

cap 4: Trasmissione di energia per onde

- propagazione del suono
- velocità del suono
- riflessione onde sonore
- eco
- riverberazione e rimbombo
- oscillazioni forzate
- risonanza
- interferenza
- suoni simultanei e battimenti
- suoni di combinazione
- consonanza e dissonanza
- la teoria armonica tonale

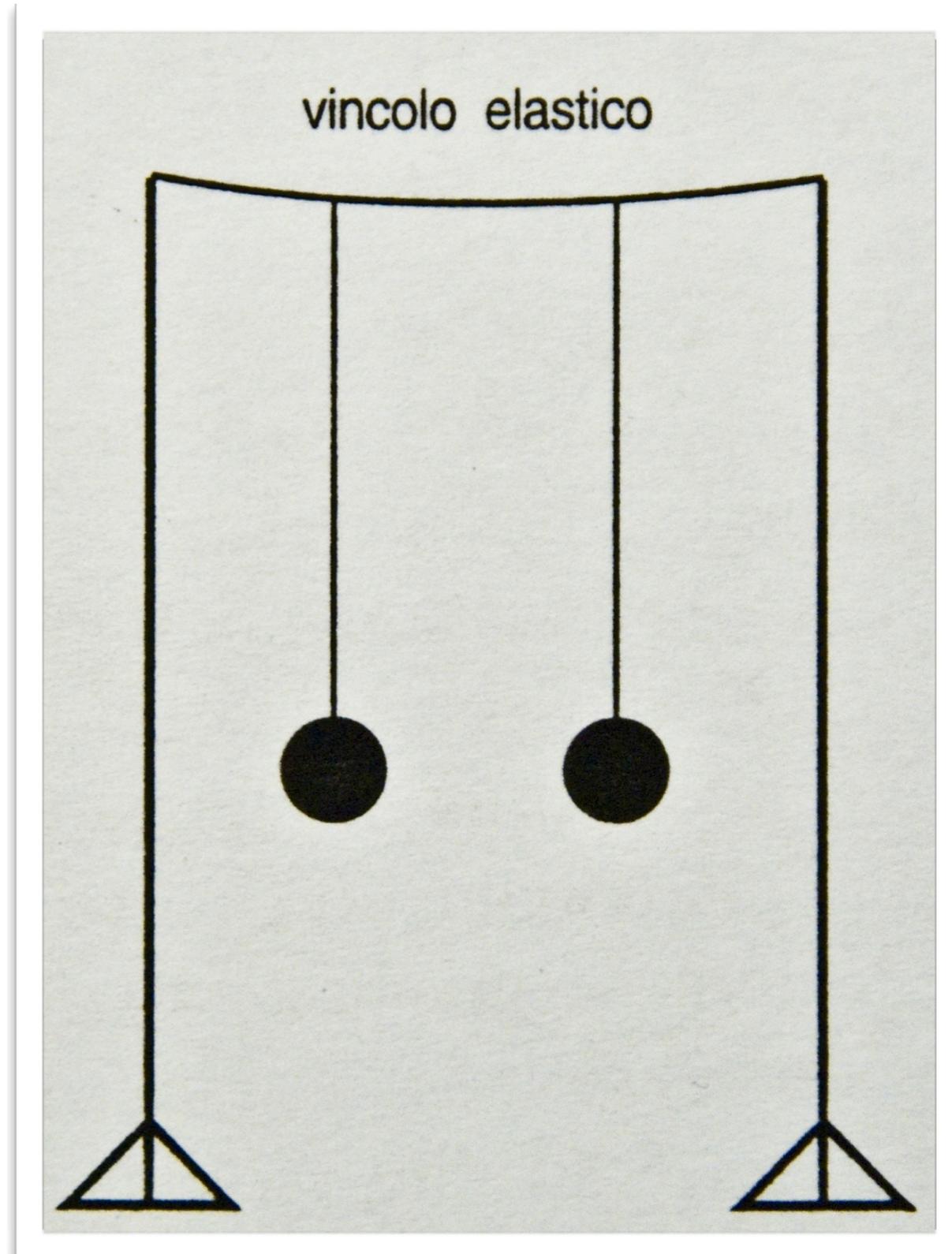
Propagazione del suono

Una classica esperienza di fisica dimostra più di molte parole cosa si deve intendere per “trasmissione di energia per onde”, nel cui campo rientra anche la propagazione, o trasmissione, del suono.

Due pendoli identici sono accoppiati tra loro da un vincolo elastico.

Uno dei due viene fatto oscillare mentre l'altro è tenuto fermo. Dal momento in cui anche il secondo pendolo viene lasciato libero, l'ampiezza delle oscillazioni del primo decresce visibilmente, mentre il secondo comincia a oscillare con ampiezza crescente, raggiungendo il massimo della elongazione nel momento preciso in cui il primo pendolo si ferma: immediatamente il ciclo s'inverte e così via sino all'esaurimento dell'energia fornita dalla forza eccitatrice. Si assiste così a trasmissione di energia attraverso un vincolo elastico, che in senso esemplificativo può essere considerato l'equivalente dell'aria, mentre la sorgente sonora può essere raffigurata dal primo pendolo.

Il movimento delle particelle materiali di un mezzo elastico, il quale sia sede di onde sonore, determina una pressione alternativa, che nel caso dell'aria (che è il mezzo attraverso il quale comunemente si trasmette il suono) si manifesta mediante condensazioni e rarefazioni del mezzo stesso.



L'energia acustica si propaga con la medesima norma in ogni direzione, per cui l'onda può considerarsi **sferica**: su ciascun punto degli infiniti piani generati, istante per istante, dalla **propagazione sferica dell'onda**, l'energia sarà presente in ragione inversa al rapporto che intercorre tra la superficie di diffusione al punto di origine e quella della sfera al punto di ascolto.

Se, ad esempio, la superficie (sferica) di diffusione all'origine è di 314 cm^2 (che comporta un raggio di 5 cm), alla distanza di 10 metri la sfera immaginaria sulla cui superficie l'energia sonora sarà uniformemente distribuita, comporterà un'area di $3.140.000 \text{ cm}^2$.

Conseguentemente, l'energia acustica presente in ogni punto di questa sfera sarà pari al valore originario moltiplicato per il quoziente di $314/3.140.000$ vale a dire ridotta alla decimillesima parte dell'intensità iniziale.

In altri termini:

l'intensità del suono varia in ragione inversa al quadrato della distanza

Durante la propagazione del suono si ha trasporto di energia, ma non di materia, anche quando la forza raggiunge i valori massimi.

Velocità del suono

La velocità del suono è la velocità con cui un suono si propaga in una certa sostanza, detta mezzo.

La velocità del suono varia a seconda del mezzo (ad esempio, il suono si propaga più velocemente nell'acqua che non nell'aria), e varia anche al variare delle proprietà del mezzo, specialmente con la sua temperatura.

Il suono si propaga in modi diversi a seconda che sia in un solido, in cui tutti gli atomi sono collegati solidalmente fra loro, oppure in un fluido (liquido o gas), che invece è incoerente. Nei fluidi, la velocità del suono segna il confine tra due regimi di moto completamente diversi, per l'appunto detti regime subsonico e regime supersonico.

Questa grandezza è molto importante, perché è anche la velocità con cui si propagano l'energia cinetica e le sollecitazioni meccaniche in una determinata sostanza.

Nell'aria viene convenzionalmente considerata a 340 m/s, ma come vediamo nella tabella nella pagina successiva, può variare parecchio con la temperatura.

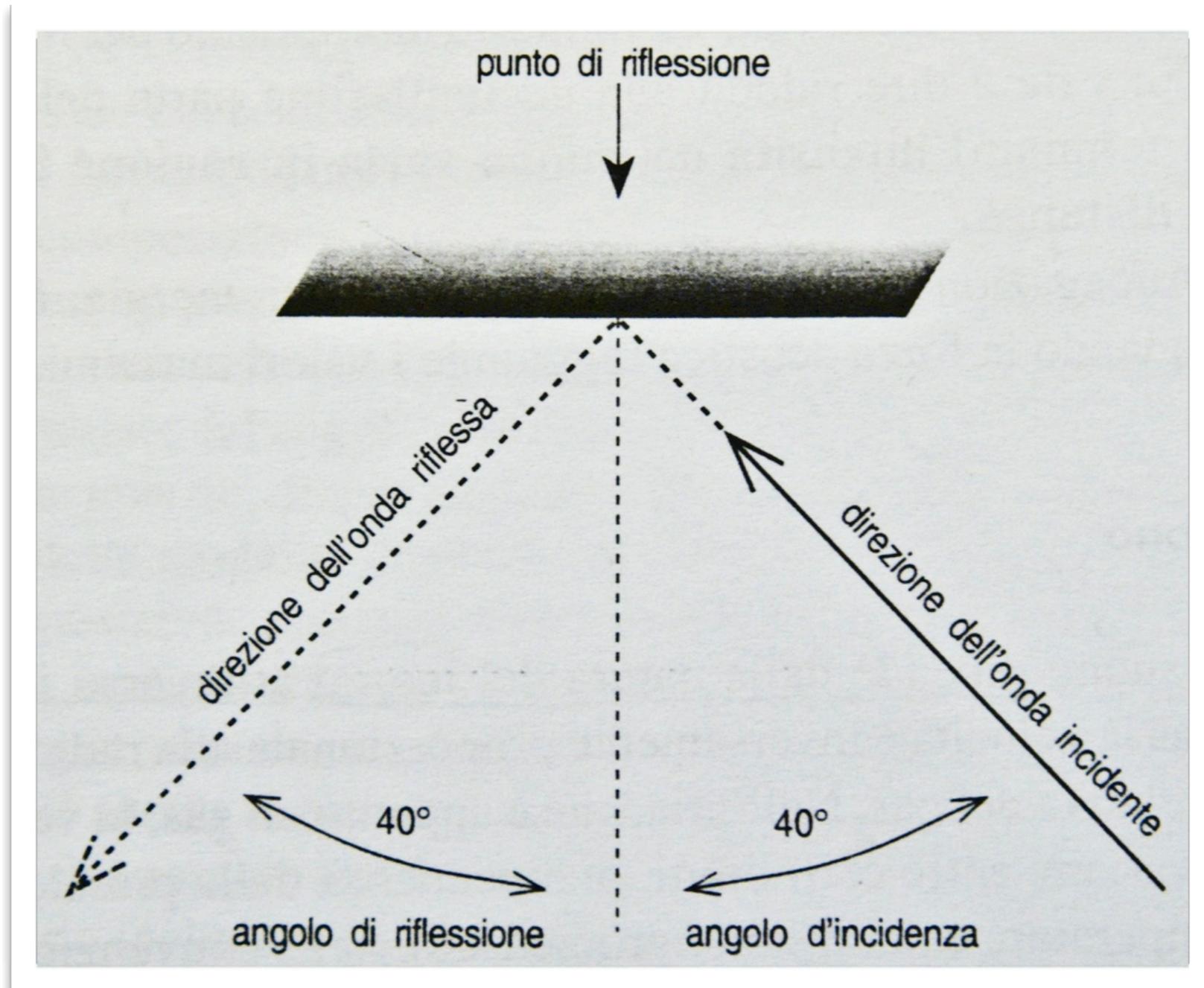
| materiale | vel suono m/s temp ambiente |
|---|--|
| aria | 340 |
| ossigeno | 316 |
| idrogeno | 1260 |
| acqua marina | 1435 |
| ferro | 5127 |
| vetro al sodio | 5000 |
| legno abete (nel senso delle fibre) | 3322 |
| legno abete (nel senso degli strati) | 724 |
| legno abete (trasversalmente agli strati) | 1405 |

| Temperatura aria in °C | vel suono m/s aria |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| -10 | 325,4 |
| -5 | 328,5 |
| 0 | 331,5 |
| 5 | 334,5 |
| 10 | 337,5 |
| 15 | 340,5 |
| 20 | 343,4 |
| 25 | 346,3 |
| 30 | 349,2 |

Riflessione delle onde sonore



Quando un sistema di onde sonore incontra un corpo incapace di vibrare, oppure atto a propagare con norma diversa il moto vibratorio, le onde riflettono con una norma che è comune a tutti i fenomeni del genere e secondo la quale l'angolo d'incidenza è uguale a quello di riflessione:



Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

Eco

In fisica e in acustica l'eco è un fenomeno prodotto dalla riflessione contro un ostacolo di onde sonore che vengono a loro volta nuovamente "percepite" dall'emettitore più o meno immutate e con un certo ritardo rispetto al suono diretto.

