attraversa. Nell'aria a pressione atmosferica e ad una temperatura di 20 °C, esso viaggia a 340 metri al secondo. Di questo fatto abbiamo un esempio molto concreto le volte che ci capita di assistere ad un temporale congiuntamente ad episodi atmosferici costituiti da lampi e fulmini. Infatti, poiché la luce viaggia ad una velocità elevata rispetto al suono (300.000 chilometri al secondo). Il lampo viene avvertito quasi istantaneamente, mentre il suono, prodotto dal tuono, potrà essere ascoltato un po' più tardi a causa della sua più bassa velocità di propagazione.

L'insegnante, per far comprendere meglio questo concetto, può a questo punto della lezione ricorrere a un esempio. Supponiamo che un fulmine cada sopra il campanile di una chiesa di un paese vicino. Nel rendere più viva l'analogia vi consiglio ovviamente di affidarvi ad un riferimento reale utilizzando come esempio, una probabile chiesa eventualmente conosciuta dalla maggior parte degli allievi e presente da qualche parte nel territorio. Ovviamente è opportuno, nei confronti di questa costruzione, che conosciate esattamente la distanza dalla scuola.

Quando il fulmine colpisce il campanile e illumina il cielo col suo bagliore, contemporaneamente esso emette anche un forte boato. Conoscendo la velocità del suono, che come abbiamo detto è pari a 340 metri al secondo, e dividendo la distanza dalla chiesa per tale valore, potete stabilire i secondi necessari al suono del tuono per rendersi udibile dagli scolari. Meglio ancora se insegnate ai vostri allievi il sistema per ricavare la distanza dal punto di caduta di un fulmine conoscendo la velocità del suono. In tal caso spiegherete che, non appena vedranno il bagliore di un lampo, per sapere a che distanza è caduto o si è verificato il fenomeno, bisogna contare i secondi trascorsi dal momento in cui il fulmine viene visto fino a quando il rombo del tuono viene ascoltato. A questo punto è facile determinare la distanza del punto di caduta moltiplicando il numero 340 per il numero di secondi trascorsi. Il risultato numerico dell'operazione, rappresenterà il numero di metri che separano il punto di caduta del fulmine dall'osservatore.

Come dato aggiuntivo vi ricordo che il suono viaggia nell'acqua ad una velocità superiore a quella assunta nell'aria. Tale velocità in acqua è approssimativamente 1470 metri al secondo. Nei solidi questa velocità è sensibilmente più elevata e, a tal proposito, vi rimando alle tabelle contenute nell'appendice di modulo per avere informazioni più dettagliate.

## Infrasuoni e ultrasuoni

I suoni possono avere frequenze molto diverse che vanno da frazioni di hertz (meno di un'oscillazione al secondo) fino a suoni con frequenze di diversi megahertz (milioni di oscillazioni al secondo). Data la vastità di tale gamma, non tutti i suoni possono essere ascoltati. La nostra percezione sonora è limitata all'intervallo fra 16 Hz fino a circa 20.000 Hz. Suoni con frequenza inferiore a 16 Hz non producono sensazioni uditive e sono normalmente chiamati **infrasuoni**. Anche i suoni con frequenza superiore a 20.000 Hz non riescono ad essere uditi da noi umani, questi sono chiamati **ultrasuoni**. Ovviamente la gamma di frequenze percepibili dall'uomo può variare, entro certi limiti, da persona a persona in relazione alla morfologia dell'orecchio ed è sensibilmente variabile in base all'età. Oltre i 70 anni alcune persone, hanno una percezione uditiva che non supera i 7.000/10.000 Hz. Questo fatto dipende dall'aumento delle dimensioni della catena degli ossicini che costituiscono la catena di trasmissione dei suoni, dal timpano fino alla chiocciola. Molti animali percepiscono i suoni con una gamma di frequenze molto più estesa di quella umana. La figura n. 3.6 mette a confronto la gamma di sensibilità dei suoni percepiti dall'uomo, rispetto ad alcuni animali.

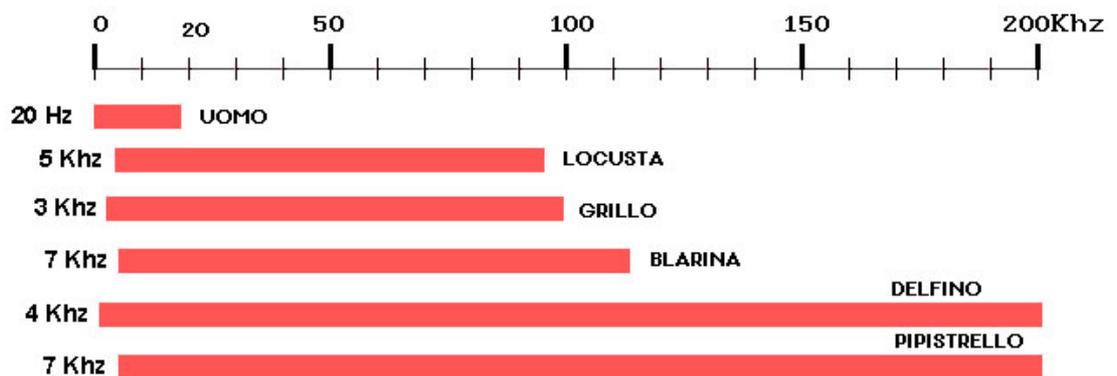


Fig. 3.6 - Campo spettrale di sensibilità uditiva di alcune specie -

Nell'ottica di offrirvi idee e suggerimenti per migliorare la vostra comunicazione in aula durante una lezione sul suono, o qualsivoglia lezione di acustica, vi dico che, se avete la possibilità di miscelare durante l'esposizione di teoria, anche validi concetti di scienze naturali concernenti il problema della percezione degli animali, otterrete una didattica più efficace. Oltre all'interesse che queste informazioni suscitano nella mente di chi le ascolta, avete la possibilità di far riposare il cervello dei discenti poiché spostate per un attimo la loro attenzione. Ovviamente, questo spostamento di attenzione è produttivo poiché genera associazioni costruttive che allargando la memoria concettuale. È naturale che questo è possibile unicamente, se già avete un consolidato back-ground di conoscenze sugli argomenti. Mi sembra superfluo rammentare inoltre, ad un buon docente, che è consigliabile non trattarsi oltre il tempo strettamente necessario su questi argomenti collaterali. Ritengo che questo sia anche il caso per una richiesta di maggior competenza e una più ampia e multidisciplinare trattazione da parte di tutti i docenti che operano nella scuola.

**NOTE:**

Nell'allegato al modulo "Materia (concetti base)", a seguito della nostra discussione sui vari stati fisici della materia, abbiamo anche parlato dello stato di plasma. È corretto quindi affermare che il suono, o più in generale le onde acustiche, possono propagarsi anche attraverso di esso. Le conoscenze che abbiamo su questa modalità di propagazione sonora nei plasmi è piuttosto limitata. Tuttavia attualmente sono state compiute numerose misurazioni dalla sonda **SOHO**, che effettua dal lontano 1995, (periodo in cui è stata lanciata nello spazio), costanti rilevazioni delle emissioni solari. Da alcuni di questi dati emergono significativi esempi su come le onde acustiche possono propagarsi anche nella massa di gas incandescenti che formano il nostro Sole. Anche sulla superficie del Sole si producono quindi delle onde sonore che per evidenti motivi non possono essere ascoltate fin qui sulla terra.

## LABORATORI

### 1° Laboratorio Suoni e rumori

**TARGET:**

Scuola elementare

**Materiale occorrente:**

Nessuno

Per la scuola elementare, consiglio di organizzare una lezione completamente basata su di una specie di compito in classe che propone agli allievi di rispondere soggettivamente ad alcune semplici domande. Provate per esempio a verificare il loro parere in base a quello che ritengono sia un rumore oppure un suono gradevole. L'idea potrebbe essere quella di realizzare una scheda in cui appaiono trascritti alcuni eventi sonori comuni e a fianco dei quali gli allievi devono trascrivere le loro sensazioni. Un esempio può essere la scheda mostrata qui di seguito.

<b>EVENTO ACUSTICO</b>	<b>Suono</b>	<b>Rumore</b>
Disco-musicale		
Canto di uccellini		
Gesso sulla lavagna		
Sirena della polizia		
Trillo del telefono		
Pecore al pascolo		
Pianoforte che suona		
Cascata		
Abbaiare di un cane		

Soffiare all'interno di una bottiglia vuota		
Acqua che scende da un rubinetto		
Motore di un'auto di formula uno		
Motore di un camion		
Traffico cittadino		
Rubinetto che perde		
Musica lirica		
Complesso Rock		
Ticchettio di una tastiera di computer		
Carillon		

Successivamente, sulla base dei risultati acquisiti, potrete realizzare una specie di discussione all'interno della quale tutti gli allievi dovranno spiegare le ragioni relative ai giudizi che hanno attribuito a quei particolari suoni.

Questo esempio, che più che un laboratorio si propone di effettuare una pura e semplice esercitazione in aula, può essere un modo per iniziare una interessante discussione sul suono. Lo considererei alla stregua di quello già precedentemente definito **elemento di attenzione**, che potremo proporre per questo contesto. Ovviamente tutto questo è rivolto ad allievi appartenenti alle primissime classi di una scuola primaria.

## 2° Laboratorio

### Focalizzazione del suono

#### TARGET:

Scuola elementare e Scuola media

#### Materiale occorrente:

##### Prova n.1

Un orologio meccanico (sveglia), due ombrelli.

##### Prova n.2

un palloncino gonfiabile, un generatore sonoro, un dispositivo che possa generare anidride carbonica.

Questo esperimento mostra alla vostra scolaresca un fenomeno caratteristico della propagazione ondulatoria che si ritrova, come principio base valido, anche per le onde luminose. I suoni, in maniera grossomodo analoga alla luce, possono subire riflessione e rifrazione. La riflessione dei suoni è una nota proprietà che può essere sperimentata nelle passeggiate estive in montagna oppure quando ci troviamo in ambienti molto ampi in cui è possibile saggiare il fenomeno dell'eco. Visto che il suono impiega circa 1 secondo a percorrere in aria uno spazio di 340 metri, è facile ottenere la percezione di un

eco allorquando produciamo suoni verso un ostacolo, come una parete, posto a debita distanza. Le dimensioni che deve possedere la palestra, oppure il corridoio della scuola o anche la zona di montagna in cui si vuole sperimentare in modo netto tale fenomeno deve essere almeno di 17 metri, valore che, in ogni caso deve essere considerato come distanza di riferimento. Si parla proprio di 17 metri per il fatto che, essendo la velocità del suono pari a 340 metri al secondo, un ostacolo posto a 17 metri permette la riflessione e quindi il ritorno di un suono, dopo che questi è stato costretto a percorrere altri 17 metri per ritornare alle nostre orecchie. In tali condizioni, poiché  $17+17=34$  metri, è un percorso che il suono copre in un decimo di secondo, abbiamo un intervallo di tempo appena sufficiente per avvertire l'effetto dell'eco. Ecco perché si parla di 17 metri come riferimento minimo. È ovvio che se l'ostacolo si trova ad una distanza maggiore è ancora meglio ai fini della nostra spiegazione. Non sempre però è possibile che un insegnante abbia a portata di mano un ambiente per mostrare questo fenomeno, allora vi suggerisco questa esperienza molto semplice che potete realizzare con un'attrezzatura messa a disposizione addirittura dai vostri stessi allievi. Bastano due ombrelli presi in prestito proprio dai vostri ragazzi e un orologio meccanico, del tipo a corda, perfettamente funzionante, che potreste aver preso in prestito dal comodino del nonno (riuscirete ancora a trovarlo un orologio del genere....ma?!).

