



Claudio Bonechi (clavicordo)

# ACUSTICA DELL'ASCOLTO MUSICALE - 1A PARTE

3 January 2012

## Introduzione

Tradizionalmente la musica viene ascoltata soprattutto in ambienti chiusi. In questi ambienti i fenomeni della propagazione si sommano e si combinano tra loro, dando luogo a situazioni assai complicate, in cui si mescolano **campo sonoro diretto**, dovuto alle onde che non incontrano ostacoli, e **campo sonoro riverberato**, dovuto alle onde variamente riflesse e difratte da pareti e ostacoli.

E' proprio il campo sonoro riverberato quello più difficile da affrontare, in quanto è costituito sia da riflessioni di tipo "ottico" per le alte frequenze, la cui lunghezza d'onda è piccola in confronto alle dimensioni fisiche degli oggetti presenti, sia da riflessioni caratterizzate da emissione diffusa in senso sferico, la cui lunghezza d'onda è confrontabile con le dimensioni fisiche degli stessi oggetti (diffrazione).

Oltre a ciò, particolari conformazioni ambientali favoriscono il formarsi di onde stazionarie (risonanza), alle quali sono associate concentrazioni di energia in alcune zone e sua scarsità in altre. Il tutto varia in funzione della frequenza, naturalmente.

## Radiazione

I suoni della musica vengono prodotti da oggetti chiamati *strumenti musicali*, ai quali dobbiamo aggiungere la voce umana, che ha origine dalle vibrazioni delle *corde vocali*.

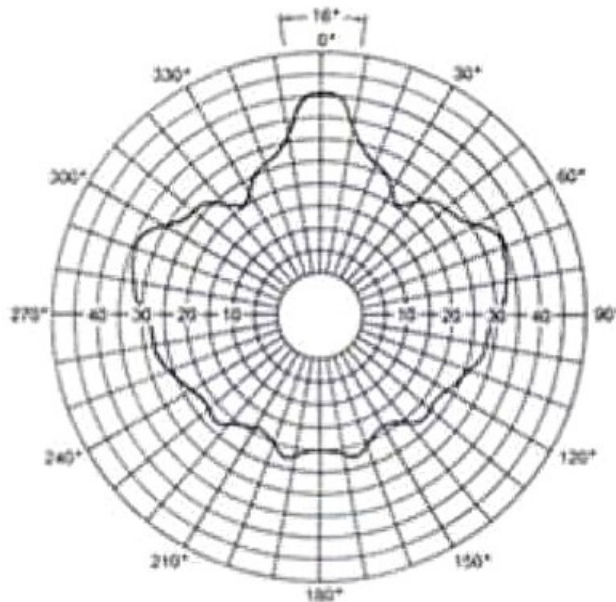
Un corpo rigido elastico può, in certe condizioni, vibrare e di conseguenza indurre vibrazioni simili nell'aria circostante (o eventualmente un altro gas), sotto forma di variazioni cicliche (onde) di pressione. Questo fenomeno viene chiamato *radiazione acustica*. Nei limiti in cui l'aria si comporta in modo lineare, le frequenze delle vibrazioni indotte sono del tutto simili a quelle del corpo vibrante. In altre condizioni, l'aria stessa può essere messa in vibrazione direttamente, provocando turbolenze all'interno di un corpo cavo come la canna di un organo.

La radiazione acustica è un fenomeno simile alla radiazione elettromagnetica, quest'ultima però composta di energia pura (fotoni) che, a differenza di quella acustica, si propaga anche nel vuoto. Nella propagazione delle onde acustiche è invece coinvolta la massa delle particelle di aria: l'energia si propaga come energia

cinetica delle particelle di aria. Senza un mezzo di supporto l'energia acustica non può esistere.

La similitudine però ci permette di parlare di "antenna" e di *efficienza di radiazione*, che negli strumenti musicali meccanici e nei diffusori elettromeccanici (altoparlanti) ha un ruolo di rilievo. Ne ho parlato (sommariamente) in altri articoli pubblicati su questo blog.

Qui, dato che guardiamo le cose dal punto di vista dell'ascolto, della radiazione acustica interessa soprattutto la "caratteristica di direzionalità" del radiatore nell'ambiente, ossia l'andamento della potenza emessa in funzione della frequenza e dell'angolo (azimut) con la perpendicolare alla superficie radiante (considerata piana), oltre che dell'"altezza angolare" verticale (distanza zenitale).