Tale ritardo non dev'essere inferiore ad $1/10$ di secondo. Al di sotto di tale valore non si può più parlare di eco ma di riverbero.

Un tipico esempio di riverbero è quello prodotto in una stanza dalla riflessione di onde sonore sulle pareti perimetrali.

Si parla propriamente di eco quando le singole riflessioni dell'onda sonora sono percepite distintamente dall'ascoltatore.

In termini più generali, l'eco può essere definita come un'onda che viene riflessa da una discontinuità nel mezzo di propagazione, e che ritorna con una intensità e ritardo sufficiente per essere percepita.

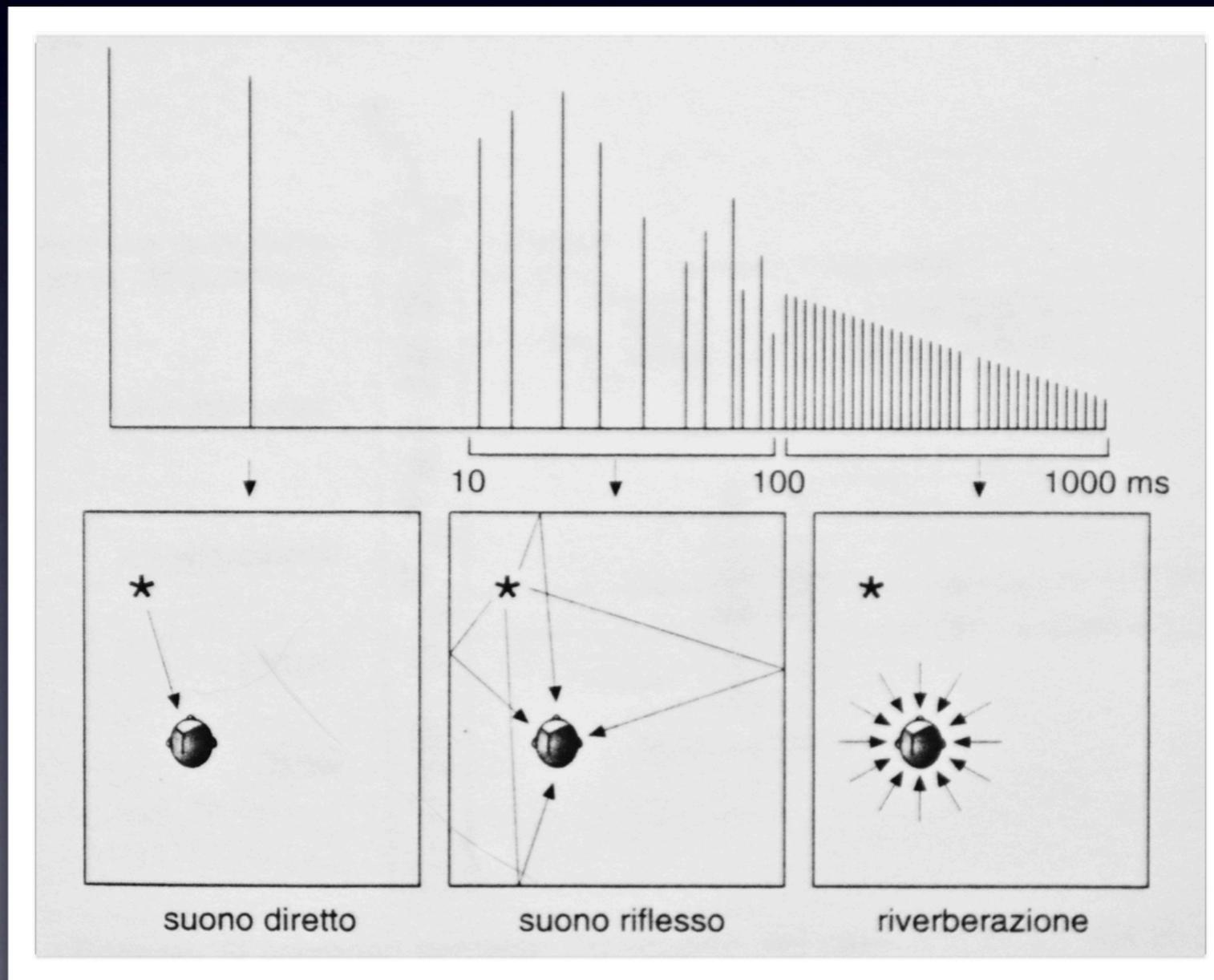
Può essere "utile" (come nei sonar) o "indesiderata" (come nei sistemi telefonici).

La sensazione sonora nel nostro organo uditivo dura per $1/10$ di secondo circa dopo la fine dello stimolo acustico: se gli stimoli si succedono con intervalli più brevi, è chiaro che si sovrapporranno l'uno con l'altro, mentre se la successione avviene con intervalli non inferiori al decimo di secondo, si potrà avere la percezione separata dalle varie sollecitazioni, regola che condiziona anche il fenomeno dell'eco.

Dato che la velocità del suono è di 340 m/s, in ogni decimo di secondo le onde sonore percorreranno quindi 34 metri. Dividendo equamente il percorso di andata e ritorno del suono, tra il punto di emissione e quello di riflessione, risulta che per poter udire distintamente l'eco occorre una distanza dalla superficie riflettente non inferiore a 17 metri.

L'eco può produrre effetti multipli quando i punti di riflessione sono più di uno, così come può consentire la ripetizione di più sillabe quando la distanza dal punto di riflessione sia adeguata.

Riverberazione e rimbombo



Tra i fenomeni dovuti alla **riflessione del suono**, la **riverberazione** è senza dubbio la più importante nella pratica musicale.

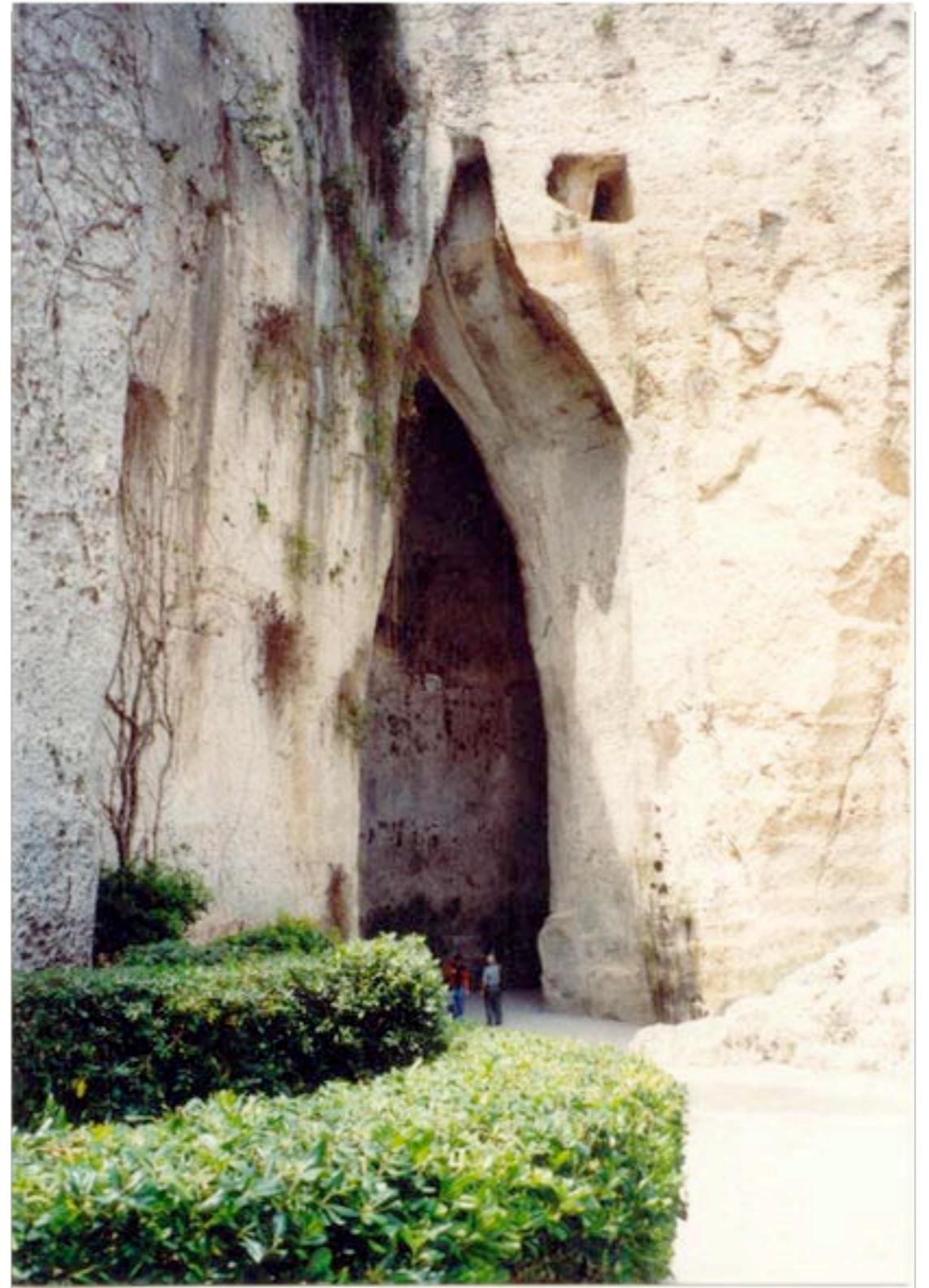
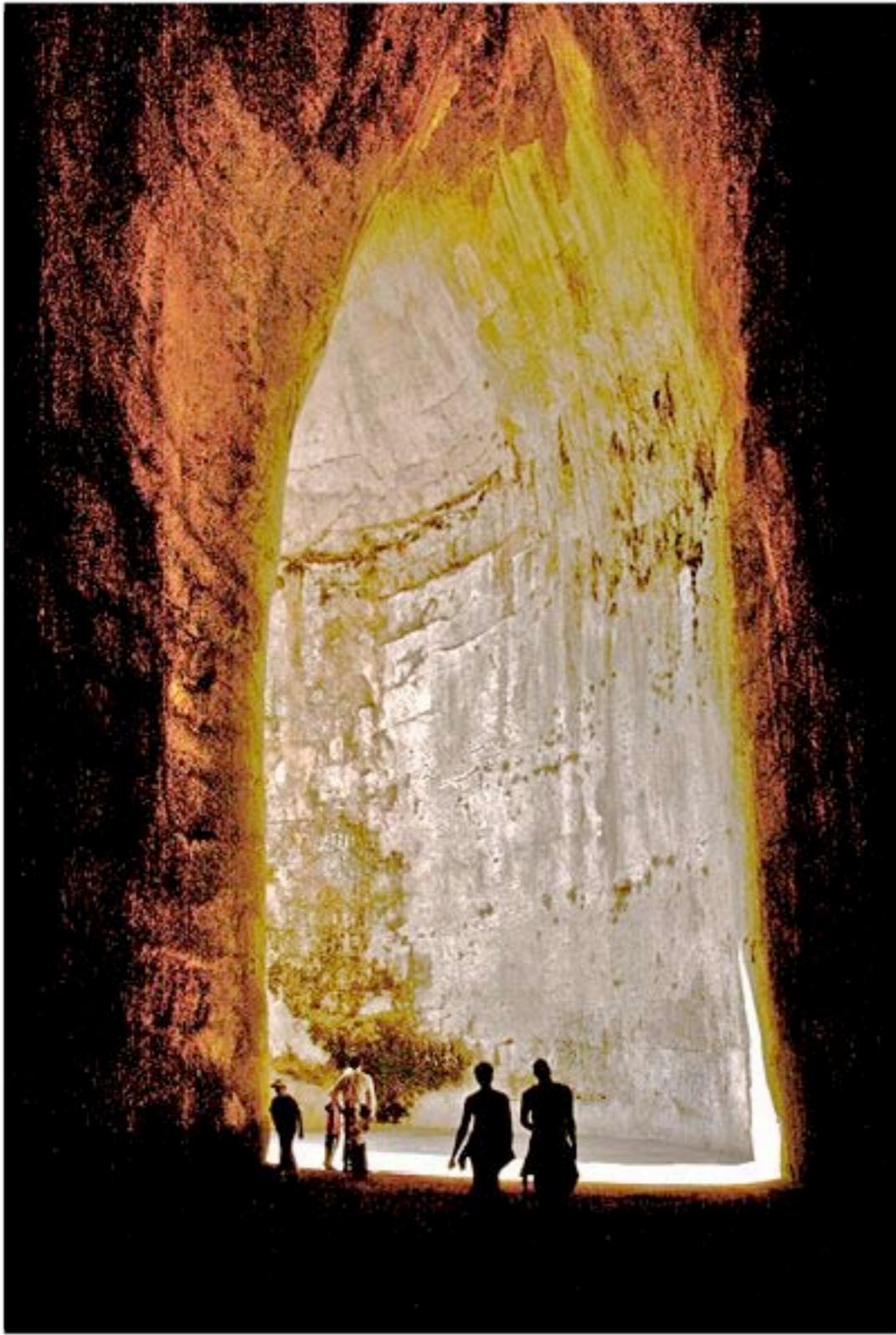
Quando tra il suono diretto e quello riflesso non intercorre un sufficiente intervallo di tempo, al posto dell'eco si ha una **sovrapposizione di effetti** chiamata riverberazione, che equivale a un **prolungamento smorzato dell'effetto sonoro diretto**.