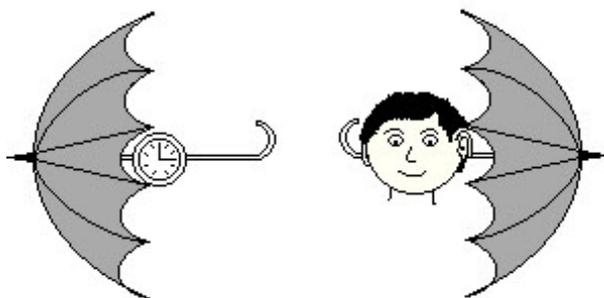


Fig. 4.6 - Convogliatore sonoro fatto con due ombrelli -

Gli ombrelli devono essere bagnati, affinché le loro superfici possano riflettere meglio i suoni. Inoltre, fare attenzione nella scelta degli ombrelli e adoperare quelli con involuppo parabolico e non altre forme presenti in commercio. A questo punto dovete legare con del nastro isolante l'orologio sopra un punto del manico di uno dei due ombrelli in modo che sia esattamente nel fuoco della parabola (mi raccomando di non farlo cadere se no ... poi senti il nonno). Nel fuoco dell'altro ombrello invece, posto a qualche metro di distanza, in modo simile a come riporta la figura n. 4.6, dovete collocare un vostro allievo. Assicuratevi che sia un tipo esile dal capo piccolo, in modo da non coprire eccessivamente lo spazio e permettere ai suoni di giungere facilmente nell'altro punto. L'allievo che si sottoporrà alla prova dovrebbe sentire facilmente il ticchettio dell'orologio anche a diversi metri di distanza grazie alla riflessione del suono amplificata dalla particolare geometria parabolica degli ombrelli.

Abbiamo detto che anche il suono, essendo un fenomeno di propagazione ondulatoria, riproduca alcuni comportamenti fisici della luce. Come appena dimostrato, anch'esso viene riflesso da un ostacolo così come la luce risulta riflessa da uno specchio; e anch'esso subisce la rifrazione, l'interferenza e tanti altri fenomeni che sono legati alla fisica della propagazione ondulatoria. Abbiamo visto nell'esperimento precedente come sia possibile focalizzare il

suono tramite due ombrelli bagnati. Voglio ora proporre un semplice esperimento, che mostra come un suono può essere focalizzato allo stesso modo di un fascio di luce con una lente di ingrandimento. Quale potrebbe essere la lente di ingrandimento per le onde sonore? Presto detto. Prendiamo un palloncino e gonfiamolo utilizzando dell'anidride carbonica. In effetti, se proviamo a gonfiarlo normalmente a fiato, una certa percentuale di anidride carbonica la forniamo noi stessi, grazie alla nostra naturale respirazione. Posso assicurarvi che l'esperimento funziona abbastanza bene anche con un palloncino gonfiato normalmente. Se però riuscite a trovare la possibilità di gonfiarlo veramente e completamente con anidride carbonica, vi assicuro che l'effetto è molto suggestivo. Questo palloncino rappresenta la nostra lente di ingrandimento sonora. Tramite esso infatti, possiamo focalizzare i suoni che provengono da una sorgente.

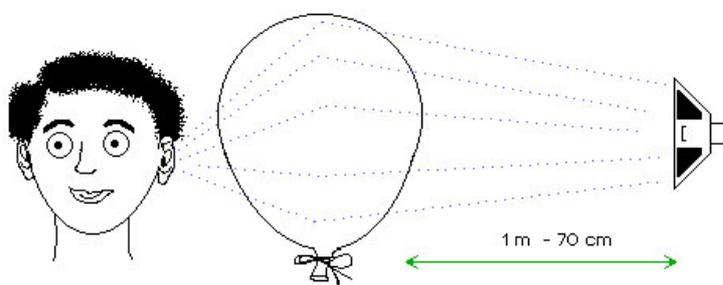


Fig. 5.6 - Lente convergente sonora fatta con un palloncino -

Nell'anidride carbonica il suono si propaga ad una velocità più bassa che nell'aria. La velocità è infatti pari a **258 m/s** mentre nell'aria è di circa **340 m/s**. Quindi così come accade con la luce, vedi a tale proposito il modulo "Luce e colori", il suono subisce il fenomeno della rifrazione. La forma sferica del palloncino consente quindi alle onde sonore che costituiscono il suono, una certa convergenza verso un punto focale. È importante che il suono abbia una frequenza piuttosto alta (10.000 Hz) e che la distanza fra il palloncino e il generatore sonoro sia di circa 1 metro. Per effettuare questa prova ed ottenere realmente una qualche soddisfazione, dovete procurarvi un generatore di segnali a nota fissa (accordatori per chitarre per esempio) non dovete adoperare la musica o altri suoni complessi. Inoltre, come abbiamo già detto, sarebbe opportuno che la frequenza sia la più alta possibile. A questo punto, vi consiglio di portate il palloncino a pochi centimetri dal vostro orecchio e mettendo una mano sopra l'altro in modo da concentrarvi meglio, avvicinatevi all'altoparlante del vostro generatore sonoro. Ben presto dovrete trovare una distanza opportuna sulla quale sentirete una variazione del suono che tenderà a diventare più forte. Quello è il punto fuoco. Potete anche provare a variare la frequenza del generatore ma vi consiglio di lavorare su frequenze di circa 10.000 Hz. Per generare la vostra anidride carbonica vi consiglio di dare una occhiata al laboratorio n. 3 del modulo "Materia (concetti base)". In cui è proposta una esperienza chimica in grado di produrre anidride carbonica.

Nel concludere, voglio ricordarvi che oggi esistono microscopi acustici che permettono di ottenere immagini molto interessanti su materiali inerti e su strutture organiche come le strutture cellulari. Questi microscopi utilizzando vere e proprie lenti acustiche, permettono di vedere le strutture microscopiche

sotto una luce nuova (non è una battuta). I materiali infatti, reagiscono al suono in base alla loro densità, quindi questi strumenti permettono punti di vista completamente diversi da quelli osservabili con il microscopio ottico. Il microscopio acustico, oltre a possedere una sorgente di ultrasuoni a frequenza molto elevata ed una serie di sistemi di convergenza sonora, è dotato anche di un trasduttore che converte le onde sonore che provengono dal campione sotto esame in immagini. Queste immagini sono rese visibili tramite uno schermo connesso ad un computer. I materiali più densi che compongono il campione sono quindi resi visibili da un contrasto maggiore.

### 3° Laboratorio

#### Onde e frequenza

#### TARGET:

Scuola elementare e Scuola media

#### Materiale occorrente:

Scatola di plastica piena d'acqua e bicchiere

Questo laboratorio illustra un'esperienza molto semplice che può essere realizzata in qualsiasi momento: basta avere una bacinella piena d'acqua e un bicchiere. Per procedere nella dimostrazione bisogna innanzitutto regolare il livello dell'acqua della bacinella in modo che il bicchiere, posto capovolto sulla superficie, possa contenere una certa quantità d'acqua. In queste condizioni il bicchiere può essere considerato una cavità risonante acustica equivalente a una sorta di tubo sonoro. In effetti, sarà il livello dell'acqua contenuto nel bicchiere che farà risuonare il bicchiere ad una determinata frequenza. Per vedere questa frequenza basta colpire il bicchiere con un martelletto in gomma oppure di sughero. Appena il bicchiere verrà colpito si vedranno delle onde sulla superficie dell'acqua partire dal bicchiere e propagarsi concentricamente fino ai bordi della bacinella in modo simile a quello che succede quando buttiamo un sassolino sulla superficie dell'acqua di uno stagno.

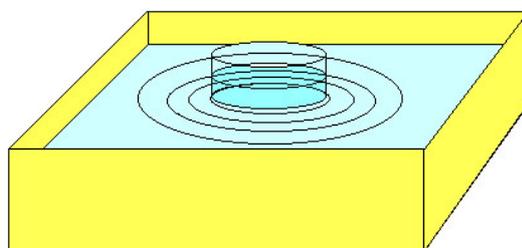


Fig. 6.6 - Risonanza di una cavità -

Se riusciamo a modificare la quantità d'acqua all'interno del bicchiere, modifichiamo anche la frequenza di risonanza acustica di quest'ultimo e quello che potremo vedere è un diverso numero di onde che si producono attorno al bicchiere. Più il bicchiere è vuoto più diradate saranno le onde (bassa

frequenza). Più il bicchiere è pieno, più serrate saranno le onde nella bacinella (alta frequenza).

## **4° Laboratorio**

### **Realizziamo una scala musicale**

#### **TARGET:**

Scuola elementare e Scuola media

#### **Materiale occorrente:**

Punta di diamante (per tagliare il vetro), lastra di vetro 15 X 24 cm di 2 mm di spessore, una scatola per le scarpe o una cassetta di legno dalle dimensioni analoghe, collante siliconico, spago.

Questo laboratorio vi mostra come, con una spesa insignificante, potrete realizzare un'interessante esperienza che comprende la costruzione di uno strumento musicale a percussione. Sappiamo dall'esperienza quotidiana che percuotendo un listello di materiale rigido incastrato agli estremi, questo oscilla acusticamente con una frequenza che dipende dalla sua lunghezza. Per realizzare lo strumento sfrutteremo proprio tale principio, utilizzando come materiale dei listelli di vetro. Per proseguire bisogna quindi tagliare tali listelli di vetro per poi montarli in sequenza utilizzando una scatola di legno o di cartone. In questo modo, ogni listello, quando verrà percosso da un martelletto di legno oppure di sughero è in grado di produrre una nota sonora. Per essere più precisi nella realizzazione, conviene ricorrere all'aiuto di un vetraio amico, oppure cimentarsi da sé tramite l'uso di un attrezzo tagliavetro a diamante, mediante il quale, con pazienza e molta attenzione provvedere alla semplice lavorazione. Come materiale di partenza si può far uso, per esempio, di una lastra di vetro normale di 2 mm di spessore. Da questa lastra devono essere tagliati 8 listelli rettangolari di circa 3 cm di larghezza. Come già detto in precedenza, raccomando di stare attenti nel maneggiare i listelli di vetro che hanno i bordi molto taglienti, anzi, a tale scopo consiglio vivamente di far uso dei guanti opportuni. Ogni listello deve avere una lunghezza precisa, calcolata in base ad una semplice regola armonica. La scala numerica da considerare è la seguente:

**1 ; 9/8 ; 81/64 ; 4/3 ; 3/2 ; 27/16 ; 243/128 ; 2**

Che possiamo facilmente approssimare alla sequenza numerica

**1 ; 9/8 ; 5/4 ; 4/3 ; 3/2 ; 5/3 ; 15/8 ; 2**

Si tratta della scala armonica naturale della progressione delle frequenze che danno origine alle note musicali. Chi si intende di musica si sarà accorto che la sequenza di numeri costituisce un'ottava musicale. Per adattare la sequenza numerica alle note musicali che possono essere prodotte da listelli di materiale

solido, è necessario che la lunghezza dei listelli sia calcolata per ognuno di loro come la radice quadrata dell'inverso di questi rapporti.

**1; 0,94 ; 0,90 ; 0,87 ; 0,81 ; 0,78 ; 0,73 ; 0,71**

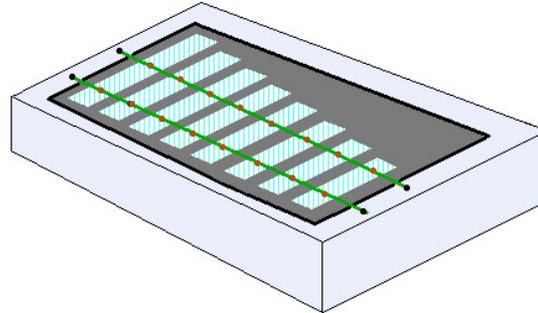


Fig. 7.6 - Scala sonora autocostruita –

Se il listello che abbiamo scelto come primo della serie è lungo 15 cm, il listello successivo deve essere lungo 15 X 0,94 cm; quello da mettere al terzo posto deve essere lungo 15 X 0,90 cm e così via, fino all'ultimo. A questo punto dobbiamo procurarci una scatola di cartone o di legno con un foro rettangolare delle dimensioni definite dall'area occupabile da tutti i listelli montati in sequenza come mostra la figura n. 7.6.