Per la riproduzione della musica o per la sua amplificazione si usano radiatori acustici detti altoparlanti, che operano nella banda delle frequenze udibili. La figura mostra un diagramma di radiazione di un altoparlante @ 1 kHz, piano orizzontale. Gli altoparlanti sono trasduttori eterogenei (mentre gli strumenti musicali non elettronici sono trasduttori omogenei) e quindi convertono energia elettrica in energia acustica (meccanica): sono caratterizzati da un certo *rendimento* o *efficienza*, spesso indicato come *sensibilità*. I due termini efficienza e sensibilità, sempre espressi in dB, vengono spesso usati con lo stesso significato, ma non sono la stessa cosa e possono risultare ingannevoli, specie per chi vuole acquistare Hi Fi. Chi è interessato può cominciare, benchè non sia un miracolo di chiarezza e di rigore, da quanto dice Diego Nardi in [http://www.webalice.it/jlc891/Sugli\\_altoparlanti.pdf](http://www.webalice.it/jlc891/Sugli_altoparlanti.pdf)

## Fenomeni legati alla propagazione per onde

Quando un mezzo è coinvolto nella propagazione, l'energia trasportata dall'onda verrà in parte *trasmessa* e in parte *assorbita* (cioè in genere trasformata in calore) dal mezzo stesso (supponendolo di costituzione omogenea). Se poi nel suo cammino l'onda incontra un secondo mezzo, una frazione di essa verrà trasmessa attraverso il secondo mezzo, un'altra frazione sarà assorbita, ma una terza frazione potrà essere *riflessa*, come a dire "respinta al mittente". In questo caso la trasmissione è associata al fenomeno della *rifrazione*, per il quale l'onda cambia direzione se incontra nel suo cammino un mezzo diverso, direzione determinata dalla velocità di propagazione tipica del mezzo. Ciò viene visualizzato abbastanza semplicemente con un modello simile a quello dell'ottica geometrica, che presuppone, come già detto, oggetti con dimensioni molto maggiori della lunghezza d'onda coinvolta. Poiché nella pratica dell'acustica musicale le lunghezze d'onda variano grosso modo tra 10 metri (34 Hz) e 3,4 cm (10 kHz), questa condizione, negli ambienti chiusi si verifica solo in parte, variabile con le dimensioni dell'ambiente stesso.

Quando la lunghezza d'onda è dello stesso ordine di grandezza degli ostacoli, le leggi dell'ottica geometrica non valgono più e le cose si complicano; in particolare si verifica il fenomeno detto *diffrazione*, che segue dal "principio di Huygens-Fresnel". Esso stabilisce che ogni punto colpito da una perturbazione d'onda diventa sorgente secondaria di perturbazioni di onde aventi frequenza uguale a quella della perturbazione incidente: una qualsiasi superficie d'onda può pensarsi come inviluppo risultante dalle infinite onde secondarie provenienti dai punti della superficie d'onda che immediatamente la precede. Questo spiega come le onde possono aggirare molti ostacoli; al tempo stesso dà ragione di come sia molto difficile realizzare *schermi acustici*, al di là dei quali si possa formare un'*ombra acustica*.

Quando, come nella riflessione e nella diffrazione, si generano fronti d'onda in aggiunta a quello diretto, possono crearsi condizioni che generano il fenomeno detto *interferenza*, che può essere in vario grado *costruttiva* o *distruttiva*.

## Rifrazione

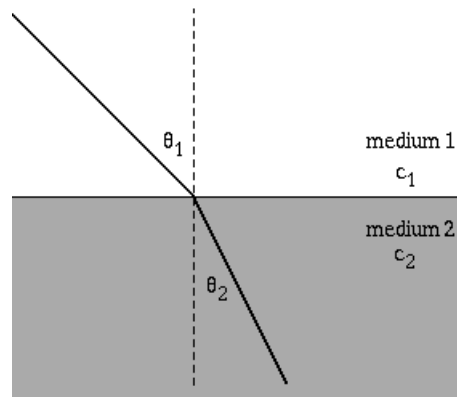
La rifrazione è quel fenomeno associato alla trasmissione per il quale un'onda che transita da un mezzo a un altro subisce un cambiamento della direzione di propagazione: il fenomeno è dovuto al variare della velocità di propagazione quando si passa da un mezzo a un altro. La velocità di propagazione  $c$  dell'onda dipende infatti dalle proprietà elastiche ed inerziali del mezzo di propagazione. Passando dal mezzo 1 al mezzo 2, in cui le velocità sono rispettivamente  $c_1$  e  $c_2$ , l'onda cambia