L'esempio più comune di riverberazione è il cosiddetto effetto di "**cattedrale**", il cui nome è già bastevole a spiegarne l'origine, derivata dal forte prolungamento del suono che si nota nelle grandi chiese per le varie riflessioni dovute alle navate e ad alte particolarità architettoniche che funzionano come vere camere riverberanti.

Effetti ancor più grandiosi possono darsi in particolari condizioni, come ad esempio avviene nel celeberrimo "**Orecchio di Dionisio**", che è una caverna di forma arcuata che si apre in una latomia nei pressi del Teatro Greco di Siracusa.

In questa caverna si ha un ingigantimento del suono di proporzioni stupefacenti: un semplice battimano diventa fragore di tuono e l'emissione di una vocale sembra un coro di cento voci, con una magnificenza acustica accentuata dal lunghissimo prolungamento del suono. La regolarità della riverberazione nell'interno della caverna non fa degenerare l'effetto nella caotica situazione di "**rimbombo**", il quale consiste in una disordinata successione di riflessioni del suono, la cui più comune esemplificazione è quella del fragore del treno all'interno di una galleria.

Un effetto di ingigantimento del suono è pure quello del **tuono**, la cui imponenza è apprezzabile, non vicino al luogo della scarica elettrica, dove l'effetto acustico è piuttosto secco, ma a una distanza che consenta di percepire meglio l'esaltazione delle frequenze basse dovuta alle varie riflessioni tra il suolo, gli strati di diversa densità dell'aria e le nuvole.



Il rimbombo è il “fratello bastardo” della riverberazione, alla quale dsi deve la buona o cattiva riuscita acustica dei teatri, delle sale da concerto etc.

Lo studio di questo fenomeno acustico è piuttosto complesso ma per la sua importanza rispetto alla pratica musicale è utile esporre in una tabella i “tempi di riverberazione” consigliati da **Bruel** per diversi tipi e grandezze di locali. il tempo è indicato in secondi:

| Volume in m ³ | sale per | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|-------|--------|------------------|-------|
| | cinema | auditori | ballo | camera | musica sinfonica | sacra |
| 100 | - | 0,30 | - | 1,00 | - | - |
| 200 | 0,30 | 0,60 | - | 1,15 | - | - |
| 500 | 0,45 | 0,70 | 0,90 | 1,25 | 1,90 | 1,90 |
| 1000 | 0,60 | 0,80 | 1,00 | 1,30 | 2,15 | 2,30 |
| 2000 | 0,70 | 0,90 | 1,15 | 1,50 | 2,30 | 2,40 |
| 5000 | 0,95 | 1,10 | 1,30 | 1,75 | 2,50 | 2,75 |
| 10000 | 1,00 | - | 1,40 | 1,85 | 2,70 | 3,00 |
| 20000 | 1,20 | - | 1,60 | 1,95 | 3,00 | 3,30 |
| 50000 | 1,60 | - | - | 2,30 | 3,40 | 3,80 |

Questi esempi di riverberazione non sono accettati da tutti gli specialisti, ma l’indirizzo odierno è puntato decisamente verso valori di questa grandezza.

Un tempo di riverberazione troppo lungo è causa di scarsa intelligibilità, sia della parola che della musica, mentre se è insufficiente si ha una situazione di disagio particolarmente sentita dai cantanti e dagli strumentisti, tanto che un celebre violinista soleva dire: “in certi ambienti il mio Stradivari si comporta come uno strumento dozzinale causa la scarsa *risonanza* dell’ambiente”.

L’unico errore contenuto nella citazione è la parola *risonanza* scambiata per *riverberazione*. Tra le due vi è una differenza sostanziale, non sono di effetto acustico, ma anche di natura fisico-meccanica.

Riverbero

PRESUPPOSTI:

1. L'orecchio umano non riesce a distinguere due suoni se essi sono prodotti a meno di $1/10$ di secondo di distanza uno dall'altro (fenomeno della persistenza).
2. La velocità del suono nell'aria a 20°C è di circa 340 m/s .
3. La fonte sonora e l'ascoltatore si trovano nello stesso punto di fronte all'ostacolo.

Dati questi presupposti, in uno **spazio aperto** si può parlare di **riverbero** quando l'ostacolo si trova a meno di 17 metri dalla fonte del suono. Fino a tale distanza, infatti, il percorso dell'onda sonora (dalla fonte all'ostacolo e ritorno) sarà inferiore a 34 metri e quindi il suono impiegherà meno di $1/10$ di secondo per tornare al punto di partenza confondendosi nell'orecchio dell'ascoltatore con il suono originario. Se l'ostacolo si trova a più di 17 metri di distanza dalla fonte, allora suono diretto e suono riflesso distante tra loro di più di $1/10$ di secondo risultando quindi come due suoni distinti. In questo caso si parla di **eco**.

In uno **spazio chiuso** ampio come ad esempio una chiesa, a seguito di un suono secco si possono udire le innumerevoli riflessioni delle estese pareti che decrescono di intensità fino al silenzio. La riverberazione dipende dalla dimensione dell'ambiente e dalla natura delle pareti investite dal suono.

Materiali diversi hanno coefficienti di assorbimento diversi.

Inoltre, le riflessioni su pareti di tipo diverso hanno intensità diverse a frequenze diverse.

Riverberi Artificiali

Il riverbero viene ricreato artificialmente per essere applicato durante spettacoli musicali o in studio di registrazione alla voce ed agli strumenti musicali per simulare esecuzioni musicali in spazi ampi o per conferire maggiore profondità ad un suono. Per simulare l'effetto del riverbero sono state implementate soluzioni diverse nel tempo, beneficiando del progresso tecnologico.

Riverbero a nastro

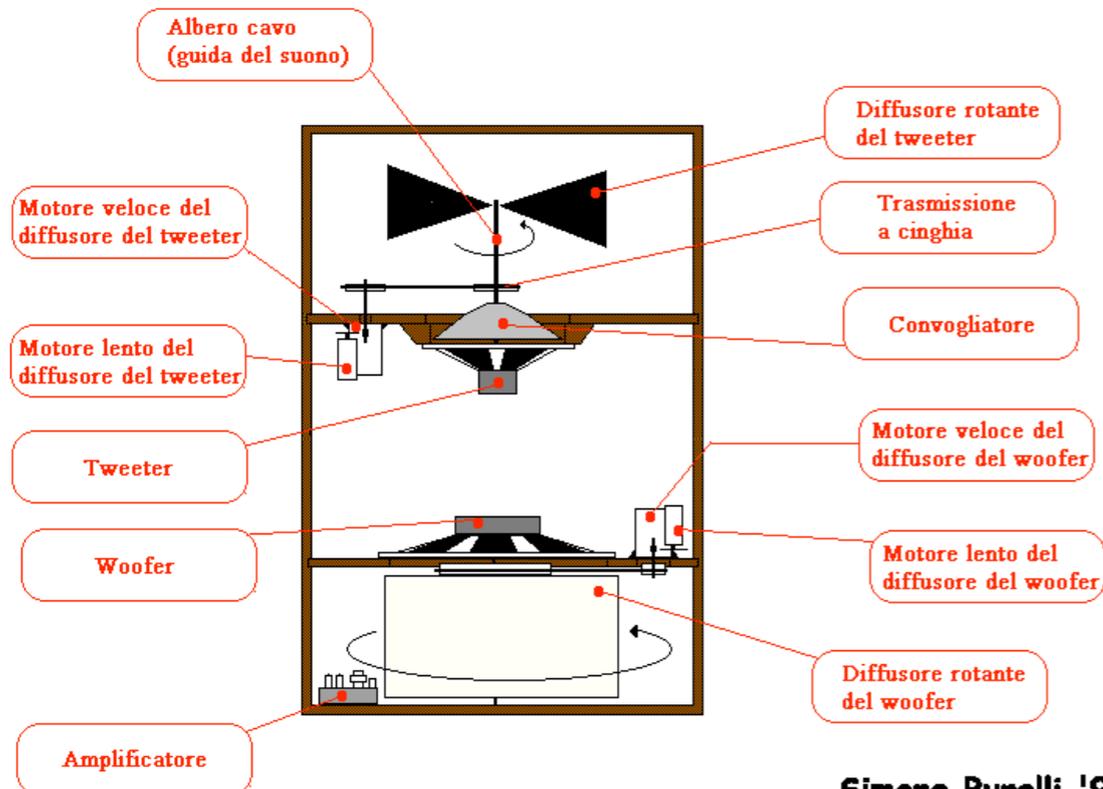
Si utilizza un particolare registratore/riproduttore a nastro magnetico che fa scorrere a velocità costante un anello di nastro dentro una meccanica dotata di una testina di registrazione fissa e di una di riproduzione mobile. La testina di riproduzione è infatti montata su un meccanismo a vite che permette di variarne la distanza da quella di registrazione. Il segnale registrato dalla prima testina viene letto dalla seconda e miscelato all'originale generando l'effetto. Il tempo di ritardo dipende dalla distanza tra le due testine e permette di generare sia l'effetto riverbero che l'eco. Questi apparecchi sono ingombranti e pesanti. Come in ogni registrazione a nastro, lo scorrimento dello stesso genera un fruscio che peggiora notevolmente la qualità del suono.



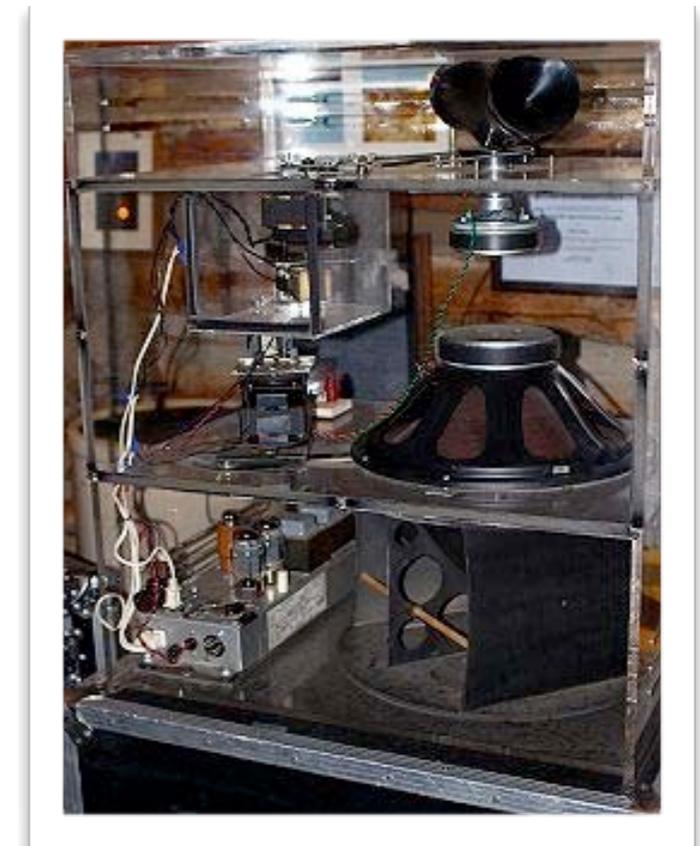
Riverbero a tromba

Sull'albero di un motore elettrico a velocità variabile vengono montati, sfasati tra loro di 180° , due microfoni inseriti in contenitori conici (le "trombe", appunto) che ne aumentano la direzionalità schermandoli parzialmente dai rumori esterni. Il tutto è inserito in una cassa acustica nella quale un altoparlante, montato all'altezza dei microfoni rotanti, trasmette il suono che si vuole ritardare.