Per mantenere i listelli di vetro si può usare un collante siliconico, oppure un collante termoplastico facendo in modo di fissare i vari listelli a due cordoncini ben tesi e agganciati alle estremità della scatola. Questi due cordoncini possono essere fissati con dei fermacampioni, se si tratta di una scatola di cartone, oppure con dei chiodi se si tratta di una scatola di legno. Per completare in modo definitivo il lavoro, bisogna costruirsi un martelletto con percussore in sughero o legno. A questo punto, grazie al vostro orecchio musicale, potete divertire i vostri allievi tentando di riprodurre una melodia col vostro strumento artigianale. In ogni caso, esso diviene prezioso per effettuare tutte le osservazioni necessarie per capire come vengono prodotti i suoni e comprendere l'origine di una scala sonora. La tabella n. 1.6, mostra un esempio di scala sonora naturale con tre ottave. I numeri, relativi di ogni nota, sono espressi in hertz

LA	SI	DO#	RE	MI	FA#	SOL#	LA
220	248	275	293	330	397	412	440
440	495	550	587	660	733	825	880
880	990	1100	1173	1320	1467	1650	1760

Tab. 1.6

## 5° Laboratorio Misuriamo la velocità del suono

### TARGET:

Scuola media

### Materiale occorrente:

Due fischietti e un cronometro

Questa semplice esercitazione prevede necessariamente la possibilità di operare in ampi spazi. Si tratta di una tipica esperienza che può essere fatta solo in una gita oppure realizzata presso un centro sportivo. In ogni caso è sufficiente che due persone, munite entrambe di fischietto, si pongano a una distanza di almeno 400 o 500 metri. Una delle due deve avere a disposizione un cronometro. Sistemato il tutto, la persona con il cronometro deve produrre un fischio breve e forte e farà partire contemporaneamente il cronometro. L'altro allievo appena sente il suono, deve produrre immediatamente con il suo fischietto un identico segnale. Quando l'allievo con il cronometro lo sentirà, dovrà fermare il conteggio del tempo. Considerando che lo spazio percorso dal suono risulta essere esattamente il doppio della distanza a cui si trovano i due giovani. Il calcolo della velocità si potrà effettuare, dividendo lo spazio in metri per il tempo misurato in secondi.

Metodo alternativo: occorrono sempre due persone, questa volta però, una avrà il fischietto e l'altra il cronometro. La convenzione che si daranno sarà la seguente: quando la persona col fischietto emetterà il suono, agiterà contemporaneamente un braccio. L'altro, vedendo il braccio muoversi, farà partire il cronometro mentre, udendo il suono sopraggiungere, lo arresterà. Rapportando spazio e tempo si ottiene la velocità senza l'inconveniente aggiuntivo dovuto ai tempi di reazione degli sperimentatori.

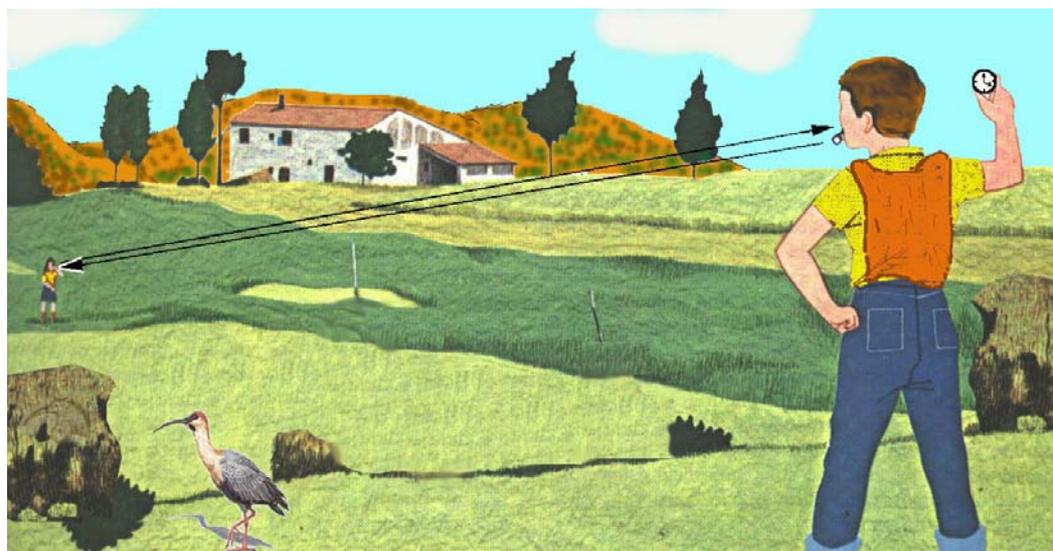


Fig. 8.6 - Misura della velocità del suono con un cronometro ed un fischietto -

## 6° Laboratorio

### Analisi di un suono

#### TARGET:

Scuola secondaria ed eventualmente anche scuola media

#### Materiale occorrente:

Un computer provvisto di scheda audio minimo 16 bit, microfono, programma Wavelab 4.0 della Steinberg oppure Spectralab o anche altri programmi in grado di offrire analisi spettrale in Real Time.

Si tratta di un esperimento molto importante ai fini propedeutici per poter capire molte cose a riguardo del suono e delle oscillazioni in genere. Ogni suono è caratterizzato da un timbro, come abbiamo detto nelle poche note di teoria di questo modulo. Maggiori approfondimenti a riguardo di questo concetto sono contenuti nell'allegato di questo modulo. Per ora, in queste poche righe, diciamo solo che essendo i suoni puri molto rari, una misura del grado di componenti pure di un suono può essere data dal timbro. Un suono si dice puro, se risulta contraddistinto da una sola oscillazione semplice di tipo sinusoidale. Vedi l'illustrazione riportata nella teoria di questo modulo n.1.6, e la figura n. 9.6 . La maggior parte dei suoni sono invece caratterizzati da più oscillazioni di tipo sinusoidali tutte sovrapposte nel tempo. Questo fatto è facilmente osservabile se abbiamo la possibilità di disporre di un oscillografo in modo da analizzare il suono prodotto dalla nostra voce o da quella prodotta da alcuni strumenti musicali. Analizzare le componenti sinusoidali che sono presenti in un suono, significa effettuare un'analisi di tipo spettrale, anche chiamata di tipo armonica. Con questo termine, gli studiosi del suono, analizzano la composizione di un segnale in funzione delle sue componenti pure.

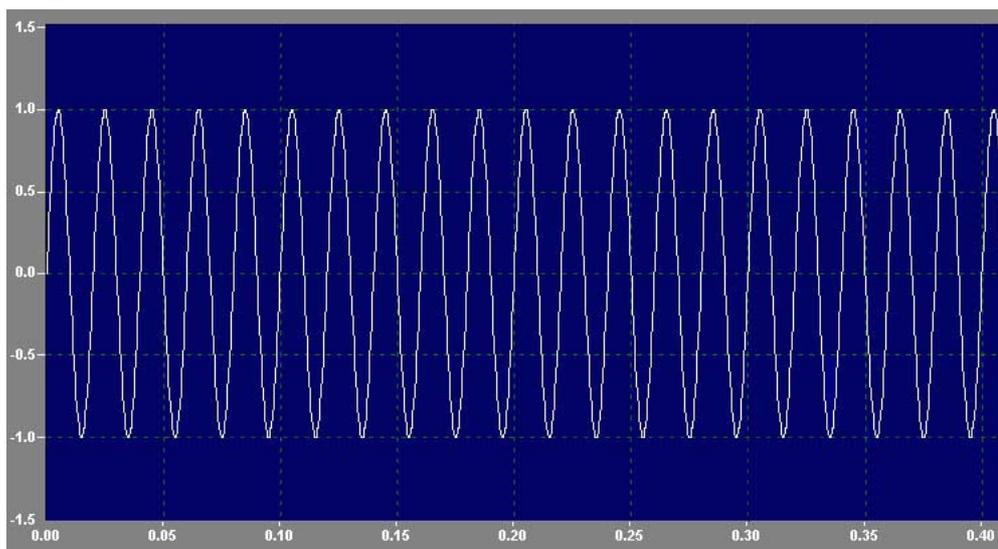


Fig. 9.6 - Segnale prodotto da un suono puro di tipo sinusoidale -

Le componenti pure, come abbiamo già detto, sono sempre di tipo sinusoidale. La figura n. 9.6 mostra proprio l'andamento di un suono puro di tipo sinusoidale.

Per fare questo esperimento, che può essere indifferentemente proposto a qualsiasi tipo di allievo (l'importante è assumere un linguaggio diverso a seconda dei casi), bisogna servirsi di un computer provvisto di adeguato programma. Chi lo ritiene necessario può farsi aiutare da un esperto che gli fornisca il sistema perfettamente funzionante. Tuttavia, visto che l'apparato

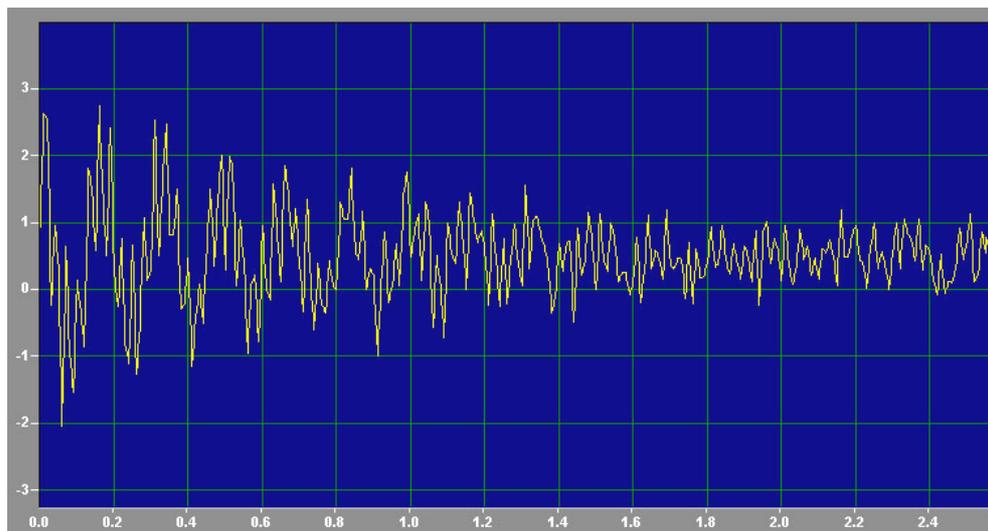


Fig. 10.6 - Segnale prodotto da un suono complesso -

sperimentale richiesto, non è assolutamente niente di costoso o troppo complesso e visto che non si utilizza altro che un computer normalissimo, qualsiasi insegnante che opera in un laboratorio di informatica può riuscire a realizzare l'esperienza. Come ho appena detto bisogna necessariamente disporre (se non già presente nel materiale di corredo del computer) di un semplice programma che, utilizzando la scheda audio del computer, riesce a farla funzionare come analizzatrice di spettro. Un banale microfono, di costo insignificante, completa la lista dei materiali indispensabili per fare queste semplici prove.

Per proseguire nella sperimentazione munitevi di alcuni strumenti che producono suoni. Per esempio un fischietto, una canna sonora di lunghezza misurabile, un diapason, una chitarra ecc. Fatto ciò, basta lanciare il programma per poter cominciare il nostro studio sul suono. Vedi fig. n. 11.1.6. Questi programmi, sono un ottimo strumento per visualizzare l'andamento dei segnali sonori, sia in funzione del tempo che in funzione della frequenza. Se attiviamo la funzione "**analisi spettrale**", il programma visualizzerà una finestra opportuna e comincerà ad esplorare la struttura del segnale nel dominio della frequenza. Grazie ad esso potrete mostrare come i suoni della vostra voce, sono estremamente complessi per quanto riguarda la loro rappresentazione (essendo costituiti da un numero elevatissimo di suoni puri). La figura n. 10.6 mostra, infatti, un generico segnale in funzione del tempo costituito da un numero molto elevato di suoni puri costituenti.