direzione secondo la relazione di Snell, che uguaglia i cammini  $s$  nei due mezzi per uno stesso intervallo di tempo  $t = s_1/c_1 = s_2/c_2$ :

$$\frac{s}{c_1} \sin \theta_1 = \frac{s}{c_2} \sin \theta_2$$

ossia

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$$



Poiché questa legge è applicabile per lunghezze d'onda piccole rispetto agli ostacoli incontrati nella propagazione, le sue applicazioni all'acustica musicale degli ambienti chiusi sono sporadiche. Le lenti acustiche, come quelle ottiche, sono basate sulla rifrazione. Poiché le lunghezze d'onda sono dell'ordine delle dimensioni dell'ambiente, la loro applicazione nell'acustica udibile è limitata a pochi casi, soprattutto ad alcuni altoparlanti a tromba per alte frequenze (tweeter) per aumentarne l'angolo di dispersione. La rifrazione acustica può avere una sua rilevanza uditiva anche all'aperto, dato che dipende dalla velocità di propagazione, a sua volta dipendente dalla temperatura ( $c = 331,2 + 0,6T$  m/s dove  $T$  è la temperatura in °C), che può variare tra uno strato più basso e uno più alto dell'aria. Ciò si traduce in una curvatura della direzione di propagazione.

## Assorbimento

L'assorbimento è quel fenomeno per il quale un materiale "assorbe" energia acustica: vale a dire che la quantità di energia riflessa dalla superficie del materiale è minore di quella incidente. L'aspetto quantitativo del fenomeno è descritto dal *coefficiente di assorbimento*  $\alpha$ , definito come rapporto tra la potenza sonora assorbita e la potenza sonora incidente e dipende, oltre che dal materiale anche dalla frequenza e dall'angolo di incidenza dell'onda. Lo spazio libero è totalmente assorbente e il suo coefficiente di assorbimento  $\alpha$  è  $= 1$ .

Considerando, per fissare le idee, un pannello rettangolare di superficie ampia, in cui il lato minore del rettangolo sia molto maggiore dello spessore e della lunghezza

d'onda di un suono incidente su una faccia, possiamo dire che l'energia assorbita subisce due trattamenti: in parte viene trasmessa all'altra faccia e in parte viene *dissipata* in calore all'interno del pannello. Quest'ultima frazione è utilizzabile quando si vogliono variare le caratteristiche di un ambiente (stanza, cassa acustica, teatro, ...), ossia quando si vuole ridurre la percentuale di energia riflessa, quella che va a creare il *campo riverberato*.

L'assorbimento avviene tramite tre meccanismi:

**Porosità.** L'energia si dissipa per attrito nelle microcavità dei materiali porosi e fibrosi, quali lana di vetro, feltro, etc. Forme che facciano aumentare la superficie di contatto con l'aria, quindi con l'onda incidente, ad esempio con l'aggiunta di protuberanze varie, rendono l'assorbimento più efficiente. Lo spessore del pannello influisce: aumentandolo anche a cresce, in misura significativa per frequenze piuttosto basse, in misura molto minore per quelle più alte. Anche la densità del materiale costituente il pannello ha la sua importanza specie alle frequenze medio-basse, come quella delle lane minerali (densità fino a  $100 \text{ kg/m}^3$ ).

**Risonanza di Helmholtz.** Un risonatore di Helmholtz è un recipiente quasi chiuso che prolunga l'unica apertura con un cilindretto aperto verso l'esterno (simile a una bottiglia); nei confronti dell'aria si comporta come un sistema massa-molla, in cui la massa è l'aria contenuta nel cilindretto e la molla è l'aria contenuta nel resto del recipiente. Se in un pannello non poroso, montato a una certa distanza dalla parete, si fanno fori di dimensioni opportune, si dà luogo a un sistema risonante massa-molla che si può pensare costituito da tanti risonatori di Helmholtz (benché aperti) quanti sono i fori, in cui la massa è il volume d'aria contenuto nel foro e la molla è l'aria dell'intercapedine. La risonanza provoca un aumento della pressione all'interno dei fori e quindi anche perdite per attrito. La frequenza di risonanza è unica e la selettività del sistema abbastanza elevata, il che può essere uno svantaggio: la si può diminuire inserendo materiale poroso nell'intercapedine, che fa aumentare lo smorzamento (diminuire la  $Q$ ) e quindi allargare la banda.