Ruotando, i microfoni passano davanti all'altoparlante captando il suono e trasmettendolo al circuito di amplificazione. Il ritardo ottenuto è inversamente proporzionale alla velocità di rotazione del motore (regolabile dall'utilizzatore) e permette di ottenere riverbero, eco e **Leslie** (particolare effetto ottenuto dalla combinazione di ritardo e sfasamento delle frequenze dovuto all'effetto Doppler). I riverberi a tromba sono ingombranti e pesanti. La qualità del suono dipende dalla bontà della componentistica (microfoni e altoparlanti) ma è comunque influenzata negativamente dal rumore generato per attriti meccanici dal motore e dal rumore esterno captato dai microfoni. L'effetto Leslie si può oggi ottenere più agevolmente con un circuito di sfasamento "a pettine" creato con amplificatori operazionali, meglio conosciuto con il nome commerciale di Phaser.



Simone Buralli '97



Riverbero a molla

Il segnale viene fatto passare, tramite un apposito trasduttore attraverso una spirale metallica (appunto, una molla). All'altro capo della molla un trasduttore equivalente al primo reimmette il segnale nel circuito di amplificazione miscelandolo a quello originale. Il segnale prelevato dal secondo trasduttore risulterà leggermente ritardato rispetto a quello applicato al primo originando nell'orecchio dell'ascoltatore l'effetto del riverbero. Per ragioni di semplicità costruttiva ed esiguità di costi i moderni amplificatori per chitarra di piccole dimensioni sono spesso dotati di riverbero a molla, che viene alloggiato all'interno della cassa di risonanza. A differenza di altri strumenti, il suono della chitarra elettrica non risente particolarmente delle sfumature timbriche che questo tipo di effetto aggiunge al segnale originale.

Il funzionamento del riverbero a molla è basato sulla trasmissione del movimento applicato ad un capo della molla tramite l'apposito trasduttore che converte il segnale elettrico in un segnale meccanico. La molla vibrerà trasmettendo il segnale meccanico attraverso le spire impiegando un certo tempo. All'altro capo della molla il segnale giungerà quindi in leggero ritardo rispetto al capo di ingresso della molla stessa e verrà riconvertito in segnale elettrico con un apposito trasduttore, solitamente realizzato tramite un nucleo ferromagnetico intimamente fissato al capo finale della molla ed immerso in un solenoide. Grazie alla legge di Faraday il movimento del nucleo magnetico posto all'interno del conduttore diverrà un segnale elettrico.

Purtroppo il tempo di ritardo del sistema è stabilito a priori dalla lunghezza della molla e dunque non è modificabile dall'utilizzatore. Anche adottando molle di grande lunghezza, il massimo ritardo ottenibile è nell'ordine dei millisecondi, quindi non è possibile generare l'effetto eco ma solo un riverbero accettabile. Se accidentalmente la scatola a molle viene scossa, i trasduttori captano il rumore delle molle che sbattono tra loro e contro le pareti della scatola stessa inviandolo al circuito di amplificazione.

Riverbero a camera

Sulla falsariga del riverbero a molla, in una scatola isolata acusticamente dall'esterno viene inserito un tubo curvato in maniera da creare il percorso più lungo possibile. Ad un'estremità del tubo viene posto un piccolo altoparlante mentre all'altra estremità c'è un microfono. Il suono emesso dall'altoparlante impiegherà un certo tempo per percorrere tutto il tubo ed arrivare al microfono generando così il ritardo necessario. Come per il riverbero a molle, il tempo di ritardo non è modificabile dall'utilizzatore ed è comunque piuttosto breve. Il suono ottenuto da questa implementazione di riverbero è di pessima qualità.

Riverbero digitale

Il segnale analogico viene digitalizzato ed immagazzinato in banchi di memoria RAM che viene utilizzata come la spirale metallica del riverbero a molla. Infatti i bytes vengono fatti "scorrere" da un banco al successivo fino al raggiungimento dell'ultimo. Il segnale digitale prelevato dall'ultima memoria viene poi riconvertito in analogico e miscelato al segnale originale ottenendo l'effetto riverbero. Il tempo di ritardo ottenibile varia agendo sia sul numero di memorie coinvolte nel processo, sia sulla temporizzazione del trasferimento dei dati da un banco all'altro. La grande capacità delle memorie RAM permette di raggiungere anche ritardi di parecchi secondi e quindi passare agevolmente da riverbero a eco. Esistono sul mercato circuiti integrati che comprendono i convertitori A/D e D/A, le memorie ed i circuiti di temporizzazione. Con un solo chip è così possibile realizzare un eco digitale in uno spazio ridottissimo e con pochissima componentistica esterna. La digitalizzazione del segnale e la sua successiva riconversione in forma analogica causano tuttavia una certa perdita di qualità del suono che dipende dalla bontà del campionamento, ma che non è completamente eliminabile. Molto diffusi anche i circuiti integrati detti 'bucket brigade' (catena di secchi) che non operano al loro interno una conversione da analogico a digitale e viceversa, ma sono formati da tantissime celle a condensatore che si caricano in sequenza con il valore di tensione campionato ad istanti regolari, analogicamente. Il valore della carica viene passato da un condensatore all'altro (da qui il nome di catena di secchi) fino a raggiungere l'uscita, impiegando un determinato tempo che sarà il ritardo desiderato.

Tempo di riverberazione

RT60 è il tempo necessario alle riflessioni di un suono diretto, di decadere di 60 dB sotto il livello del suono diretto stesso.

Il tempo di riverberazione (**reverberation time**) è definito per i segnali a banda larga. Quando parliamo del decadimento di una singola frequenza, viene usato il termine termine di decadimento (**decay time**).

Nel tardo XIX secolo **Sabine** cominciò a fare alcune esperienze all'università di Harvard per studiare l'impatto dell'assorbimento sul tempo di riverbero.

Usando un windchest (camera d'aria?) portabile e alcuni tubi d'organo come sorgenti sonore, un cronometro e le sue orecchie nude, lui misurò il tempo tra l'interruzione della sorgente al momento dell'inudibilità (rozzamento attorno ai 60dB). Trovò che il tempo di riverbero è proporzionale alle dimensioni della stanza e inversamente proporzionale all'ammontare dell'assorbimento presente.

Il tempo di riverberazione ottimo per uno spazio dove dev'essere suonata musica, dipende dalla grandezza della stanza e dipende da cosa dev'essere prodotto nello spazio.

Le stanze per il parlato hanno bisogno di un tempo di riverberazione più corto che quelle per la musica dato che un tempo di riverberazione più lungo può dare difficoltà nel riconoscere le parole.

Se il tempo di riverberazione da una sillaba raggiunge la sillaba successiva può essere difficile identificare la parola. Parole come **cat cab** e **cap** possono suonare molto simili.

Se d'altra parte il tempo di riverberazione è troppo corto, il bilancio tonale e l'intensità ne possono soffrire. Gli effetti di riverberazione sono spesso usati negli studi per rendere il suono più piacevole.

I fattori di base che possono influenzare il tempo di riverberazione di una stanza sono le dimensioni e la forma della stanza stessa, i materiali edili e anche ogni oggetto posto all'interno di essa, comprese le persone.

Equazione di Sabine

L'equazione di Sabine sulla riverberazione fu sviluppata attorno al 1890 con metodi empirici. Egli stabilì una relazione tra l'RT60 di una stanza, il suo volume e il suo totale assorbimento (che si misura in Sabine). Questo è dato dalla equazione:

$$RT_{60} = \frac{c \cdot V}{Sa}$$

dove c è una costante ($c = 0.161$), V è il volume della stanza m^3 , S la superficie totale della stanza in m^2 , a è il coefficiente di assorbimento medio delle superfici della stanza, e quindi Sa è l'assorbimento totale in Sabine.

L'assorbimento totale in Sabine (e quindi il tempo di riverberazione) generalmente dipende dalla frequenza e dal fatto che l'equazione non tiene conto di forma e dimensioni della stanza, né delle perdite del percorso del suono attraverso l'aria (importanti per spazi larghi).

In generale la maggior parte delle stanze assorbono meno nelle basse frequenze causando un lungo tempo di decadimento.

Assorbimento

Il coefficiente di assorbimento di un materiale è un numero adimensionale tra 0 ed 1 che indica il rapporto tra suono assorbito e riflesso dalla superficie nella stanza.

Una finestra grande e aperta completamente non dovrebbe offrire nessuna riflessione per i suoni. Questa potrebbe avere un coefficiente di assorbimento di 1, invece, un soffitto liscio dipinto potrebbe essere acusticamente equivalente ad uno specchio e dovrebbe avere un coefficiente di riflessione vicino allo 0.

Misura del tempo di riverberazione

Storicamente il tempo di riverberazione si poteva misurare soltanto usando un level recorder (un dispositivo che graficava il livello del rumore in funzione del tempo su un nastro di carta).

Si produceva un rumore altissimo e quando il suono scemava il level recorder scriveva una curva caratteristica. L'analisi di questa curva rivelava la misura del tempo di riverberazione.

Ora alcuni misuratori di livello sonoro moderni e digitali, possono fare queste analisi automaticamente.

Ci sono due metodi di base per creare un rumore sufficientemente alto (che deve avere un preciso momento di fine). Sorgenti di rumori ad impulsi come uno sparo di una pistola a salve, uno scoppio di un pallone, possono essere usati per la misura della risposta agli impulsi in una stanza.

Altrimenti un segnale di rumore casuale come il rumore rosa, o il rumore bianco, può essere generato attraverso gli altoparlanti, e poi fatto finire. Questo metodo è conosciuto come "interrupted method" e il risultato di misura è l'"interrupted response".