Dinanzi a tali diagrammi potrete meglio spiegare il significato della rappresentazione dei segnali sonori operata dal computer. Avendo l'attenzione di chiarire che i segnali possono essere visualizzati sia nel dominio del tempo

che nel dominio della frequenza. Nel dominio del tempo, possiamo visualizzare l'andamento dell'ampiezza del segnale sonoro, al variare del tempo. Nel

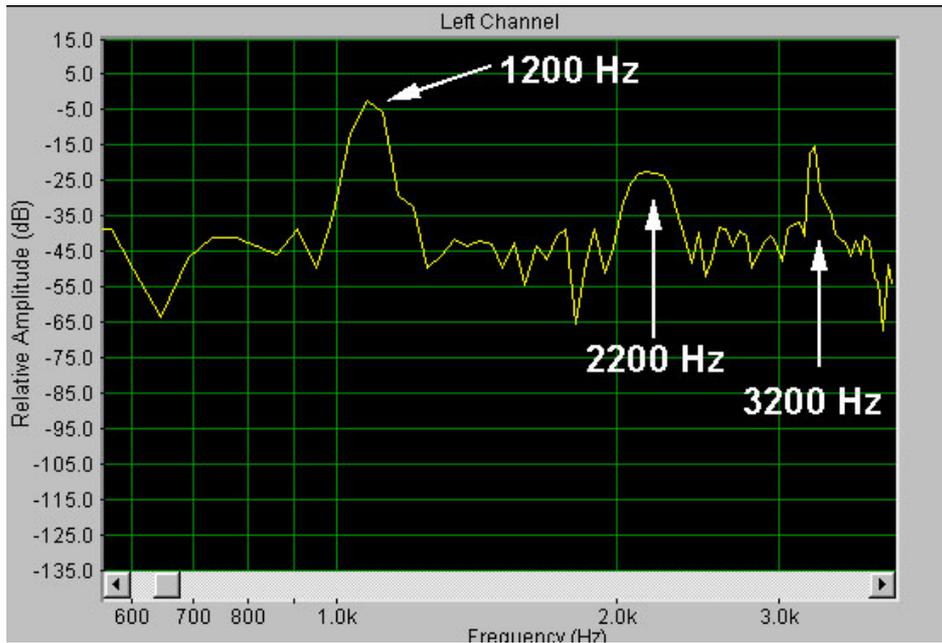


Fig. 11.6 - Armonici generati da un suono prodotto grazie all'uso di un fischiello -

dominio della frequenza invece, noi visualizziamo le ampiezze di tutte le componenti frequenziali (spettro) del segnale. La figura n. 11.6, mostra un caso di questo tipo. Il segnale raffigurato, mostra il mio modesto tentativo di fischiare attraverso un microfono. Nello spettro di frequenza si vedono le componenti spettrali con una frequenza di picco a 1200 Hz e gli armonici di ordine superiore prodotti dalla mia voce nell'intento di produrre un fischio regolare. Ovviamente queste componenti sono legate alla geometria del fischiello e sono influenzate dal tipo pressione sonora esercitata nello strumento.

Questa semplice osservazione strumentale contiene una potentissima componente didattica, soprattutto quando l'esperienza viene effettuata insieme ad altre tipiche esperienze che riguardano i suoni. Infatti, è possibile utilizzare il sistema computer corredato di microfono, per impiegarlo agevolmente al posto dell'ascoltatore umano nell'esperienza riportata al laboratorio n. 2, a proposito della focalizzazione dei suoni. In questo caso, aumenteremo di diversi ordini di grandezza la sensibilità dell'esperienza. Basta infatti, sostituire l'allievo posto nel fuoco di uno dei due ombrelli, con il microfono del nostro apparato strumentale. Oppure, potremo semplicemente divertirci a verificare la risonanza delle canne sonore. Il computer infatti, è in grado di darci graficamente una informazione di frequenza tramite la quale potremo mostrare ai nostri allievi l'accordo ad  $\frac{1}{4}$  d'onda delle canne sonore così come potremo anche verificare il suono prodotto da un diapason.



Fig. 11.1.6 - Verifica dello spettro dei suoni effettuati tramite computer -

In quest'ultimo caso, il computer ci fornirà un picco di risposta proprio a 440 Hz; oppure possiamo divertirci con gli ultrasuoni, che saranno rilevati dal microfono (a patto che non utilizziamo frequenze ultrasoniche troppo elevate) mentre gli stessi suoni risulteranno non avvertibili dalle nostre orecchie. Questa semplice esercitazione proprio per la sua peculiare possibilità di poter visualizzare i segnali nel dominio della frequenza (armonici), possiede una valenza didattica che vi consiglio di non trascurare.

## **7°Laboratorio** **Figure risonanti (cimatica)**

### **TARGET:**

Scuola primaria e secondaria

### **Materiale occorrente:**

Un amplificatore audio da 30-50 W, un oscillatore sinusoidale a frequenza variabile, polvere di lycopodio, superfici di plexiglas, un altoparlante da 50 W.

Prima di chiudere completamente questa interessante sessione di laboratori sulle esperienze relative al suono, voglio informarvi sulla possibilità di strabiliare il vostro gruppo di discenti con un'esperienza estremamente interessante che, tramite il suono, ci consente di disegnare figure geometriche molto originali. Tale dimostrazione in sé non ha niente di nuovo. Essa fu sperimentata con successo alla fine del 1700 dal noto ricercatore Ernest Chladini (1756-1829) il quale, con un archetto di violino, faceva vibrare un supporto quadrato di metallo o di altro materiale su cui aveva posto della sabbia oppure della polvere di lycopodio. Il piano quadrato era fissato su di una

base attraverso un perno centrale e le vibrazioni, prodotte dalla corda di violino, riuscivano a far entrare in risonanza il piattello e a farlo vibrare secondo precisi piani nodali che dipendevano fortemente dalle dimensioni geometriche del piattello e dal vincolo centrale. La polvere posta sulla superficie cominciava a vibrare, spargendosi secondo precise posizioni, che originavano alcune figure caratteristiche. La variante moderna di questa esperienza, che fra poco mi apprenderò a spiegarvi, mi ha permesso di sperimentare figure ancora più belle di quelle ottenute dal Chladini alcune delle quali così ben strutturate, da eguagliare la perfezione geometrica riscontrabile in quelle, figure universalmente note, battezzate “Cerchi nel grano” che si osservano da qualche tempo nei campi coltivati della Gran Bretagna.

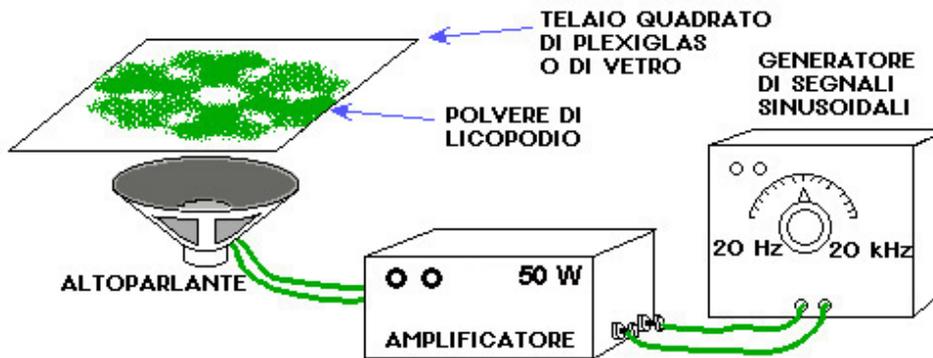


Fig. 11.2.6 - Schema dell'impianto per esperienze di cimatica -

Per realizzare questa esperienza è necessario disporre di polvere di licopodio a grana molto fine. Vi consiglio di esaminare il modulo sulle cariche elettrostatiche dove parlo ampiamente di questo prodotto. Per ridurre la dimensione fisica dei grani è possibile, per esempio, servirsi di un macinino oppure di un frullatore. Distribuite in modo uniforme la polvere di licopodio sopra una superficie quadrata di vetro oppure di plexiglas e poggiate questa sopra un altoparlante da 50 W. Collegate l'altoparlante ad un amplificatore audio e applicate all'ingresso di quest'ultimo un generatore di segnali sinusoidali. La figura n. 11.2.6 mostra come deve essere realizzato l'impianto. Eventualmente fatevi aiutare da un tecnico elettronico per realizzare il vostro circuito. Se tutto è stato preparato a dovere, non appena fornirete l'alimentazione elettrica ai vostri strumenti, udirete dall'altoparlante un suono la cui frequenza dipenderà dal modo in cui avete regolato il generatore di segnali. Quest'ultimo dovrà essere provvisto di una manopola regolatrice di frequenza, tramite la quale dovete poter raggiungere quasi tutte le frequenze udibili. I risultati più soddisfacenti, si ottengono se il vostro generatore è in grado di fornire frequenze che partono da pochissimi hertz fino a circa 10.000 hertz. Avendo a che fare con segnali così particolari, è necessario che il vostro amplificatore audio sia in grado di amplificare correttamente questo intervallo di frequenze. Gli strumenti adoperati per questa prova, sono stati progettati interamente dal sottoscritto, ritengo comunque possibile rifarsi ad apparecchi commerciali dotati con le medesime funzionalità o anche dotati di caratteristiche più contenute. L'importante è fornire una potenza audio molto forte al vostro altoparlante. A tal proposito vi consiglio di munirvi di cuffie di

protezione per schermare il vostro udito intanto che provvedete ad effettuare la ricerca della frequenza di risonanza. L'altoparlante che ho adoperato per questa prova è un sub-woofer da 8 ohm di impedenza 40+40W. I piattelli di plexiglas che ho adoperato, sono stati sia di forma quadrata, che di forma circolare.

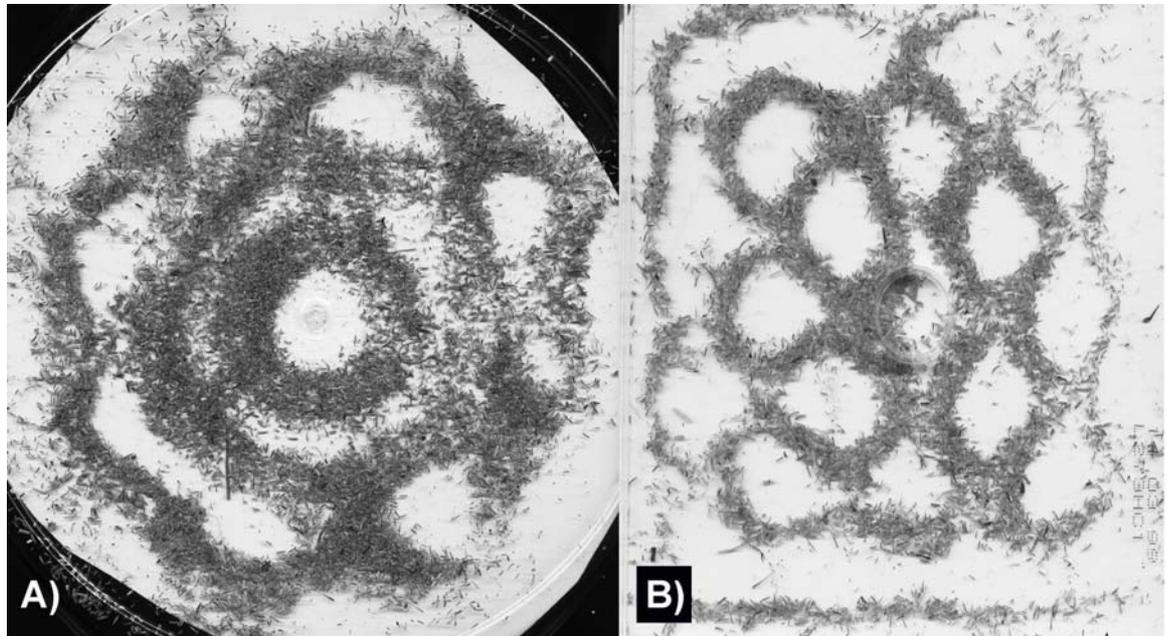


Fig. 11.3.6 - Figure originali dell'autore ottenute a varie frequenze (vedi testo) -

L'immagine rappresentata dal lato "A" della figura n. 11.3.6 è stata ottenuta con un piattello circolare di plexiglas da 25 cm di diametro normalmente utilizzato per contenere le torte gelato. La frequenza di risonanza è di 1250 Hz. L'immagine illustrata invece al lato "B", è stata ottenuta con un piattello di plexiglas quadrato con il lato di 17,5 cm con una frequenza di risonanza di 2500 Hz. In entrambi i casi la potenza sonora è stata circa 30 W e la polvere utilizzata è costituita da licopodio. L'effetto finale è estremamente emozionante, infatti, variando la manopola della frequenza del generatore di segnali, non appena l'apparato raggiunge la frequenza di risonanza opportuna è possibile vedere nascere spontaneamente come per magia la figura. Questa frequenza caratteristica dipende dalla dimensione geometrica del piattello ed è fortemente influenzata dal materiale di cui è composto. Volevo far notare come, l'immagine "B" della figura 11.3.6, raffigura la struttura geometrica del famoso grifo intitolato "**fiore della vita**", immagine di geometria sacra più volte ritratto in numerosi templi antichi e presente tra l'altro sul tempio di Osiride ad Abido (Egitto). La figura 11.4.6. mostra appunto, la struttura fondamentale del fiore della vita così come viene rappresentato negli antichi templi.