**Risonanza di pannello.** Un pannello viene messo in vibrazione alle proprie frequenze di risonanza dall'energia incidente e può così dissipare energia per attrito, interno e dell'aria. Un ulteriore effetto massa-molla simile al precedente si ha con l'intercapedine tra pannello e parete, se la distanza dalla parete è adeguata. Le frequenze nella gamma tra 150 e 300 Hz sono quelle che vengono più facilmente assorbite con questo metodo.

## Diffrazione e diffusione

Un altro fenomeno associato alla propagazione delle onde è la cosiddetta *diffrazione*; essa ha luogo quando un'onda incontra un ostacolo, o un'apertura, di dimensioni simili alla lunghezza d'onda o minori. In questo caso non si può avere una semplice

riflessione, ma una nuova sorgente si sovrappone a quella originale (principio di Huygens), complicando la situazione, non necessariamente in modo negativo. La diffrazione fa sì che l'ostacolo venga aggirato.

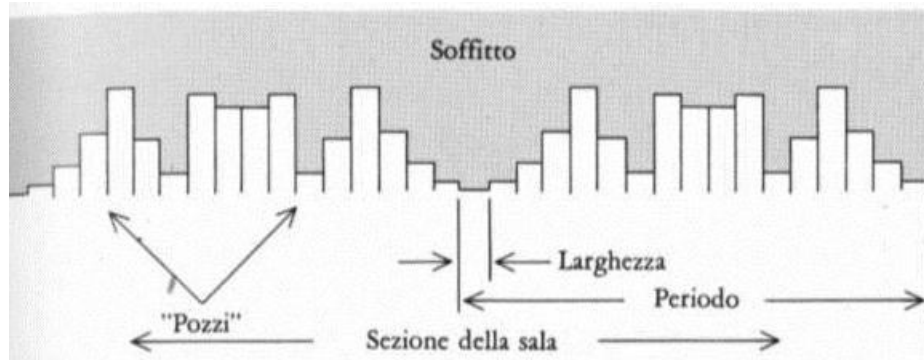
In effetti il valore della lunghezza d'onda  $\lambda$  è il punto di discriminazione tra un comportamento che può essere descritto in modo semplificato ( $\lambda$  piccola rispetto agli ostacoli) tramite onde piane che si propagano in modo rettilineo e che possono essere sostituite da "raggi" (le perpendicolari), e un comportamento assai più complicato (l grande rispetto agli ostacoli) che richiede equazioni differenziali; o, se si vuole, si tratta del passaggio da costanti concentrate a costanti distribuite. Ora in acustica si è quasi sempre nella situazione in cui  $\lambda$ , che varia circa tra 17 metri e 1,7 cm (20-20.000 Hz), è dello stesso ordine di grandezza degli oggetti che ci circondano e quindi la diffrazione è frequentissima.

Osservando le sale rinomate per "la buona acustica", sale costruite per lo più in un tempo in cui le conoscenze scientifiche in materia erano già abbastanza sviluppate ma i metodi di misura piuttosto rudimentali, si nota che le loro pareti non sono regolari come quelle dei locali moderni, ma hanno forme complesse, rientri, sporgenze, spesso arricchite da decorazioni di dimensioni non trascurabili: tutto ciò, al di là del fatto estetico visivo, contribuisce alla bellezza del suono. Le numerose asperità incontrate dal suono nel suo propagarsi, generatrici di numerose riflessioni e soprattutto diffrazioni, hanno come effetto finale la *diffusione*, una situazione simile a quella della luce quando non è diretta ma cosparge omogeneamente di sé l'ambiente (luce "diffusa", appunto). La regolarità ambientale insomma è nemica del buon suono, proprio perché tende a creare concentrazioni di energia su particolari frequenze (onde stazionarie), nocive all'equilibrio sonoro complessivo. Oggi non è facile realizzare sale dalla buona acustica, perché il nostro tempo ci porta a privilegiare le forme semplici e questo è uno dei (rari?) casi in cui la semplicità non va d'accordo con la qualità estetica. Tuttavia i potenti software di simulazione oggi disponibili e l'impiego di alcuni artifici, consentono, come vedremo nella seconda parte, di ottenere buoni risultati.