<http://www.trinitysoundcompany.com/rt60.html>

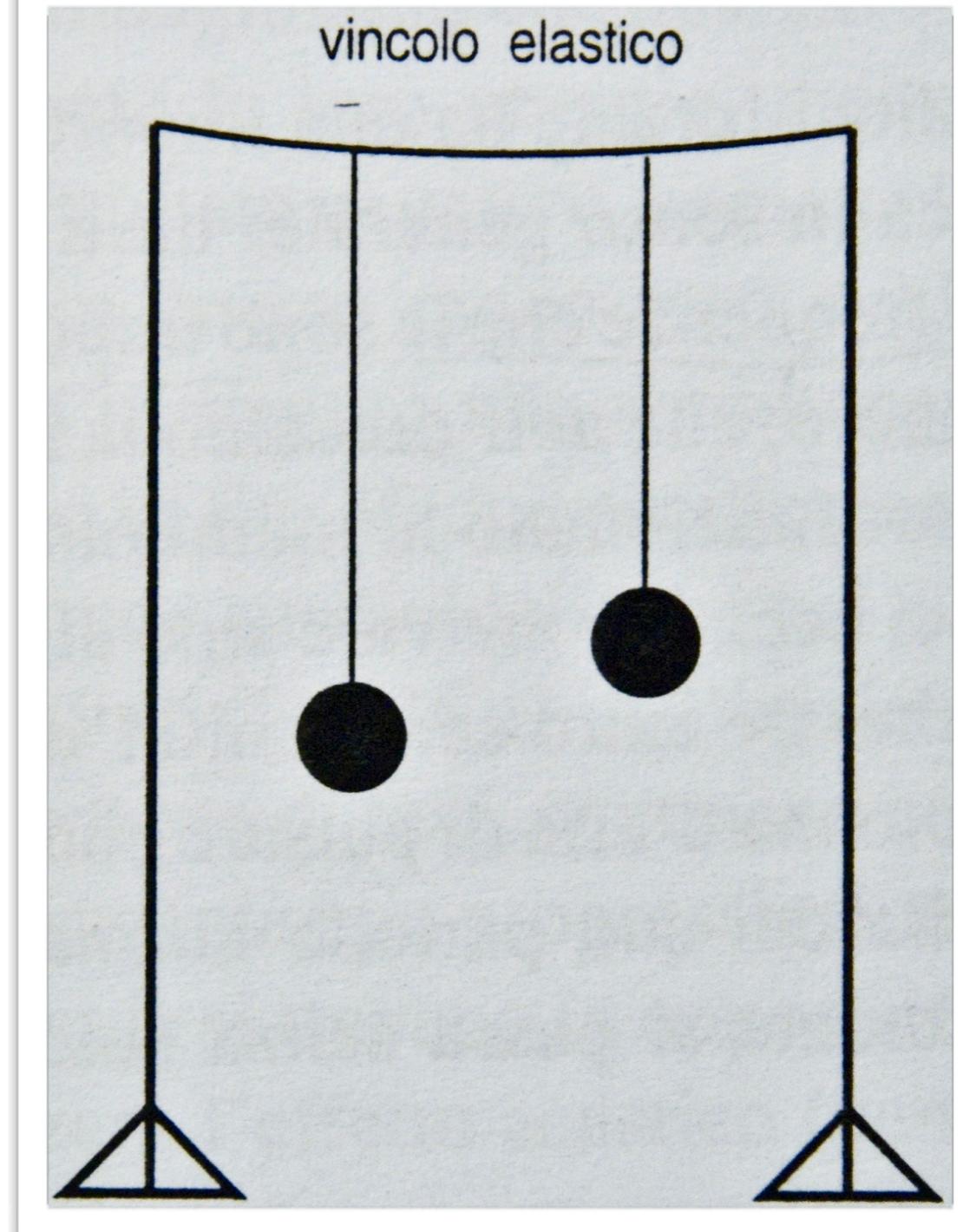
Oscillazioni Forzate

Per arrivare alla risonanza la via migliore è quella delle oscillazioni forzate.

Si tratta di una specie di trascinamento che le vibrazioni prodotte da un corpo elastico possono imporre a un altro qualora concorrano determinate condizioni, che spiegheremo ricorrendo di nuovo all'esempio dei due pendoli accoppiati mediante un vincolo elastico, che questa volta saranno però di lunghezza moderatamente diversa, così come può indicare la figura:

Sappiamo che è dalla lunghezza del pendolo che dipende la frequenza dell'oscillazione (isocronismo), per cui nel caso esemplificato si avranno periodi di durata un po' diversa.

Facendo oscillare uno dei due pendoli, con le stesse modalità spiegate a proposito della "trasmissione di energia per onde", si avrà un fenomeno identico come natura, ma di ampiezza un po' ridotta poiché il trasporto dell'energia avviene con minore spontaneità, in conseguenza, appunto, della diversa durata dei due periodi. Ma la cosa più interessante è che il pendolo "trasmittente" tende ad imporre la sua frequenza all'altro, senza tuttavia riuscirci completamente. Le oscillazioni del pendolo "trasmittente", pur diminuendo in una certa misura di ampiezza, non arriveranno mai al punto di fermarsi, mentre quelle del pendolo "ricevente", pur aumentando un po' di ampiezza subito dopo aver iniziato il movimento, e tendendo a sintonizzarsi con quelle del pendolo trasmittente, non arriveranno mai allo scambio totale di energia e alla identità di periodo che abbiamo visto nel caso precedente, quando l'esperimento era fatto da due pendoli di uguale lunghezza.



Lo stesso numero di queste oscillazioni è piuttosto ridotto. Insomma: vi è uno scambio **forzato** di energia, limitato però dalla resistenza dovuta alla differenza durata dei due periodi naturali. Fatta salva la diversa natura delle vibrazioni, l'esempio è valido anche per i fenomeni acustici, per cui il fenomeno può definirsi così:

un corpo elastico può essere costretto a vibrare con frequenza moderatamente impropria, per l'azione di una forza esterna che sia di periodo moderatamente diverso.

Il fenomeno delle oscillazioni forzate ha una importanza eccezionale nella pratica musicale, e in acustica in senso generale: basti pensare che l'aria che conduce il suono vibra con le frequenze che le sono imposte dalle innumerevoli sorgenti del nostro mondo sonoro; che nell'orecchio la membrana del timpano fa la stessa cosa; come del pari funzionano le membrane degli altoparlanti, le lamine dei ricevitori telefonici etc, per arrivare sino al caso degli strumenti a fiato, dove il suonatore può alterare entro certi limiti l'intonazione del proprio strumento, imponendo alla colonna d'aria di pulsare con una frequenza prossima, ma non identica, a quella del suo periodo normale di pulsazione. Dal fenomeno delle vibrazioni forzate si passa senza soluzione di continuità a quello della risonanza.

Risonanza



Questa volta l'esemplificazione la facciamo con uno strumento musicale, supponiamo, il **corno**. Immaginiamo di aver accertato nel migliore dei modi possibili che lo strumento sia idoneo a dare il FA3 di 350 Hz, che l'ottava armonica del normale corno in FA. Invitiamo quindi il cornista a forzare l'altezza del suono in modo che questo riesca il più crescente possibile, senza tuttavia passare all'armonica seguente, il SOL3. Se il cornista è abbastanza abile, riuscirà certamente a ottenere un FA3 crescente di un buon quarto di tono, ma di timbro aspro e di intensità molto modesta. Siamo in pieno regime di oscillazioni forzate, e le caratteristiche negative dell'intensità e del timbro denunciano chiaramente il "braccio di ferro" che si sta svolgendo tra la forzatura imposta dal suonatore e la resistenza opposta dal periodo naturale di pulsazione della colonna d'aria.

Diciamo quindi al cornista di diminuire gradualmente la forzatura, sino a riportare al giusto sincronismo gli impulsi della eccitazione.

Man mano che ciò avviene si nota che il suono riprende poco a poco le sue caratteristiche, raggiungendo il risultato più soddisfacente a normalizzazione avvenuta.

A questo punto siamo passati dalle **oscillazioni forzate** al **regime naturale di risonanza** della colonna d'aria.

Se osserviamo il movimento ondulatorio di un'altalena possiamo capire meglio come si svolga questo fenomeno. Nell'altalena, gli impulsi impressi dalla persona che ci sta sopra devono essere sincronizzati col periodo naturale di oscillazione del sistema: il moto ottenuto col primo impulsi non si è ancora esaurito, quando deve arrivare con regolare tempismo il secondo impulso, che farà aumentare di poco l'ampiezza della oscillazione, poi arriverà con la stessa norma il terzo impulso, quindi il quarto etc, con una sommatoria di tanti apporti energetici che, al limite, potrebbero persino provocare la rottura del sistema.

Per fenomeni di risonanza possono infatti darsi effetti meccanici anche imponenti: un ponte sospeso, come quelli che talvolta son gettati per cause contingenti tra una riva e l'altra di un torrente, può senz'altro cedere sotto il passo cadenzato di una fila di persone che lo attraversi: ogni passo aggiunge un po' di energia e se il periodo di oscillazione del ponte coincide con la cadenza, si ha appunto un accumularsi di forza e un conseguente aumento di ampiezza delle oscillazioni che a un certo momento possono determinare la rottura del ponte.

Nella pratica musicale sono molti i casi, oltre a quelli degli strumenti a fiato, in cui il fenomeno della risonanza viene sfruttato a favore del risultato acustico: citiamo il caso del pianoforte, dove la tavola di risonanza esalta grandemente la qualità e l'intensità del suono: si può anzi dire che senza questo sistema, anche il suono emesso da una corda tra quelle che nel pianoforte possono raggiungere intensità sonore veramente notevoli, se viene tesa fra punti rigidi in piena aria, emetterà un suono di intensità enormemente minore, senza poi considerare la perdita qualitativa a carico del timbro.

Ogni strumento musicale ha un **risonatore** e **risonatori** sono pure quei **cilindri cavi** che si mettono sotto i regoli della marimba, della celeste, dello xilofono e di altri strumenti, per **aumentare l'intensità del suono e migliorare la qualità del timbro**.

La risonanza non ha nulla a che vedere con la riflessione delle onde sonore e con la riverberazione in generale, in quanto consiste nella **facoltà da parte di un corpo elastico di convibrare con spontaneità quando viene eccitato da vibrazioni esterne la cui frequenza coincide con il suo naturale periodo di vibrazione**.

Archi: risonatori o accoppiatori?

E' controverso se gli strumenti ad arco debbano essere considerati solo **risonatori** oppure anche **“accoppiatori”**.

La differenza tra risonatore e accoppiatore è che il primo partecipa con spontaneità al fenomeno della risonanza, il secondo invece trasmette le vibrazioni da un mezzo all'altro, come in una catena perfettamente solidale. Questo sembra essere il caso degli strumenti ad arco, dove l'anima, che è un cilindretto di legno inserito verticalmente tra la tavola e il fondo, ha l'ufficio di rendere meccanicamente solidali questi due piani, i quali pertanto vibrano in concordanza di fase, muovendosi contemporaneamente nello stesso senso.

Le vibrazioni si trasmettono dalla corda al ponticello, da questo alla tavola e quindi, attraverso l'anima, al fondo, formando un sistema ininterrotto di accoppiamenti al quale è vincolata pure la massa d'aria contenuta nello strumento.

Pur accettando di considerare gli strumenti ad arco anche come accoppiatori, dobbiamo dare pieno rilievo alla risonanza perché è da essa che dipende principalmente la qualità del suono.

Risonatori di Helmholtz

Il risonatore di Helmholtz o “globo di risonanza” è una sfera vuota in ottone sottile con aperture alle due estremità opposte. Il foro più grande riceve il suono, mentre il più piccolo si adatta all’orecchio. L’aria nel globo ha una propria nota fondamentale dipendente dalla dimensione del globo. I risonatori permettevano di analizzare i suoni nelle loro frequenze costitutive e furono uno strumento fondamentale per la teoria della musica. Helmholtz riuscì a riprodurre un suono determinato combinando i suoni componenti evidenziati dai suoi risonatori.

Quando dell'aria in eccesso viene forzata attraverso una cavità, la pressione all'interno della stessa aumenta. Una volta che la forza esterna che ha causato la forzatura dell'aria cessa, l'aria a maggior pressione presente all'interno della cavità tenderà a fuoriuscire dallo stesso punto da cui era entrata.

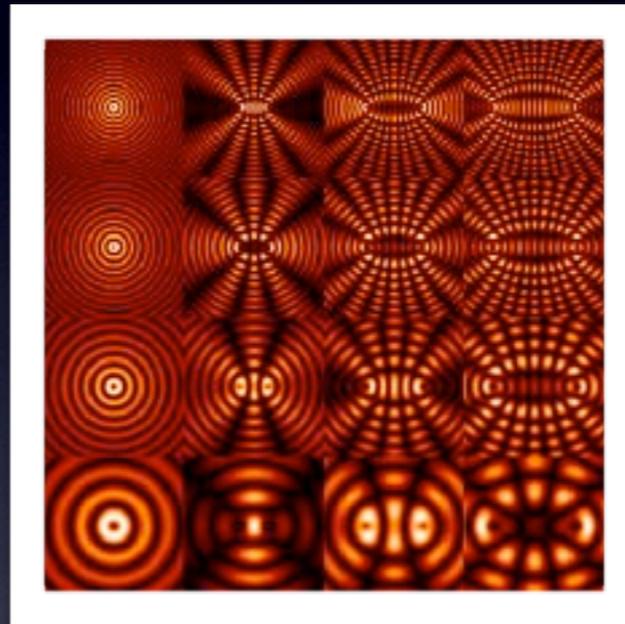
Comunque, questo flusso di aria in uscita tenderà a sovracompendere, e la cavità rimarrà ad una pressione leggermente inferiore a quella esterna, provocando un risucchio d'aria. Questo processo si ripete con intensità decrescente della sovracompendazione, fino a smorzarsi.