È curiosa la circostanza che questo semplice esperimento possa permettere ad un lettore attento, l'accostamento dei fatti sperimentali esaminati con le teosofie relative alle cosmogonie più antiche conosciute. Nel Cristianesimo possiamo leggere la frase: << In principio era il verbo ed il verbo era presso Dio e il verbo era Dio. Poi Dio parlò per mezzo della sua voce e creò i mondi >> La dottrina del Logos o Divino Creatore, che crea mediante la parola trova un sostegno scientifico nella capacità del suono, come entità fisica di produrre forme.

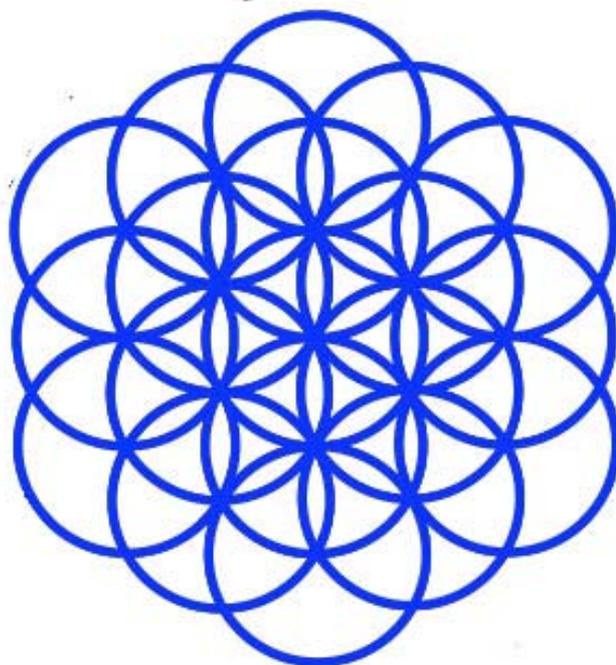


Fig. 11.4.6 - Rappresentazione geometrica denominata "Fiore della vita" -

**NOTE:**

Risulta molto interessante l'accostamento delle figure del Chladini con quelle ritratte nei cubi di pietra che pendono dal soffitto della cappella di Rosslyn realizzata in Scozia nel 1447 da William St. Clair e ispirate a riferimenti esoterici di provenienza Templare. Questi cubi di pietra riportano sulle loro facce dei disegni molto simili a quelli ottenuti dal Chladini con il suo esperimento sonoro. Molti studiosi ritengono che i disegni possano rappresentare un codice musicale che, se opportunamente decodificato potrebbe forse svelarci qualche mistero legato chissà, anche al Santo Graal. Tuttavia, senza addentrarci troppo nell'irreale, e con la complicità divertita del lettore vorrei suggerire che forse, alla fine di questo lavoro di analisi, (che sembra essere realmente in atto da parte di alcuni studiosi), se non altro, potremo intanto certamente gustarci una melodia antica molto suggestiva ed originale.

**APPENDICE :**

<b>Sorgente</b>	<b>dB</b>	<b>Descrizione</b>
	0	Soglia di udibilità
<b>Respirazione normale</b>	10	Appena udibile
<b>Stormire di foglie</b>	20	
<b>Bisbiglio sommesso (a 5m)</b>	30	Molto silenzioso
<b>Biblioteca</b>	40	
<b>Ufficio silenzioso</b>	50	Silenzioso
<b>Conversazione normale (ad 1 m)</b>	60	
<b>Traffico intenso</b>	70	
<b>Ufficio rumoroso; fabbrica media</b>	80	
<b>Autocarro a 10 m</b> <b>Cascate del Niagara</b>	90	L'esposizione costante mette in pericolo l'udito
<b>Metropolitana</b>	100	
<b>Cantiere</b>	110	
<b>Concerto rock</b> <b>Decollo aereo (a 60 m)</b>	120	Soglia del dolore
<b>Mitragliatrice perforatrice</b>	130	
<b>Decollo aereo (a 15 m)</b>	150	
<b>Grande motore a razzo</b>	180	

**Sorgenti sonore e livello di potenza in dB**

<b>Rapporto delle potenze sonore, adimensionale <math>W/W_0</math></b>	<b>Livelli della potenza sonora, dB <math>L_W = 10 \log W/W_0</math></b>
<b>1000</b>	30
<b>100</b>	20
<b>10</b>	10
<b>9</b>	9.5
<b>8</b>	9
<b>7</b>	8.5
<b>6</b>	7.8
<b>5</b>	7
<b>4</b>	6
<b>3</b>	4.8
<b>2</b>	3
<b>1</b>	0

<b>Rapporto delle potenze sonore, ( valore adimensionale) <math>W/W_0</math></b>	<b>Livelli della potenza sonora, dB <math>L_W = 10 \log W/W_0</math></b>
<b>0.9</b>	-0.5
<b>0.8</b>	-1
<b>0.7</b>	-1.5
<b>0.6</b>	-2.2
<b>0.5</b>	-3
<b>0.4</b>	-4
<b>0.3</b>	-5.2
<b>0.2</b>	-7
<b>0.1</b>	-10
<b>0.01</b>	-20
<b>0.001</b>	-30
<b><math>W_1 \times W_2</math></b>	$L_{W1} + L_{W2}$

<b>Potenza sonora irradiata, <math>W</math></b>		<b><math>L_W</math>, dB</b>
Notazione usuale	Notazione esponenziale	Relativo a $10^{-12}$ Watt (standard)
<b>100000</b>	$10^5$	170
<b>10000</b>	$10^4$	160
<b>1000</b>	$10^3$	150
<b>100</b>	$10^2$	140
<b>10</b>	$10^1$	130
<b>1</b>	1	120
<b>0.1</b>	$10^{-1}$	110
<b>0.01</b>	$10^{-2}$	100
<b>0.001</b>	$10^{-3}$	90
<b>0.0001</b>	$10^{-4}$	80
<b>0.00001</b>	$10^{-5}$	70
<b>0.000001</b>	$10^{-6}$	60
<b>0.0000001</b>	$10^{-7}$	50
<b>0.00000001</b>	$10^{-8}$	40
<b>0.000000001</b>	$10^{-9}$	30

<b>Nome</b>	<b>Definizione</b>	<b>Quantità di Riferimento (unità SI)</b>
<b>Livello della pressione sonora (gas)</b>	$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0)$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
<b>Livello pressione sonora (liquidi)</b>	$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0)$	$p_0 = 10^{-6} \text{ Pa}$
<b>Livello della potenza</b>	$L_W = 10 \log_{10}(W/W_0)$	$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$
<b>Livello dell'intensità</b>	$L_I = 10 \log_{10}(I/I_0)$	$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
<b>Livello della densità Energetica</b>	$L_D = 10 \log_{10}(D/D_0)$	$D_0 = 10^{-12} \text{ J/m}^3$

**Standard e quantità di riferimento per i Livelli Acustici.**

<b>Materiale</b>	<b><math>\rho</math> coeff. di Poisson</b>
Mattoni pieni	0.3
Calcestruzzo	(0.1 – 0.15)
Vetro	0.23
Marmo	0.3
Gesso	0.3
Legno	0.3
Alluminio	0.36
Piombo	0.43
Bronzo	0.3
Oro	0.42
Ghisa	0.27
Titanio	0.3
Rame	0.35
Acciaio	0.29

Tabella che mostra il coefficiente di Poisson per alcuni materiali permeabili al suono.

<b>SORGENTE SONORA</b>	<b>Potenza in W sonori</b>
<b>Aereo turbogetto</b>	<b><math>10^4</math></b>
<b>Aereo turboelica</b>	<b><math>10^3</math></b>
<b>Orchestra (75 elementi)</b>	<b>10</b>
<b>Martello pneumatico</b>	<b>1</b>
<b>Radio ad alto volume</b>	<b><math>10^{-1}</math></b>
<b>Auto in autostrada</b>	<b><math>10^{-2}</math></b>
<b>Ventilatore assiale 1500 g/m</b>	<b><math>10^{-3}</math></b>
<b>Conversazione normale</b>	<b><math>10^{-4}</math></b>
<b>Sussurro di voce</b>	<b><math>10^{-5}</math></b>

- Tabella che mostra alcune sorgenti sonore e le intensità prodotte -

L'intensità sonora ( $W/m^2$ ) è calcolata :

$$I = \frac{P_w}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{\text{Potenza} \cdot \text{sonora} \cdot W}{\text{Angolo} \cdot \text{solido}}$$

Alcuni esempi di calcolo della velocità del suono

**Nei Gas:**

$$u = \sqrt{\frac{yRT}{M}} = \sqrt{\frac{yP}{\sigma}}$$

**R**=costante dei Gas , **T**= temperatura °K del gas , **M** = massa molare del gas kg/mole ,  **$\sigma$**  = densità kg/m<sup>3</sup> , **P**= pressione in Pa , **y** = costante di Laplace

**Y=1.667** per gas monoatomici He, Ne, A, Kr, Xe

**Y=1.40** per N<sub>2</sub> , O<sub>2</sub>

**Y= 1.15 a 1.35** per metano, acetilene e altre molecole complesse  
(1 atm =1,01320 10<sup>5</sup> Pa)

**Su una corda:**

$$u = \sqrt{\frac{T_f}{\sigma \cdot S}}$$

**T<sub>f</sub>** = tensione (forza) della corda in kg m/s<sup>2</sup> ,  **$\sigma$**  = densità kg/m<sup>3</sup> , **S** = area della sezione m<sup>2</sup>

$$f = n \cdot \frac{1}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T_f}{\sigma \cdot S}}$$

Frequenza di oscillazione:

f = Hz , T<sub>f</sub> = dyne ,  **$\sigma$**  = g/cm<sup>3</sup> , S= cm<sup>2</sup> , L = cm , n =numero intero  
( 1 dyne = 10<sup>-5</sup> N )

**Nei Solidi:**

$$u = \sqrt{\frac{E}{\sigma}}$$

$$u = \sqrt{\frac{E \cdot 0,001309}{\sigma}}$$

FORMULA PRATICA NEI SOLIDI

E= modulo di Young=N/m<sup>2</sup> ,  **$\sigma$**  =kg/dm<sup>3</sup> , u =m/s

<b>VELOCITÀ DEL SUONO NEI GAS</b>	
<b>GAS</b>	<b>m/s</b>
Aria, secca	331
Aria (20°C)	344
Aria (0 °C)	331
Aria (100°C)	388
Aria (-100°C)	263
Ammoniaca	415
Argon	308
Anidride carbonica	259
Monossido di carbonio	338
Cloro	206
Deuterio	890
Etano (10°C)	308
Etilene	317
Elio	965
Idrogeno	1284
Bromuro di idrogeno	200
Cloruro di idrogeno	206
Ioduro di idrogeno	157
Solfuro di idrogeno	289
Illuminante (gas di carbone)	453
Metano	430
Neon	435
Ossido nitrico (10 °C)	324
Azoto	334
Ossido di azoto	263
Ossigeno	316
Anidride solforosa	213

<b>VELOCITÀ DEL SUONO NEI VAPORI</b>	
<b>VAPORI (97 °C)</b>	<b>m/s</b>
Acetone	230
Benzene	202
Tetracloruro di carbonio	145
Cloroformio	171
Etanolo	269
Etere etilico	206
Metanolo	335
Vapore d'acqua (134 °C)	494

<b>Velocità del suono nella materia a 15°C</b>			
<b>Sostanza</b>	<b>Velocità m/s</b>	<b>Sostanza</b>	<b>Velocità m/s</b>
Acciaio	6096	Mercurio	1407
Alluminio	5100	Etere	1032
Ferro	5130	Benzina	1166
Marmo	3810	Acqua (15 C)	1457
Cemento Armat.	3000	Acqua (20 C)	1561
Granito	6000	Acqua (mare)*	1533
Legno	3350		
Gomma (Copertoni)	54	Aria (0 C)	331
Nichel	4970	Aria (20 C)	344
Rame	3800	Anidride carb.	258
Piombo	1322	Cloro	206
Vetro	5550	Idrogeno	1236
Sughero	500	Vapore di acqua (100 C)	404
Carbonio	18350	Ossigeno	317
Alcole Etilico	1220	Azoto 27 C 100 bar	379
Alcole Metilico	1143	Azoto 27 C 1 Bar	353

La velocità del suono in aria di 340 m/s pari a 1224 km/h è stata utilizzata come unità di riferimento aerospaziale per la misura della velocità (MACH 1).