Si può anche notare una differenza "architettónica" tra il suono e la luce: mentre con la luce si può giocare a concentrarla in varie zone di un ambiente creando piacevoli contrasti, lo stesso risultato non si può ottenere con il suono "classico", per il quale l'omogeneità nella distribuzione ambientale, che abbiamo chiamato "diffusione", è fondamentale. In realtà la sperimentazione artistica si muove giustamente nella massima libertà, talvolta anche a dispetto dei limiti percettivi.

Sono state proposte e attuate varie soluzioni per migliorare l'acustica degli ambienti: una molto interessante è riportata dal matematico Manfred Schroeder nel suo libro "La teoria dei numeri" (Manfred R. Schroeder, "La teoria dei numeri", F. Muzio, Padova 1986). Schroeder osserva che alcune sale moderne hanno mediamente un soffitto basso rispetto alla larghezza. "Queste sale non forniscono all'ascoltatore abbastanza onde sonore che viaggiano lateralmente - in contrapposizione al suono

che viaggia dal palco al fondo della sala e che arriva alla testa dell'ascoltatore nel suo piano mediale (il piano di simmetria attraverso la testa). Questo suono su un piano mediale dà luogo, naturalmente, a due segnali acustici molto simili alle due orecchie dell'ascoltatore, e si pensa che da esso risulti una eccessiva "somiglianza biauricolare", responsabile della cattiva qualità acustica." Per rimediare all'inconveniente, dice poi Schroeder, si potrebbe modellare il soffitto trasformandolo da superficie continua - piana o curva - a una successione periodica di pozzetti accostati, lunghi quanto la sala, tutti di uguale larghezza ma di profondità diversa, calcolata attraverso una particolare funzione matematica: la diffusione del suono risulterebbe allora uniforme per tutte le frequenze. La figure mostrano un esempio di soffitto composto da pozzetti diffusori (detti "di Schroeder " o "a residuo quadratico") visti in sezione e nella realizzazione di uno studio di registrazione. Ne esistono anche versioni a 2 dimensioni.



*Diffusori Schroeder-1*



*Diffusori Schroeder-2*



*Diffusori Schroeder-3*

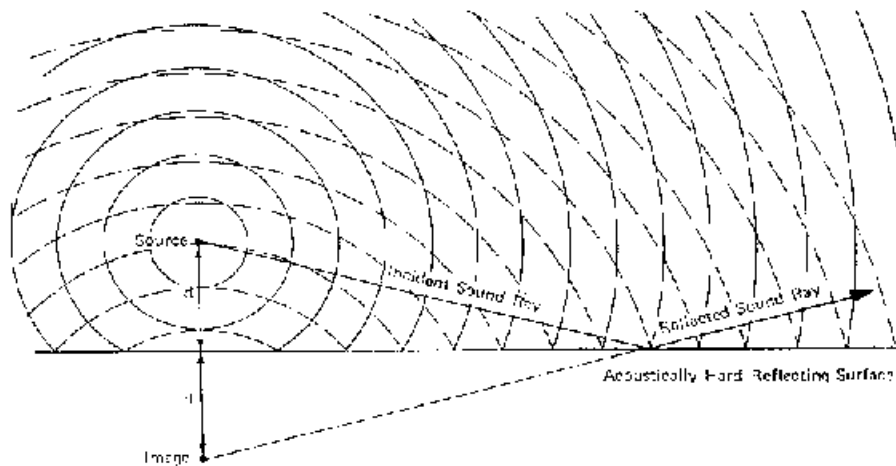
Diffusore di Schroeder: a 2 dimensioni e a 3 dimensioni