La risonanza di Helmholtz trova applicazione nei motori a combustione interna (air-box), nei subwoofer e nell'acustica.



Interferenza



Interferenza: da intervenire, interporre, mettere di mezzo.

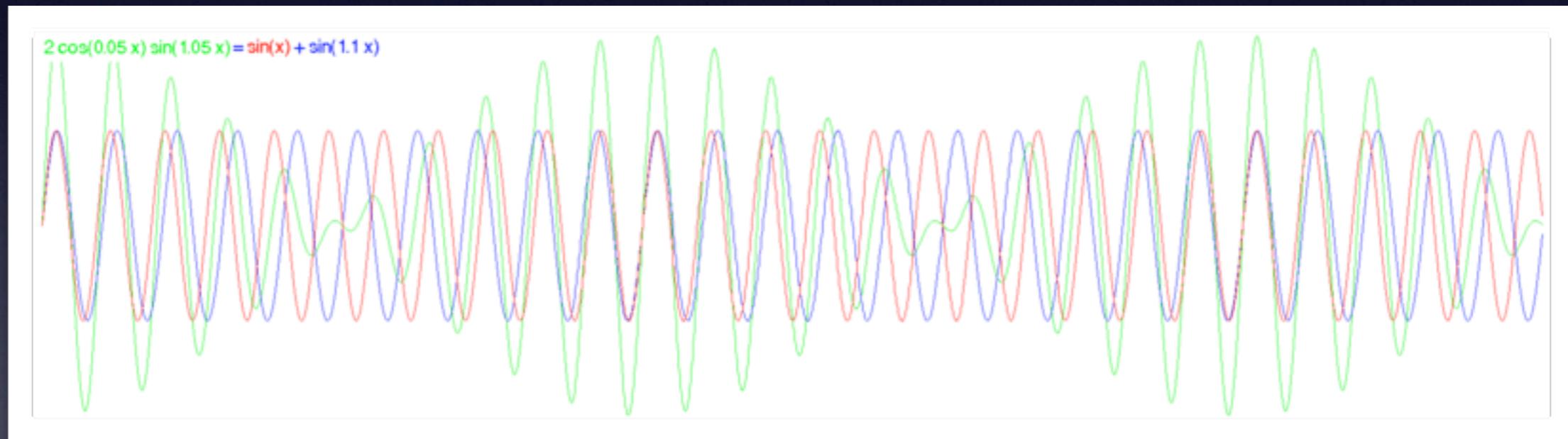
Non ha significato pregiudizionalmente negativo e in acustica indica la coesistenza in uno stesso punto dello spazio, o del sistema vibrante, di più onde o vibrazioni, le quali agendo contemporaneamente sul mezzo che le ospita sommano algebricamente le rispettive energie.

Ciò vuol dire che se nel luogo d'interferenza le onde si incontrano in concordanza di fase, esse sommano positivamente le rispettive energie, con conseguente aumento dell'intensità del suono. Se invece gli incontri avvengono in opposizione di fase, la sommatoria delle energie è negativa, come, per esempio, può dirsi di un credito che compensa in toto o parzialmente un debito: cosa da cui in acustica consegue una proporzionale attenuazione dell'intensità.

E' intuitivo che le combinazioni e gli effetti possono essere innumerevoli. Nella pratica musicale si può dire che ogni combinazione di suoni strumentali o vocali, semplice o complessa che sia, risente del modo in cui le varie componenti interferiscono fra di loro: basti dire che qualsiasi forma d'onda, emblema significativo del timbro e dell'agglomerato sonoro, dipende dalla interferenza delle onde coesistenti nel modo vibratorio delle varie sorgenti sonore e nella propagazione ondulatoria del suono.

L'interferenza è causa anche di particolari fenomeni che ora considereremo...

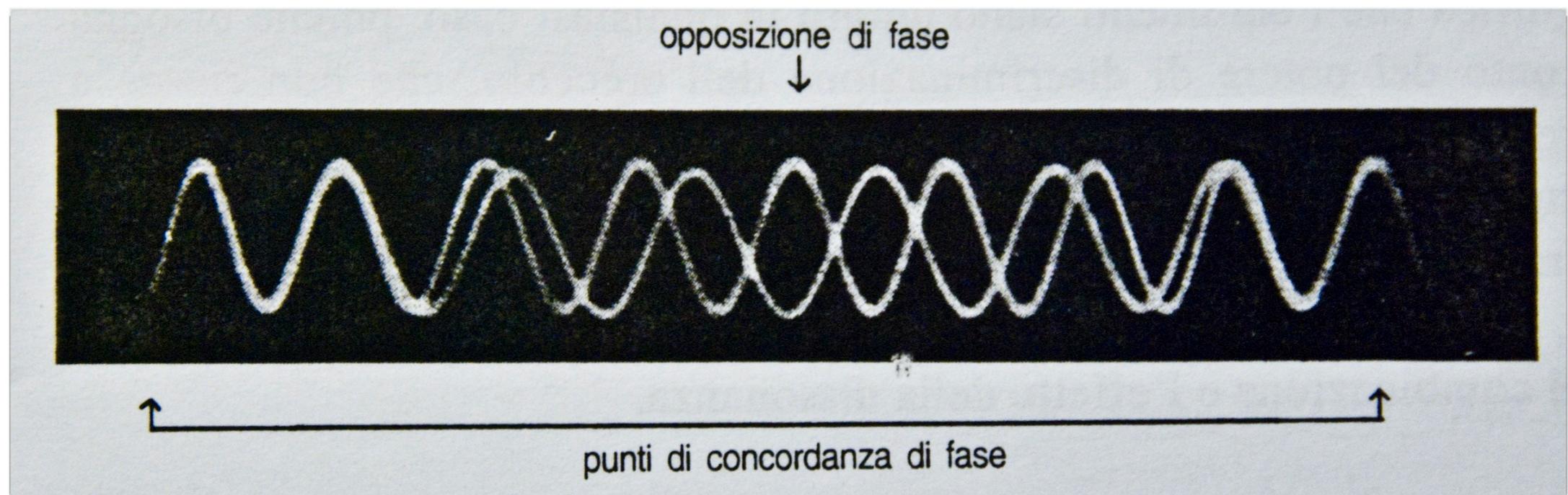
Suoni simultanei e battimenti



Nella teoria musicale e, più specificatamente, in quella del suono, si parla di **battimenti** in riferimento all'effetto per l'orecchio umano di **due onde sonore**, pure posizionate vicine tra di loro, e di **frequenza molto vicina**, sempre tra di loro.

Entrando più in dettaglio, conviene fare qualche esempio. Prendiamo una chitarra (elettrica, in modo che il suono duri più a lungo), e suoniamo ad esempio le due corde più alte, il si e il mi. Il nostro orecchio sente le due note distintamente, e si accorge che il suono complessivo è anche piacevole all'orecchio. Supponiamo ora di cominciare a tendere sempre di più la corda del si, per alzarne la frequenza e arrivare al mi. Ammesso che la corda non si spacchi prima per la troppa tensione, per un po' continueremo a sentire due suoni più o meno armonici. Quando le due corde avranno la stessa frequenza, sentiremo naturalmente un solo suono; ma subito prima ci sarà uno strano effetto: cominceremo a sentire un solo suono, ma il suo volume ci sembrerà cambiare nel tempo, ora più forte e ora più piano.

La ragione di questo comportamento è legata all'acustica, e alla **incapacità del nostro orecchio a distinguere due frequenze molto più vicine tra di loro, che vengono in un certo senso "unificate"**. Se però facciamo un grafico che mostra la funzione corrispondente al suono complessivo delle due corde, possiamo notare come i massimi e i minimi delle creste d'onda non sono più costanti come quando viene suonata una nota pura, ma variano nel tempo: quando le due onde sono quasi in opposizione, i massimi di una cancellano i minimi dell'altra, mentre quando sono quasi in fase i massimi si sommano, aumentando il volume percepito.

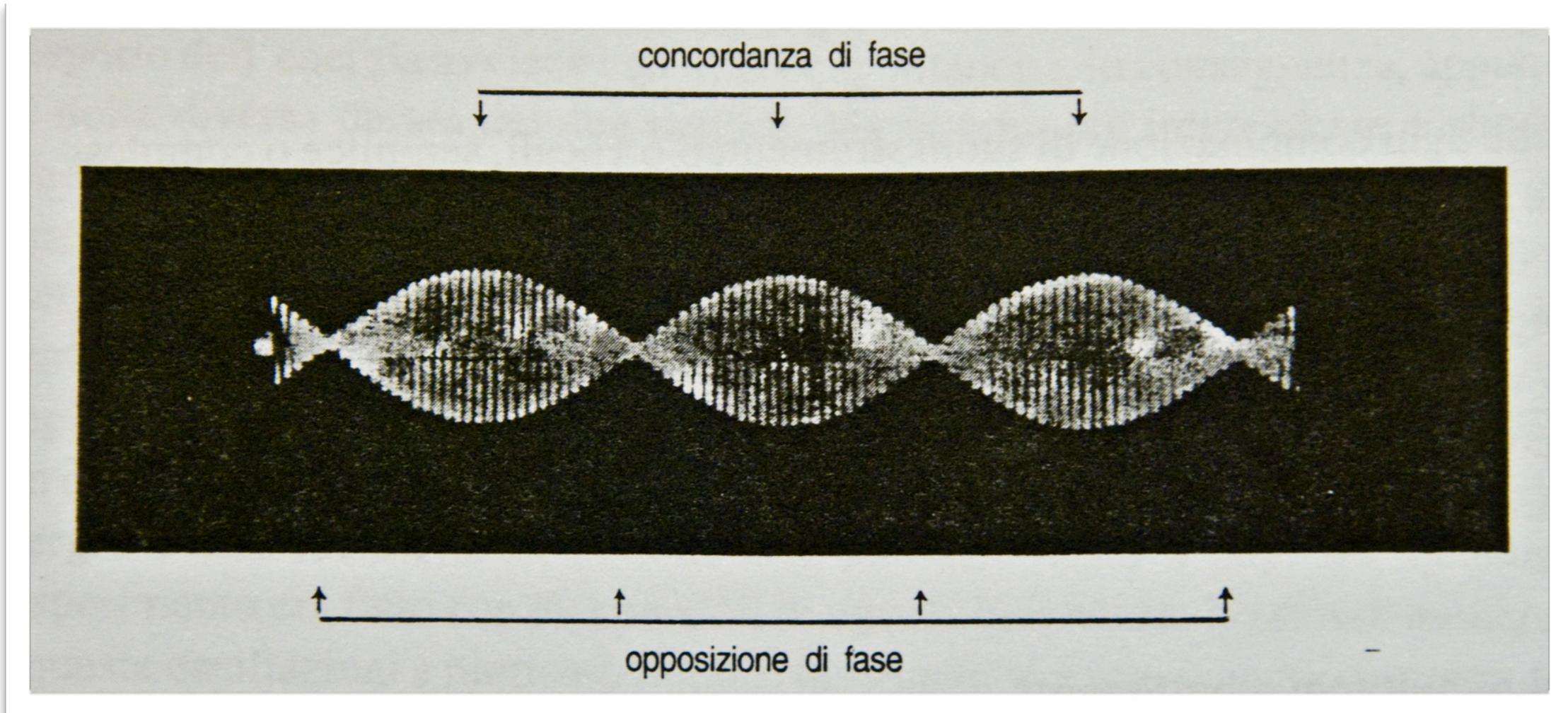


Vediamo nella figura sopra due oscillogrammi, uno dei quali riproduce la coesistenza di due onde sinusoidali, che nel medesimo tempo compiono rispettivamente 8 e 9 periodi.

All'inizio di questo ciclo di periodi le onde, che sono in concordanza di fase, sommano con effetto positivo le loro energie: poi una di esse si avvantaggia progressivamente sull'altra, così che, a un certo momento, le due onde si trovano in opposizione di fase, ed essendo di pari ampiezza riducono a zero l'effetto acustico (punto centrale in figura).

Ma poi il vantaggio dell'onda di frequenza superiore aumenta ancora, fintanto che verrà a ripristinarsi la concordanza di fase.

Nei punti di concordanza il suono si rinforza, mentre in quelli di opposizione si attenua. Da questo periodico alternarsi di rinforzi e di affievolimenti risulta una fluttuazione dell'intensità, che, appunto per questa sua caratteristica, prende il nome di "battimento".