## Velocità del suono in acqua

### Condizione generale

$$V_{suono} = \sqrt{\frac{B}{\sigma}}$$

B = Fattore di compressibilità (liquido)     $\sigma$  = densità

### Dati relativi alla propagazione sonar

Strato termoclino 1300 m nord Atlantico – 650 m Pacifico nord orientale

Sull'interfaccia dello strato termoclino la gittata sonar è di 12.000 m

### PROPAGAZIONE DI SUPERFICIE (ONDE DI SUPERFICIE)

$$v = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\tau}{\sigma\lambda}\right) \cdot \left(\operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{\lambda}\right)}$$

$g$  = accelerazione di gravità 9.81,     $\tau$  = Tensione superficiale del fluido –  
 Acqua =  $7.3 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$ ,     $\sigma$  = densità del fluido,     $h$  = profondità del fondo  
 $\lambda$  = lunghezza d'onda ,

### Caso con $h \gg \lambda$

$$v = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\tau}{\sigma\lambda}\right)}$$

**PROPAGAZIONE DI PROFONDITÀ** ( dipende dalla salinità, dalla pressione, dalla densità del fluido e dalla temperatura).

Aumenta di circa **1.82 m/s** ogni **100 m (10 atm)** -- di circa **3 – 4 m/s** per ogni grado centigrado Per un incremento di una unità percentuale di salinità di **1.1 m/s** (valore medio **35 per mille**)

<b>Profondità (m)</b>	<b><math>\sigma = \text{kg/dm}^3</math></b>
<b>500</b>	<b>2.2</b>
<b>1000</b>	<b>4.8</b>
<b>1500</b>	<b>5</b>
<b>2000</b>	<b>5.1</b>
<b>2500</b>	<b>5.5</b>
<b>3000</b>	<b>7</b>
<b>3500</b>	<b>7.8</b>
<b>4000</b>	<b>8</b>
<b>4500</b>	<b>8.2</b>
<b>5000</b>	<b>8.5</b>
<b>5500</b>	<b>8.8</b>
<b>6000</b>	<b>9</b>

La densità dell'acqua distillata a 4 C è pari a **1 kg/dm<sup>3</sup>**

**Velocità del suono in profondità**

$$v = \sqrt{\frac{B}{\sigma}}$$

**B** = modulo di compressibilità

**$\sigma$**  = densità

CARATTERISTICHE MECCANICHE DI ALCUNI MATERIALI (Resistenza all'elasticità)					
Materiale	E (Young) $10^{10} \text{ N/m}^2$	G Modulo di rigidità $10^{10} \text{ N/m}^2$	Limite di elasticità $10^7 \text{ N/m}^2$	CARICO DI ROTTURA $10^7 \text{ N/m}^2$	
				Trazione	Compressione
Ferro	20	8	20	35	-
Acciaio	22 ( $2.2 \cdot 10^6$ $\text{kg/cm}^2$ )	8.5	30	50 – 200	
Alluminio	7	2.5	-	10	-
Rame	10	4	7 - 30	10 - 40	-
Ottone	8	3	7 – 40	15 – 50	-
Piombo	1.5	0.5	0.5 - 1	1	5
Vetro	6	2.5	-	3 – 9	60 – 120
Caucciù/ gomma	Circa $10^{-4}$	-	Circa $10^{-1}$	$3 - 10^{-1}$	-
WIDIA (WC)	63				687
Fibra di carbone II	33 – 35				230 – 260
Quarzo ( $\text{SiO}_2$ )	31	<b>Materiali plastici</b>		<b>E (Young)</b> $10^{10} \text{ N/m}^2$	<b>Carico di rottura</b> $10^7 \text{ N/m}^2$
Carburo di titanio TiC	34	Polistirene (PS) (Moplen)		0.28	
MgO	20	Cloruro di polivinile (PVC)		0.07 – 0.41	
Legno	1.3	Politetrafluoroetilene (PTFE) (TEFLON)		0.034 – 0.069	
Film di diam. Diamante	0.000116 100	Polimetilmetacrilato (PMMA) (Plexiglas)		0.34	
Calcestruzzo	1.4	Poliammide Nylon(PA)		0.28	
Osso (femore)	1.9 - 2	Nomex (nylon high temperature)		12.0 – 12.4	600
Allumina	34.5	Polietilene (PE) Alta densità		0.034 – 0.124	
Argento	7.5	Lactron (granturco)		0.39 – 0.58	
Platino	16.7	Polietilentereftalato Poliestere		1 – 1.27	
Stagno	5.5	Kevlar 149/49/29		18.6/13.1/8.3	340/400/360
Tungsteno	40	Kapton (poliimmide)		0.25 (?)	200 – 670
Oro	8	Polipropilene (PP)		0.09	
Titanio	8				

Moltiplicando i valori in  $\text{N/m}^2$  per  $1.02 \cdot 10^{-7}$  si ottengono  $\text{kg/mm}^2$

### UNITÀ DI MISURA DELLA PRESSIONE

	<b>N/m<sup>2</sup> pascal</b>	bar	atm.	cm Hg *1)	PSI lb/inch <sup>2</sup> P/inch <sup>2</sup>	lb/ft <sup>2</sup>	mH <sub>2</sub> O (4°C)	inch di H <sub>2</sub> O (4°C)	mmHg tor (0°C)
<b>1N/m<sup>2</sup> pascal</b>	1	10 <sup>-5</sup>	9.869 10 <sup>-6</sup>	7.501 10 <sup>-4</sup>	1.450 10 <sup>-4</sup>	2.089 10 <sup>-2</sup>	1.019 10 <sup>-4</sup>	4.015 10 <sup>-3</sup>	7.501 10 <sup>-3</sup>
bar	10 <sup>5</sup>	1	0.986	75.01	14.5	2089	10.19	401.46	750.062
atm.	1.0132 10 <sup>5</sup>	1.013	1	76	14.69	2.116 10 <sup>3</sup>	10.33	406.78	760
cm Hg *1)	1.333 10 <sup>3</sup>	0.0133	1.316 10 <sup>-2</sup>	1	1.933 10 <sup>-1</sup>	27.85	0.1358	5.35	10
PSI lb/inch <sup>2</sup> p/inch <sup>2</sup>	6894.76	0.0689	0.068	5.171	1	144	0.703	27.68	51.71
lb/ft <sup>2</sup>	47.88	4.78 10 <sup>-4</sup>	4.725 10 <sup>-4</sup>	0.0359	0.00694	1	0.0048	0.0141	0.359
mH <sub>2</sub> O (4°C)	9806.6	0.098	0.0967	7.35	1.422	204.8	1	39.37	73.55
inch di H <sub>2</sub> O (4°C)	249.08	0.00249	2.45 10 <sup>-3</sup>	0.186	0.0361	5.20	2.54 10 <sup>-2</sup>	1	1.868
mmHg tor (0°C)	133.32	1.33 10 <sup>-3</sup>	0.0013 1	0.1	0.0193	2.785	1.35 10 <sup>-2</sup>	0.535	1

\*1) a 0°C con g=9.80665 m/s<sup>2</sup>

	<b>N/m<sup>2</sup> pascal</b>	atm.	cmHg	PSI lb/inch <sup>2</sup> P/inch <sup>2</sup>	lb/ft <sup>2</sup>	mH <sub>2</sub> O (4°C)	inch di H <sub>2</sub> O (4°C)	mmHg tor (0°C)	bar
<b>Kp/cm<sup>2</sup> (at)</b>	9.806 10 <sup>4</sup>	0.967	73.55	14.22	2048.1	10	28.95	735.55	0.9806

1 bar = 10 N/cm<sup>2</sup>

## ALLEGATO:

I nostri sensi reagiscono alla stimolazione esterna attraverso un processo molto complesso tramite il quale lo stimolo ( $I$ ), viene pesato opportunamente e tradotto in sensazione. La legge psicofisica di Fechner ( $S=k \log I$ ) sostiene che la sensazione ( $s$ ) è proporzionale al logaritmo dello stimolo ( $I$ ). Recentemente lo studioso S.S. Stevens dell'Università di Harvard ha specificato che, sebbene la formula può essere una prima approssimazione, in realtà le cose sono un tantino più complicate. Anzi, pare che addirittura i nostri sensi, in particolari condizioni, reagiscano in realtà in maniera quasi opposta alla legge di Fechner. Tuttavia per quanto riguarda i concetti che intendo esporre, la legge di Fechner si adatta abbastanza bene a quelle che sono le percezioni della vista e dell'udito.

Se osserviamo il comportamento dell'uomo nel suo ambiente naturale, ci appare evidente che gli stimoli da cui esso è attorniato, sono estesi in un'ampia banda di energie sonore. Se restiamo nell'ambito di un ambiente molto vicino a quello primitivo, possono essere meglio comprese le considerazioni che farò tra poco, attraverso alcuni esempi. Il fruscio di foglie o il rumore di rametti che si spezzano lontano dal punto in cui noi ci troviamo è un rumore estremamente debole. Normalmente l'energia sonora messa in gioco in questo caso si aggira sui  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Questo valore numerico, se convertito in variazione di pressione, corrisponde a circa  $10^{-10}$  atmosfere (che a sua volta corrisponde al valore di riferimento pari a  $20 \mu\text{Pa}$ ). Contemporaneamente a queste deboli emissioni di energia sonora, ci sono quelle di valore molto più elevato come: l'acqua di una cascata, un fulmine, l'esplosione di un vulcano ecc. Questi suoni, producono un'energia spaventosamente più elevata di quella prodotta dai fruscii di foglie o altri deboli suoni, che prima abbiamo elencato presentando ordini di grandezza di circa  $10^{14}$  volte superiori. Il boato di un'esplosione ad esempio, come quella di un vulcano, può raggiungere livelli di oltre  $100 \text{ W/m}^2$ , se il suono è ascoltato nelle sue vicinanze.

Poiché ho una grande considerazione del Dio che ci ha creati, non ho mai avuto dubbi del fatto che egli avesse certamente preso tutti i necessari provvedimenti progettuali, per consentire alle nostre orecchie di lavorare in un ambiente di questo tipo. Non sarebbe stato possibile dotarci di un trasduttore acustico (orecchie) con risposta lineare. Sarebbe stato difficile adattarlo alla dinamica così ampia dei segnali che doveva ricevere. Supponete, infatti, che la percezione del nostro udito fosse lineare (non fate la solita battuta guardando l'ortopedica posizione del vostro dito indice). Ma a parte gli scherzi, se il nostro udito fosse veramente lineare e dovesse essere adattato a percepire suoni di forte intensità, come il boato prodotto da vulcani, oppure il rumore di una cascata, esso presenterebbe la lacuna di essere poco sensibile ai suoni deboli. Ma questo per l'uomo costituirebbe un grosso inconveniente. Infatti, durante la notte, l'avvicinarsi di un predatore o un qualsiasi altro pericolo come l'approssimarsi di un serpente ecc. non sarebbero rilevati dal nostro senso acustico. Questo ragionamento ci porterebbe a pensare che potrebbe essere conveniente aumentare drasticamente la sensibilità del nostro trasduttore auricolare. Ma questo provocherebbe altre spiacevoli condizioni. Infatti, in questo caso, un uomo dotato di sensibilità uditiva così elevata da avvertire variazioni di pressione di poche decine di miliardesimi di atmosfere a cospetto di eventi come esplosioni di vulcani, temporali, ma anche il semplice ruggito di un predatore, avvertirebbe nel cervello sensazioni sonore impressionanti.

Per chiarire il significato del limite inferiore della curva di sensibilità del nostro udito, voglio dirvi che il valore di  $10^{-10}$  atmosfere che, come abbiamo già spiegato precedentemente può essere il rumore generato da un leggero fruscio di foglie, corrisponde ad un suono che genera una variazione di pressione così piccola, che lo spostamento che subisce la membrana del timpano è pari ad una distanza che equivale grosso modo al diametro della molecola di idrogeno ( $10^{-8}$  cm).

Di conseguenza, l'unica soluzione che il grande progettista " il Creatore", doveva perseguire per dotarci di un trasduttore acustico capace di garantire una condizione di allerta, nelle condizione di presenza di un suono molto debole, ed essere praticamente in grado di resistere in modo ottimale a suoni molto forti, era quella di far in modo che l'udito lavorasse in modo logaritmico. Il nostro udito sarebbe stato adattato a ricevere lo stimolo esterno operando su esso una funzione logaritmica per darci la sensazione più adeguata a seconda dei vari casi che la natura avesse prodotto.