Nella figura qui sopra è riprodotto l'oscillogramma della fluttuazione di ampiezza dovuta a battimento fra due onde sinusoidali.

Quando i battimenti sono 5 o 6 al secondo, l'effetto può essere anche gradevole e conferire al suono una predoespressività, che i costruttori d'organi hanno sempre usato disponendo nello strumento uno speciale registro, chiamato **unda maris** oppure **voce celeste**, etc, quasi a voler compensare con la suggestività del nome la materialità della causa alla quale il fatto è dovuto.

I battimenti sono di effetto sgradevole quando avvengono fra suoni molto gravi e sono di scarso effetto nelle ottave molto alte. La fascia di frequenze più adatta per usare i battimenti come fattore di artificiale espressività del suono è compresa, grosso modo, tra i 150 e i 1500 Hz.

La frequenza dei battimenti dipende sempre dalla differenza che intercorre tra le frequenze battenti: ad esempio, se i suoni sono rispettivamente di 500 e 550 periodi, i battimenti avranno la frequenza di 50 al secondo, e così via.

Ciò non significa che i battimenti siano udibili in qualsiasi caso, poiché bisogna tener conto del potere di discriminazione dell'orecchio, che non riesce a separare gli impulsi acustici quando questi siano più di 16-20 al secondo, nonché di altri fattori, come la tessitura in cui si trovano i suoni principali, l'intensità dei medesimi, etc.

Oltre alla fluttuazione del suono, della quale abbiamo or ora parlato, i battimenti possono dar luogo ad altri importanti fenomeni, come i **suoni di combinazione** e l'**effetto della dissonanza**.

Suoni di combinazione



L'organista **Sorge** notava, nel 1740, che in coincidenza di un bicordo di quinta giusta, che egli stava suonando sul suo strumento, appariva un suono estraneo, di tessitura più grave.

Indipendentemente dalle osservazioni del Sorge, il grande violinista **Giuseppe Tartini** pubblicava nel 1754 (Padova) il “**Trattato di musica secondo la vera scienza dell'armonia**”, dove tra l'altro introduceva la teoria del “**terzo suono**”, da lui scoperto sin dal 1714 in circostanze analoghe a quella del Sorge, con la sola differenza che Tartini fece la scoperta sui suoni del violino.

Nel 1714 Tartini aveva solo 22 anni ed è nota la sua vita piuttosto movimentata, sicché solo in età più matura poté esporre in un libro la sua teoria.

A parte ogni discussione sulla priorità della scoperta, rimane il fatto che Tartini seppe trarre quelle deduzioni che gli consentirono di formulare una teoria, il cui punto fondamentale è che il terzo suono ha una frequenza pari a quella del battimento, ossia uguale alla differenza che intercorre tra le frequenze dei due suoni generatori: se essi sono, supponiamo, di 240 e 160 periodi, il “suono differenziale” (questo è il nome scientifico del terzo suono) sarà di 80 Hz, e così via per ogni altro caso.

Quando tra i suoni principali intercorre un rapporto armonico, anche il suono differenziale appartiene alla serie stessa, tanto che dal numero d'ordine delle armoniche generatrici, con una semplice sottrazione, si può conoscere quello del suono differenziale.

esempio: se i suoni generatori, o principali, che dir si voglia, sono le armoniche 24 e 16, il differenziale sarà l'armonica 8, etc

Nel bicordo tartiniano i suoni principali sono le armoniche 2 e 3, per cui il terzo suono è l'armonica 1, ossia la fondamentale della serie. Anche questo è un punto importante della teoria di Tartini sull'armonia, da lui considerata, in senso quasi oggettivo, come scienza vera e propria, forse più che come fatto estetico musicale.

Giuseppe Tartini (Pirano, 12 aprile 1692 – Padova, 26 febbraio 1770) è stato un violinista e compositore italiano, autore della celebre sonata per violino in sol minore Il Trillo del Diavolo.

L'aneddoto che ha dato luogo alla sonata il trillo del diavolo, è così raccontato da Tartini stesso al celebre astronomo Delalande:

« Una notte (1713) sognai che avevo fatto un patto e che il diavolo era al mio servizio. Tutto mi riusciva secondo i miei desideri e le mie volontà erano sempre esaudite dal mio nuovo domestico. Immaginai di dargli il mio violino per vedere se fosse arrivato a suonarmi qualche bella aria, ma quale fu il mio stupore quando ascoltai una sonata così singolare e bella, eseguita con tanta superiorità e intelligenza che non potevo concepire nulla che le stesse al paragone. Provai tanta sorpresa, rapimento e piacere, che mi si mozzò il respiro. Fui svegliato da questa violenta sensazione e presi all'istante il mio violino, nella speranza di ritrovare una parte della musica che avevo appena ascoltato, ma invano. Il brano che composi è, in verità il migliore che abbia mai scritto, ma è talmente al di sotto di quello che m'aveva così emozionato che avrei spaccato in due il mio violino e abbandonato per sempre la musica se mi fosse stato possibile privarmi delle gioie che mi procurava. »

(Giuseppe Tartini)

I suoni di combinazione, la cui conoscenza è andata vieppiù approfondendosi a partire dalla teoria di Tartini, **comprendono non solo i differenziali, ma anche suoni somma più alti dei generatori, nonché altri sempre relativi alle combinazioni che possono darsi non solo tra i suoni principali, ma anche tra questi e i differenziali.**

Ammessa, come devesi, questa possibilità, è evidente che le combinazioni immaginabili possono essere pressoché infinite, almeno da un punto di vista numerale.

In pratica, la realtà è senza dubbio più modesta, pur restando sempre cospicua e complessa.

Ferma restando l'oggettività del fenomeno dei battimenti, dipendente dalle interferenze ora descritte, e l'altrettanto oggettiva loro funzione di stimolazione acustica sull'organo dell'udito, bisogna dire che per ciò che concerne la presenza a livello auditivo dei suoni di combinazione la teoria tende ad accreditarne la causa a fattori riguardanti la fisiologia e la psicologia dell'ascolto.

Non in senso creativo, ma come conseguenza soggettiva dovuta alla stimolazione oggettiva indotta dal fenomeno dei battimenti.

Comunque ciò che più importa è la realtà del fenomeno al livello di ascolto.

Il terzo suono di Tartini

Suonando due note contemporaneamente, l'orecchio percepisce note aggiuntive di varie frequenze pari ad opportune somme e differenze delle due note emesse: si parla in questi casi di suoni di combinazione.

Fra questi il più importante da un punto di vista pratico è il cosiddetto terzo suono di Tartini, scoperto appunto dal Tartini nel '700. Il celebre violinista constatò infatti che suonando un bicordo ad un intervallo di 5a (ovvero con rapporto di frequenze 3:2) si sentiva al basso un'altra nota la cui frequenza corrispondeva a un numero di vibrazioni pari alla differenza fra quelle dei due suoni originari. Così, ad esempio, se un suono aveva 900 vibrazioni e l'altro 600, il suono ulteriore che si sentiva aveva 300 vibrazioni al secondo ed era, quindi, di un'ottava più grave.

Da un punto di vista fisico il fenomeno risulta particolarmente evidente suonando due note ad un intervallo di 5a poiché i prodotti di **intermodulazione** del second'ordine $f_2 - f_1$ e del terz'ordine $2f_1 - f_2$, che sono normalmente **disgiunti**, in questo caso coincidono esattamente **sommandosi**. Il fenomeno dei suoni di combinazione è ormai noto da oltre mezzo secolo nell'elettronica applicata alle telecomunicazioni dove questi vengono denominati "prodotti di intermodulazione": si generano in ogni amplificatore che produce una forte distorsione su due segnali in ingresso, in particolare quindi anche all'interno del nostro orecchio quando questo percepisce due suoni da sorgenti distinte.

Due suoni di frequenza f_1 ed f_2 sommati in un amplificatore ad alta distorsione come il nostro orecchio, producono infatti i prodotti di **intermodulazione** del second'ordine:

$$f_1 + f_2, f_2 - f_1$$

del terz'ordine:

$$2f_1 + f_2, 2f_1 - f_2, 2f_2 + f_1, 2f_2 - f_1$$

e degli ordini successivi; oltre alle armoniche

$$2f_1, 2f_2, 3f_1, 3f_2$$

... multiple delle frequenze fondamentali.

Sono tali frequenze generate all'interno dell'orecchio a produrre i suoni differenza e addizione, i primi a lungo confusi con inesistenti "armonici inferiori" o "ipotoni".

Termini come "ipotoni", "suoni di moltiplicazione", "subarmonici", che si trovano sovente in letteratura non hanno alcun significato in fisica. Il fenomeno dei cosiddetti subarmonici, ad esempio, deriva non tanto da un fenomeno fisico reale, quanto da un errore indotto dall'orecchio quando percepisce due suoni da sorgenti distinte producendo al proprio interno i prodotti di intermodulazione sopra citati.

Applicazioni del terzo suono di Tartini

Il fenomeno del "terzo suono" trova una sua applicazione pratica nella **costruzione degli organi**: invece di costruire canne enormi per frequenza molto basse si creano registri in cui due canne a distanza di quinta suonano contemporaneamente creando l'illusione di un terzo suono più profondo.

Anche il **theremin** sfrutta il battimento tra due frequenze non udibili (nel campo degli ultrasuoni) per ottenere un suono udibile e modulabile cambiando la frequenza di una delle due onde.

I registri di "**Voce umana**" degli organi e molti registri delle fisarmoniche sfruttano il fenomeno dei battimenti per ottenere un suono più caldo ed espressivo. Questi registri fanno suonare contemporaneamente due canne (o anche): una intonata correttamente ed una leggermente calante o crescente, in modo da ottenere un certo numero di oscillazioni di intensità al secondo.



Consonanza e dissonanza

Definizioni di consonanza e dissonanza

Nel linguaggio ordinario con il termine **consonanza** (dal latino consonare, "suonare insieme") si indica in genere un **insieme di suoni eseguiti simultaneamente e tali che l'effetto complessivo risulti morbido e gradevole**, mentre con il termine **dissonanza**, all'opposto, si indica un **agglomerato di suoni dall'effetto aspro e stridente**.

I due termini possono anche indicare non l'insieme dei suoni, ma il loro effetto stesso; si parla, ad esempio, anche di dissonanza prodotta da un certo accordo.

Nel linguaggio tecnico della teoria musicale, e in particolare dell'armonia, le due parole hanno significati ben precisi, e anzi si può dire che la contrapposizione tra consonanza e dissonanza, insieme al principio della tonalità, rappresenta la base della teoria armonica occidentale.

Basi acustiche e fisiologiche

Galileo:

Prima di esporre i principi dell'armonia tonale su consonanze e dissonanze consideriamo i principali risultati conseguiti nel tentativo di interpretare i fenomeni attraverso l'acustica e la fisiologia.

Galileo, nei **Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze**, propone una spiegazione molto semplice dei fenomeni di consonanza e dissonanza. Se consideriamo il segnale costituito dalla sovrapposizione dei due suoni del bicordo, in prima approssimazione la lunghezza del suo periodo sarà tanto minore quanto più il rapporto tra le frequenze fondamentali che costituiscono i due suoni sarà semplice, ossia espresso da una frazione intera con numeratore e denominatore non troppo grandi. Ebbene, l'idea di Galileo è che il grado di consonanza risulti inversamente proporzionale alla lunghezza del periodo del suono complessivo, e analogamente il grado di dissonanza risulti proporzionale a questo periodo. L'orecchio, secondo Galileo, apprezza finemente la maggiore o minore regolarità del suono risultante.

Un'obiezione all'idea di Galileo sorge qualora il rapporto tra le frequenze di due suoni sia irrazionale, ma vicinissimo a una frazione molto semplice. Il suono risultante sarà ovviamente non periodico, il che rappresenterebbe il massimo grado di dissonanza nell'ottica galileiana, ma sarà anche assai prossimo, anzi volendo anche del tutto indistinguibile dall'orecchio, a un suono consonante. Questa obiezione è importante, ma non sarebbe difficile complicare leggermente l'idea galileiana, conservandone il nocciolo, al fine di superarla. Vedremo inoltre che tale idea contiene, nella sua semplicità, anche aspetti molto positivi e profondi.