Pensate che cosa interessante, per un professore di matematica utilizzare queste considerazioni che stiamo facendo per affascinare e stimolare i suoi allievi intendi a comprendere il concetto di logaritmo o di esponenziale.

Comunque torniamo a noi.

Fu l'americano Alexander Graham Bell che nel 1876 calcolò la relazione matematica che permetteva di calcolare la sensazione sonora in base al logaritmo del rapporto della potenza del segnale e quella di riferimento:

$$B = \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

Il termine "B" corrisponde al guadagno e viene calcolato in BEL, chiaramente legato al nome dello scienziato. Il termine  $P_0$  è la potenza sonora di riferimento. L'equazione, può essere adoperata indifferentemente sia nei casi in cui, la potenza di riferimento è  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> che in tutti gli altri casi in cui si usa un rapporto fra due potenze. Ben presto ci si accorse che l'unità di misura "Bel" era troppo grande e fu deciso di adoperare un sottomultiplo del Bel. Ci si accordò sul l'uso del "dB" chiamato decibel che risultò essere un decimo del valore precedente. La formula vista prima pertanto fu trasformata in :

$$dB = 10 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

Il termine dB definito come "guadagno", cominciò a diventare molto diffuso in tutti quei casi in cui si dovevano misurare rapporti di grandezze che interessavano segnali sonori.

Il grafico, mostrato dalla figura successiva, illustra la curva di sensibilità o campo uditivo del nostro organo di senso. Il grafico mostra anche le aree dove sono contenute le informazioni spettrali del linguaggio e della musica e la soglia minima di sensibilità del nostro orecchio definita a 0 dB. L'asse di ordinata posto a destra del grafico, mostra i rapporti di segnale in dB riferiti al livello di 20  $\mu$ Pa.

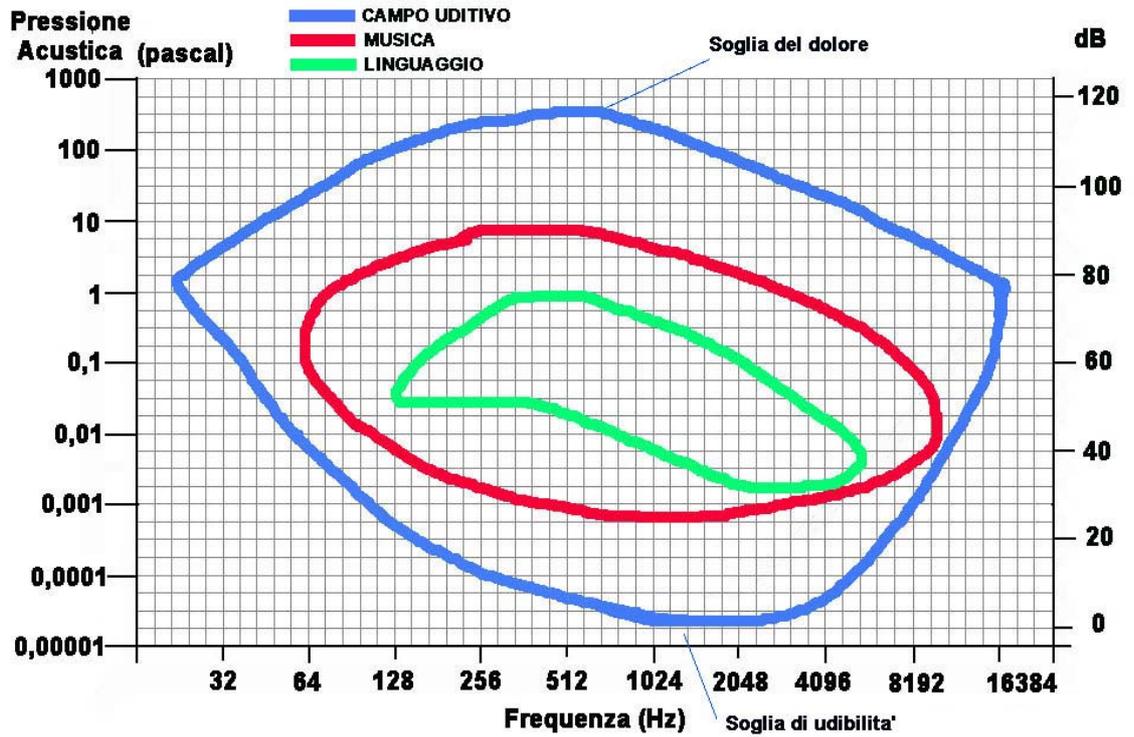


Fig. 12.6 - Campo uditivo umano -

Tutte le volte che si parla di pressione sonora, quindi anche per quanto riguarda i valori riportati dal grafico della figura n. 12.6, ci si riferisce ad un concetto di pressione **sonora efficace**. Le variazioni di pressione  $\Delta p$ , prodotte da un suono, sono sia positive (compressione), che negative (rarefazione), pertanto per esprimere l'entità degli effetti sviluppati, non si può ricorrere al loro valore medio che risulterebbe nullo.

La formula che definisce il valore della pressione sonora efficace è la seguente:

$$P_{eff} = \sqrt{\int_0^T \frac{\Delta p^2 dt}{T}}$$

Nel caso di un tono puro, cioè di una sinusoide, il valore della pressione efficace risulta essere uguale a :

$$P_{eff} = \frac{\Delta p_{max}}{\sqrt{2}}$$

In un mezzo elastico, il suono produce la vibrazione delle particelle del mezzo e si propaga con velocità caratteristica. Nei fluidi le vibrazioni sono parallele alla direzione di propagazione dell'onda, per cui, si parla di onde longitudinali. Nei solidi invece subentrano anche propagazioni trasversali. La velocità di propagazione del suono nell'aria alla pressione di 1 atm e a 20 °C di

temperatura è di 340 m/s. Per chi volesse cimentarsi nel calcolo della velocità del suono nell'aria, si può utilizzare la seguente formula empirica che tiene conto della temperatura "T" ma considera sempre pari a 1 atm la pressione dell'aria.

$$u_{aria} = 331,2 + 0,6 \cdot T \cdot (m / s)$$

In questa formula "T" è la temperatura dell'aria in gradi centigradi. Nei materiali solidi, da un punto di vista generale, la velocità di propagazione di un'onda sonora è proporzionale alla radice quadrata del modulo di elasticità del solido (modulo di Young), diviso la densità del materiale. Per avere la velocità espressa in m/s è necessario esprimere il modulo di Young in Pa (pascal) e la densità in kg/m<sup>3</sup>.

Per un solido a forma di piastra è possibile usare la formula seguente:

$$u_{solidoP} = \sqrt{\frac{E}{\sigma \cdot (1 - \rho^2)}}$$

Dove "E" è il modulo di Young in Pa, "σ" è la densità in kg/m<sup>3</sup>, ed infine "ρ" risulta essere il coefficiente di Poisson del materiale che costituisce la piastra. Nell'appendice di modulo sono riportate delle tabelle che mostrano il modulo di Young e il coefficiente di Poisson di alcuni materiali.

Spesso si parla anche di impedenza acustica dei materiali rapportata a quella assunta dall'aria. Tale impedenza acustica può essere definita come il prodotto della densità "σ" del materiale per la velocità di propagazione longitudinale del suono al suo interno. Essa si misura in rayl. L'aria nelle condizioni di riferimento ha un'impedenza pari a **400 rayl**.

Infatti, per quello che abbiamo detto, nel caso dell'aria avremo:

$$Z = \sigma u = 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 340 \text{ m/s} \cong 400$$

La tabella successiva mostra l'impedenza acustica di alcuni materiali comuni.

Materiale	Z(rayl) $10^{-5}$	Materiale	Z(rayl) $10^{-5}$
Acciaio	390	Abete	20,8
Alluminio	138	Acero	27,8
Argento	270	Faggio	25
Nichel	430	Frassino	32,7
Oro	386	Olmo	23,4
Ottone	295	Pino	16,6
Piombo	138	Pioppo	15,9
Platino	572	Quercia	30,7
Rame	317		
Stagno	182	Acqua (13°C)	14,4
Zinco	259	Alcool	9,9
Ardesia	135	Benzina	10,5
Avorio	54	Aria 0°C	$4,27 \cdot 10^{-3}$
Gomma	0,54	Aria 15°C	$4,11 \cdot 10^{-3}$
Granito	107	Azoto	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Marmo	103	Idrogeno	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Mattone	66	Ossigeno	$1,43 \cdot 10^{-3}$
Sughero	1,2		
Vetro	142		

Nel legno l'impedenza è calcolata nel senso della fibra. Nel senso trasversale i valori saranno ridotti a 1/3.

## Scale musicali

Nella teoria di questo modulo, e soprattutto all'interno dei laboratori, abbiamo parlato delle proprietà del suono. È importante a questo punto effettuare alcune precisazioni. Quando abbiamo parlato della scala musicale, ci siamo riferiti alla scala naturale e abbiamo detto come le varie frequenze musicali possono essere ricavate da 7 note. Per essere corretti, la scala naturale utilizza 21 note. Come abbiamo visto, le 7 note fondamentali vengono ricavate matematicamente in base ai rapporti frazionari seguenti:

**1; 9/8 ; 5/4 ; 4/3 ; 3/2 ; 5/3 ; 15/8 ; 2**

corrispondenti a:

**do, re, mi, fa, sol, la, si**

Questo significa che, in base alla frequenza della prima nota (il primo termine numerico della serie), per determinare la frequenza di quella successiva occorre moltiplicare la frazione corrispondente. Oltre queste 7 note, ci sono

altre 14 note. Le prime 7 note, chiamate “diesis” si determinano moltiplicando per ogni rapporto naturale, mostrato dalla serie precedente, il termine 25/24. Le successive 7 note, chiamate “bemolle” si ottengono moltiplicando il termine 24/25. In tal caso l'intervallo fra una nota e il diesis della stessa nota vale 25/24; quello fra la nota e il suo bemolle 24/25. Per esigenze pratiche, in relazione alla semplificazione della costruzione di strumenti musicali, è stato provveduto a ridurre la scala naturale in 12 note, con l'intervallo medio fra ogni nota ampio esattamente 1,094. Per essere precisi, il rapporto fra le sole note fondamentali è circa 1,12 mentre il rapporto FA/MI e DO/SI è circa 1,05. La tabella successiva, vuole mostrarvi un esempio di scala moderata di un normalissimo pianoforte che utilizza le sole note fondamentali con i relativi rapporti. Invece la figura 12.1.6, mostra un paragone geometrico per rappresentare la situazione dei rapporti delle varie note e farvi capire esattamente come esse sono proporzionate.

Note	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
Frequenza (Hz)	263	295	330	350	394	440	479	526
Rapporto		1,12	1,12	1,05	1,12	1,12	1,05	

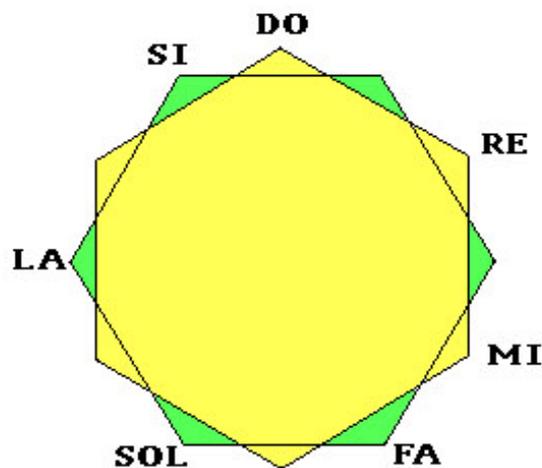


Fig. 12.1.6 - Distanza fra le note -

## L'analisi spettrale

Un suono puro o armonico è considerato nella sua rappresentazione nel dominio del tempo come un segnale di tipo sinusoidale la cui espressione analitica è la seguente:

$$V = \text{sen } \alpha$$

La funzione seno è quella funzione trigonometrica che rappresenta l'andamento del segnale, così come già visto durante la trattazione di teoria.