Helmholtz:

Una **trattazione sperimentale sistematica** dei fenomeni che stiamo considerando è dovuta a **von Helmholtz**.

Egli cominciò a considerare l'effetto di **due suoni puri**, cioè di frequenze ben precise che non danno origine a ipertoni. L'esperimento base di Helmholtz consisteva nell'emettere due suoni puri simultaneamente, di altezza inizialmente uguale, e poi, tenendo fissa la frequenza di uno di essi, far variare l'altra all'interno di un piccolo intervallo simmetrico su scala logaritmica rispetto alla frequenza di partenza.

Si poteva così notare che **i due suoni, per differenze di frequenza molto piccole, producono una consonanza, mentre man mano che la differenza cresce il suono risultante acquista un colore sempre più aspro fino a un certo limite, per poi tornare ad essere gradualmente sempre più consonante.**

L'ampiezza dell'intervallo tra la frequenza di partenza e la fine della zona dissonante era, nella zona di frequenze corrispondente alla parte centrale della tastiera di un pianoforte, leggermente più piccola di una terza minore temperata.

Helmholtz interpretò questi dati immaginando che responsabili della dissonanza fossero i **battimenti**. Poiché essi sono molto lenti quando le frequenze sono molto simili, inizialmente si ha una sensazione generale di consonanza. La massima dissonanza corrisponde alla zona in cui si producono circa 30 battimenti al secondo, mentre per differenze di frequenza ancora superiori i battimenti diventano così rapidi da non essere percettibili, e il loro contributo alla sensazione di dissonanza diminuisce.

L'idea di Helmholtz, in questa forma base, spiega abbastanza bene la fenomenologia relativa ai suoni puri non troppo distanti in frequenza, ma, anche nell'ambito dell'ottava, rimangono dei problemi con i suoni reali dotati di **ipertoni**.

Infatti questi suoni (come ad esempio quelli di un pianoforte) risultano dissonanti, in particolare, anche per il **tritono**, e anzi tanto più dissonanti quanto più il sistema di amplificazione dello strumento usato mette in risalto gli armonici (ad esempio più nel pianoforte che negli archi).

Se, come fece Helmholtz, applichiamo l'idea base sopra descritta, oltre che al suono fondamentale, anche ai suoi armonici più vicini (e quindi maggiormente percettibili), avremo una teoria che spiega abbastanza bene, in prima approssimazione, il fenomeno della **dissonanza del tritono**.

Infatti il primo armonico della nota superiore del tritono e il secondo della fondamentale cadono proprio nella zona in cui i battimenti sono più frequenti. Allo stesso modo si spiega la dissonanza di intervalli come la settima maggiore e la nona minore.

L'applicazione dell'idea fondamentale ai suoni armonici è giustificata dal fatto che il **meccanismo di percezione dei suoni**, come ha dimostrato lo stesso Helmholtz, **effettua un'analisi spettrale molto simile a quella di Fourier, che applicata alle onde sonore corrisponde proprio alla loro analisi armonica**.

I suoni che hanno i **primi armonici simili** e che quindi, secondo la teoria di Helmholtz, sono **consonanti** poiché presentano in genere **battimenti molto lenti** (o molto deboli, perché provocati da armonici molto lontani dai suoni fondamentali), hanno **rapporti di frequenze semplici**, e quindi risultano anche **consonanti secondo la teoria Galileo**, che viene così ad essere non contraddetta, ma inclusa in quella di Helmholtz.

Recenti ricerche sperimentali, integrate da rilevamenti statistici effettuati con la collaborazione di numerosissimi soggetti, hanno permesso di acquisire cognizioni che possono valere come conferma e come completamento della teoria di Helmholtz sulla causa fisica della **dissonanza** (quindi **dovuta ai battimenti fra suoni simultanei, quando la frequenza di battimento rientra in determinati limiti rispetto all'altezza dei suoni generatori**).

La prova che questa causa consiste nei battimenti è abbastanza facile da realizzare: due suoni sinusoidali decisamente dissonanti, come possono esserlo, ad esempio un DO e n DO#, sono generati da due oscillatori distinti e vengono fatti ascoltare attraverso gli auricolari di una cuffia, ai quali i suoni stessi arrivano congiunti. L'effetto di asprezza dovuto alla dissonanza è inequivocabile.

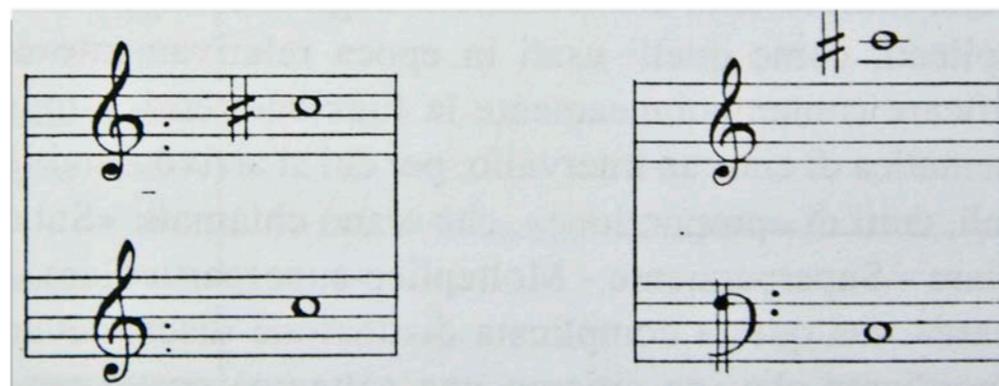
A un certo momento, per mezzo di un apposito commutatore, i suoni vengono separati, in modo che uno arrivi solo all'auricolare di destra e l'altro solo a quello di sinistra. L'effetto dissonante scompare nell'atto medesimo in cui avviene la separazione e i due suoni vengono percepiti come entità indipendenti, mentre contemporaneamente scompaiono anche i battimenti, in quanto la separazione comporta la soppressione dei fenomeni d'interferenza da cui i battimenti stessi dipendono.

Inapprezzabile è l'interconduzione dei suoni per via ossea. Impediti i battimenti cessa la dissonanza. Qualsiasi causa che possa impedire o attenuare i battimenti comporta la cessazione o l'attenuazione della causa fisica della dissonanza, anche se sullo spartito musicale la situazione rimane teoricamente invariata.

Per questa ragione una stessa coppia di note può produrre effetti molto differenziati a seconda dell'intervallo che le separa, così come può esemplificarsi con:

DO#

DO



DO#

DO

Quando poi l'intervallo supera le quattro ottave, si può dire che la dissonanza è praticamente inapprezzabile.

Anche le componenti armoniche del suono influiscono sia sulla consonanza sia sulla dissonanza, ma sempre in funzione dei battimenti a cui possono dare luogo.

Per la medesima ragione due strumenti che suonino l'uno accanto all'altro, ma a un semitono d'intervallo, producono una dissonanza senza confronto più accentuata, di quella a cui darebbero luogo facendo la stessa cosa ai punti opposti di un'orchestra.

Dice Berlioz, riportando nel suo trattato sulla strumentazione un certo giudizio, che per far parlare i mostri e i demoni, basta far suonare fortissimo corni e tromboni nella loro tessitura centrale.

Se si analizza la situazione spettrale di questi suoni, si può vedere che la composizione armonica di quelli emessi dai tromboni contrasta con alcune componenti del suono dei corni, generando intensi battimenti da cui dipende infatti l'effetto così aspro che con combinazioni strumentali di questo tipo è possibile ottenere.

Ecco dunque che il rigore della fisica conferma ancora una volta l'aureo empirismo delle più sperimentate regole musicali.

La teoria armonica tonale

In questa sezione verranno trattati gli aspetti più elementari della **teoria armonica tradizionale** che si occupano di **consonanza** e **dissonanza**. Per maggiore semplicità la trattazione è limitata all'armonia tonale che impiega il **temperamento equabile**, che è anche quella studiata di regola nei corsi dei conservatori, e quella cui è dedicata la maggior parte della trattatistica classica.

Nell'ambito della nona, intervallo in cui con buona approssimazione è contenuta la distanza tra voci adiacenti nella scrittura a parti late, gli intervalli consonanti sono l'unisono, l'ottava, la quarta e la quinta giuste, la terza e la sesta maggiori e minori. Sono invece dissonanti la seconda, la settima e la nona maggiori e minori, (si noterà qui la **coerenza con la teoria di Helmholtz**) e tutti gli intervalli aumentati o diminuiti (che includono il **tritono**, che è una quarta aumentata o una quinta diminuita).

Un accordo è dissonante se contiene un intervallo dissonante; altrimenti è consonante.

Osserviamo esplicitamente che alcuni intervalli, come ad esempio la sesta minore e la quinta aumentata, possono coincidere **enarmonicamente**, e tuttavia risultare l'uno consonante e l'altro dissonante. D'altra parte la funzione armonica di un suono della scala cromatica è il più delle volte deducibile dal contesto, e quindi di regola in un accordo che è parte di una sequenza armonica non ci dovrebbero essere dubbi sull'identità di un suono **enarmonicamente ambiguo**. Esistono naturalmente eccezioni a questa constatazione, la più notevole delle quali è l'**accordo di settima diminuita**, che proprio per questo è assai usato come **mezzo modulante enarmonico**.

In generale **le dissonanze devono essere preparate**; questo vuol dire che uno dei due suoni che producono dissonanza (in generale quello superiore) deve venire sentito, con un valore ritmico almeno pari a quello della dissonanza stessa, nell'accordo che precede quello in cui la dissonanza si verifica, e deve in esso costituire consonanza. **La dissonanza deve inoltre essere risolta**; ciò significa che il suono dissonante che era stato preparato deve procedere per grado congiunto, generalmente discendente, verso una consonanza.

Questo principio base, che è seguito abbastanza fedelmente dalla musica corale tardo-medioevale, rinascimentale e del primo Seicento, serve a **smorzare l'effetto di asprezza** provocato dalla dissonanza, facendo in modo che essa sia circondata da un **ambiente accordale consonante** e non troppo dissimile. La principale eccezione a questo principio è costituita dalla **settima minore**, intervallo che, se sentito nell'ambito dell'accordo di settima di prima specie, non necessita di preparazione. Ciò è in buon **accordo con la teoria di Helmholtz**, in quanto la settima minore è, tra le dissonanze, l'intervallo in cui la nota superiore costituisce l'armonico più vicino di quella inferiore.

Ci si potrebbe chiedere perché questo bisogno di attenuare l'effetto della dissonanza non si sia storicamente risolto nella sua semplice esclusione dalla pratica musicale. La risposta a questa domanda non è semplice, e qui ci si limiterà a riportare una sintesi del pensiero di **Schoenberg** sull'argomento. Si tenga presente, innanzitutto, che per lungo tempo la polifonia vocale medioevale aveva scelto proprio l'eliminazione totale della dissonanza, e anzi, più o meno fino all'avvento della Scuola di Notre Dame, aveva considerato consonanti solo unisoni, ottave, quarte e quinte. A un certo punto, però, l'esigenza di varietà implicita in ogni forma d'arte e l'assuefazione progressiva a suoni armonicamente più lontani costituirono una componente abbastanza rilevante da far muovere la composizione musicale verso la situazione di equilibrio illustrata dal principio base prima esposto. Tale assuefazione, secondo Schoenberg, fu dovuta in gran parte all'utilizzo sempre più frequente di note di passaggio nelle voci superiori al cantus firmus, che rispetto all'armonia della nota fondamentale, per il fatto stesso di procedere in genere per grado congiunto, rappresentavano armonici abbastanza lontani. Nell'opera citata in bibliografia Schoenberg definisce questa compresenza di esigenze melodiche e armoniche in contrasto tra di loro una fortunata combinazione.

Anche quando la pratica viva dell'arte musicale (soprattutto nella tradizione strumentale) ha pian piano superato la rigidità del principio base che è stato enunciato, esso ha continuato a costituire un importante punto di riferimento sia per l'analisi armonica, sia perché rappresenta (anche grazie all'illustre tradizione corale cui si accennava) la formula di base che spesso opera a livello profondo, quasi inconsapevole, nella mente del compositore.