Un suono complesso invece è un'oscillazione acustica che contiene svariati suoni puri o armonici, tutti rappresentabili in forma sinusoidale e dotati di frequenze diverse da quella principale, detta fondamentale: in pratica, un suono complesso non è altro che la sovrapposizione di suoni puri. Dalle considerazioni sugli armonici nascono conseguentemente problemi di composizione e scomposizione di un suono oppure, generalizzando, di qualsiasi grandezza periodica, visto che comunque il suono è solo una delle innumerevoli fenomenologie fisiche facenti parte della famiglia di grandezze periodiche. Il teorema matematico che sintetizza quanto sopra detto è il teorema di **Fourier** che enunciamo:

*Ogni funzione periodica di frequenza "f" può essere considerata somma di un termine costante (nullo nel caso di grandezze alternate) di una serie finita o infinita di termini sinusoidali e cosinusoidali aventi frequenze multiple della frequenza "f" dell'oscillazione considerata.* Ossia chiamando " $v_a$ " il valore istantaneo di una funzione periodica qualunque, si può scrivere, indicando con  $V_0$  il valore della eventuale componente continua,  $V_{1s}$ ,  $V_{2s}$ , ...,  $V_{ns}$  i valori massimi del primo, secondo, ecc. armonici sinusoidali e  $V_{1c}$ ,  $V_{2c}$ , ...,  $V_{nc}$  quelli degli armonici cosinusoidali.

$$v_a = V_0 + V_{1s} \cdot \sin \alpha + V_{2s} \cdot \sin 2\alpha + \dots$$

$$\dots V_{ns} \cdot \sin n\alpha + V_{1c} \cdot \cos \alpha + V_{2c} \cdot \cos 2\alpha + \dots V_{nc} \cdot \cos n\alpha$$

In parole semplici, un suono oppure un generico segnale ha per così dire una specie di impronta digitale caratterizzata dal suo spettro armonico. Il termine " $\alpha$ " rappresenta analiticamente la pulsazione moltiplicato il tempo. Quindi è la viva espressione del termine frequenziale.

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$$

La figura successiva mostra un esempio di composizione di un segnale costituito da due armonici sinusoidali. Tramite la figura n. 13.6, il lettore potrà comprendere la trasformazione di forma del segnale risultante costituito appunto dai due armonici puri. È ovvio che la forma del segnale ottenuto dopo la composizione, risente non soltanto del valore della frequenza delle due componenti ma, anche dell'ampiezza e della loro reciproca relazione di fase. In questo specifico caso, al segnale sinusoidale fondamentale è stato aggiunto una componente a frequenza doppia.

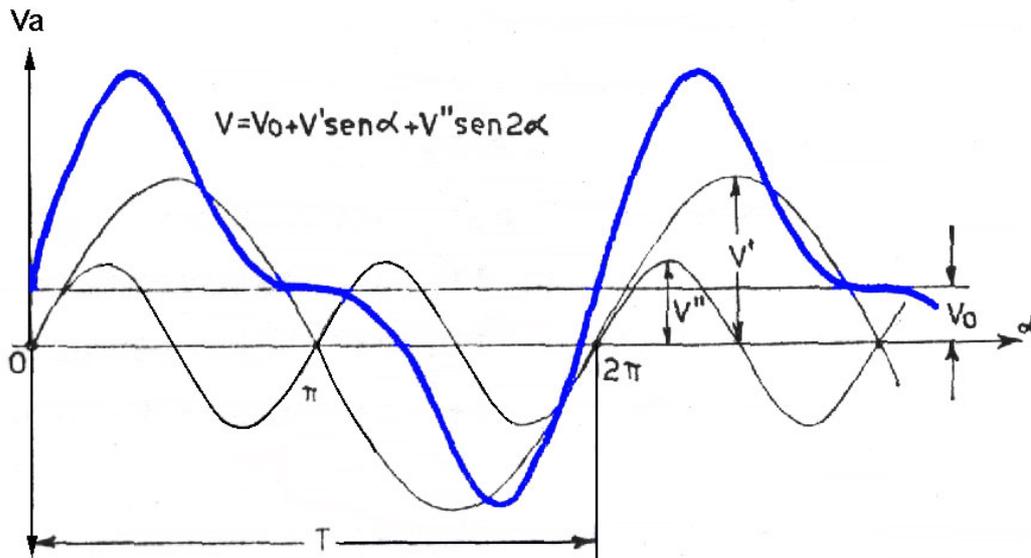


Fig. 13.6 - Segnale costituito da due armonici -

La figura 14.6 mostra invece un caso caratteristico di composizione armonica che utilizza solo frequenze multiple di tipo dispari del segnale fondamentale. Il segnale fondamentale è chiamato anche armonico n.1.

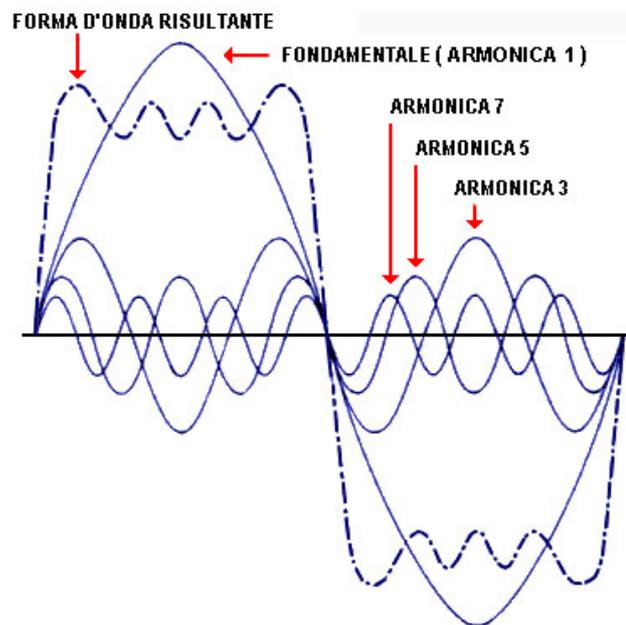


Fig. 14.6 - Segnale costituito da quattro armonici -

La figura successiva n. 15.6 mostra un analizzatore di spettro elettronico che visualizza uno spettro armonico costituito due segnali uno di 10 MHz e l'altro di ampiezza più piccola da 20 MHz (secondo armonico). Questi strumenti sono molto preziosi per analizzare la composizione di un qualsiasi segnale elettrico.

Per visualizzare e quindi analizzare un segnale sonoro, utilizzando uno di questi strumenti, è necessario che il segnale acustico sia convertito in un segnale elettrico tramite un opportuno trasduttore microfonico.

Diciamo anche che lo strumento raffigurato è solo un esempio generico che come il lettore comprenderà facilmente, non può adattarsi nel caso specifico dell'analisi sonora poiché il modello utilizzato in quest'esempio lavora su una banda di frequenza molto più elevata. In commercio esistono però svariati modelli che operano anche a frequenza più bassa.

Per ragioni dipendenti dalla complessità della tecnologia necessaria per realizzare questi strumenti, il costo di strumenti a bassa frequenza è molto più elevato del costo necessario per apparecchi a banda di frequenza più alta. L'analizzatore di rete HP 4195 (oggi obsoleto) che potrebbe in un certo senso essere utilizzato per realizzare esperienze di questo tipo, costava nel 1990 circa 50.000 euro. Per questa ragione, oggi giorno è molto più pratico e conveniente l'utilizzo di un personal computer corredato di una scheda audio opportuna e soprattutto di un software adeguato allo scopo. Ecco la ragione per la quale all'interno del laboratorio n.6, dove abbiamo visto un modo molto interessante di analizzare un suono in presenza di una scolaresca, abbiamo illustrato un sistema strutturato con un computer e con un software opportuno. Non sono stato molto chiaro sul tipo specifico di software che l'insegnante potrebbe utilizzare per trasformare il computer in analizzatore di spettro poiché credo che, come molti di voi possono comprendere, questi software sono molto numerosi e quindi ne esiste una notevole diffusione sul mercato. Farvi dei nomi di alcuni applicativi software per realizzare l'esperienza n. 6 potrebbe essere inutile, visto che ogni giorno nascono nuovi prodotti. Oggi, dobbiamo ammettere che uno studente di scuola media o media superiore, appassionato di computer, può agevolmente consigliarvi con sagacia e perizia un valido prodotto utile allo scopo.

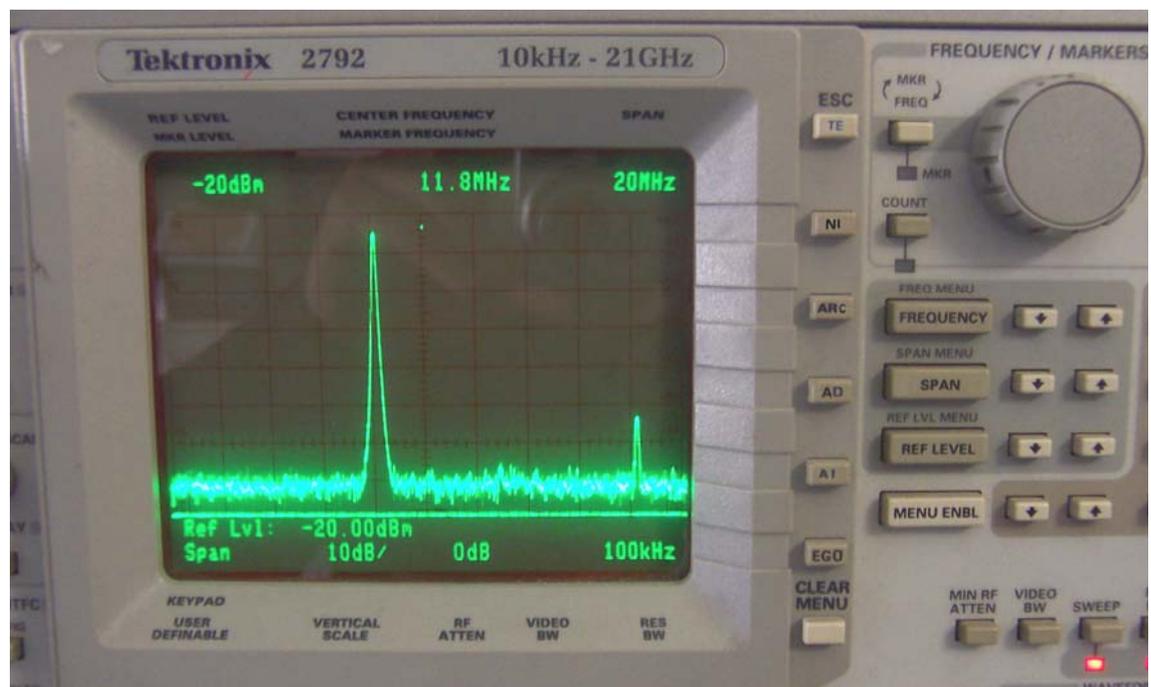


Fig. 15.6 - Analizzatore di spettro elettronico -

**NOTE:**

All'inizio di questo modulo, con un esempio molto elementare che si basava sul fenomeno delle onde osservabili sulla superficie di uno stagno d'acqua all'interno del quale facciamo cadere una piccola pietra, abbiamo capito il concetto di lunghezza d'onda e quello di frequenza. Dobbiamo però aggiungere, per correttezza della trattazione fino a questo punto svolta, che le onde acustiche di superficie non hanno niente a che vedere con le onde acustiche di profondità e quelle invece che avvertiamo nell'aria (tonfo della pietra in acqua). Infatti, le onde di superficie sono un fenomeno che riguarda il comportamento dell'interfaccia fra due mezzi propagativi diversi (aria e acqua) all'eccitazione sonora. Le onde di superficie hanno una lunghezza d'onda molto più piccola di quella delle stesse onde di profondità o di quelle che avvengono nel mezzo aeriforme. La velocità che si osserva per le onde di superficie che si verificano in uno stagno d'acqua e che si infrangono infine sulla sponda di quest'ultimo è infatti molto bassa. Ecco perché a pagina 271 ho usato fra parentesi il termine (o quasi) con precisa intenzione di anticipare al lettore la differenza qualitativa che esiste fra una propagazione di superficie e una di profondità.

Tornando a noi, questo stesso fenomeno riguarda similmente anche altri campi della fisica. Per esempio, il fenomeno si verifica con le stesse modalità sui metalli e riguarda gli elettroni liberi presenti sulla loro superficie. Allorquando forniamo ad un metallo un determinata eccitazione elettromagnetica tramite l'uso di un laser, sul bordo di quest'ultimo si formano onde superficiali di elettroni. Queste onde elettroniche hanno infatti, lunghezza d'onda molto minore di quella dell'onda eccitatrice pur avendo la stessa frequenza del campo eccitatore. Queste onde elettroniche sono chiamate dalla fisica "Plasmoni" e sono oggetto oggi di studi molto approfonditi.