Per contro, differentemente dalle onde luminose, non è facile “circoscrivere” le onde sonore: uno schermo acustico è spesso molto più costoso e difficile da realizzare di uno schermo visivo. Il motivo è sempre lo stesso: le dimensioni della lunghezza d’onda. Per la luce sono estremamente più piccole degli ostacoli incontrati nel proprio cammino, che facilmente provocano zone di ombra ben individuabili e studiabili con la geometria proiettiva, perché i “raggi” sono perfettamente plausibili. Per il suono si è nella situazione opposta e quindi, mentre è relativamente facile concentrare e dirigere la luce in una zona delimitata (tipico esempio è l’“occhio di bue” in teatro), è estremamente difficile dirigere e concentrare il suono in una stessa zona. Un tentativo abbastanza riuscito di concentrare il suono in una zona delimitata è stato fatto da Joseph Pompei già dagli anni ‘90 con il suo dispositivo che impiega gli ultrasuoni: essendo la loro lunghezza d’onda assai più piccola di quella del suono udibile, è facile concentrarli tramite un radiatore circolare dal diametro di varie lunghezze d’onda. Sfruttando la non linearità dell’aria alle frequenze ultrasoniche (un fenomeno scoperto negli anni ‘60 del ‘900) si riesce a produrre suoni udibili solo nell’intorno degli ultrasuoni; i suoni risultano distorti ma la distorsione è descrivibile matematicamente e quindi è possibile compensarla in anticipo, opportunamente deformando la forma d’onda. Seguendo lo stesso principio, ma questa volta in tutta linearità, alcune discoteche usano gruppi di molti altoparlanti posti molto vicini l’uno all’altro a riempire una superficie circolare del diametro alcuni metri, posizionata sopra la pista da ballo in modo che la diffusione sonora sia “a pioggia”: un gruppo di altoparlanti siffatto riesce a sviluppare una certa concentrazione di suono, ma l’efficacia è contenuta e il costo molto alto.

## Riflessione

Nella riflessione è come se nascesse un’altra sorgente virtuale (o sorgente immagine) che emette le stesse onde della sorgente reale ed è posta al di là della superficie di separazione tra i mezzi, alla stessa distanza di quella reale: l’angolo di incidenza dell’onda è uguale all’angolo di riflessione. L’onda riflessa va ad aggiungersi a quella diretta, rinforzandola o attenuandola, a seconda dello sfasamento tra le due: il

fenomeno è detto “interferenza”, rispettivamente costruttiva (fino ad ampiezza doppia) e distruttiva (fino ad ampiezza zero).



La riflessione è un fenomeno estremamente importante per l’acustica ambientale.

Il suono emesso direttamente dalla sorgente si somma nel punto di ascolto al suono riflesso, che giunge sempre ritardato perché segue un cammino più lungo: il risultato può essere un piacevole arricchimento o, al contrario, uno sgradevole ammassamento sonoro. Un ambiente molto riflettente si rivela spesso dannoso all’ascolto, ma non sempre: nelle chiese grandi, specie se dotate di soffitti a volta, l’effetto viene sfruttato dall’organo a canne e dal canto gregoriano, il quale va eseguito lentamente e con numerose pause per aumentare la comprensibilità del testo e creare così un tempo dilatato, ritenuto più adatto alla meditazione. L’organista moderno, in particolare, si deve abituare, oltre alle riflessioni, anche al ritardo con cui gli giunge in suono rispetto a quando preme il tasto, dato che quasi sempre le canne dell’organo moderno si trovano a una certa distanza dalla tastiera, che le comanda tramite segnali elettrici. Come se non bastasse, alcuni registri (un registro è una fila di canne che producono suoni di un certo timbro) dell’organo emettono già di per sé il suono ritardato, quindi il risultato potrebbe risultare disastroso se l’esecutore non fosse allenato a tenerne conto. Il campo riverberato diventa prevalente su quello diretto dopo una certa distanza dalla sorgente, detta infatti *distanza critica*, in cui i due si equivalgono. Il fenomeno si spiega facilmente pensando che il campo diretto è solo una parte del campo complessivo. Presupponendo l’emissione di un suono continuo e di potenza costante, vicino alla sorgente il campo è quasi tutto diretto ma diminuisce linearmente con il crescere della distanza da essa. In una stanza “regolare”, quale un parallelepipedo, le molteplici riflessioni su tutte le pareti vanno a confluire nel campo riverberato, la cui intensità dipende dall’assorbimento energetico delle pareti; infatti l’energia che incide sulle pareti viene in parte riflessa e in parte assorbita (di quest’ultima, una frazione viene trasmessa attraverso la parete, il rimanente viene

dissipato in calore). In ogni punto della stanza, quindi, l'energia acustica è dovuta alla somma del campo diretto (che decade di 6 dB ad ogni raddoppio di distanza) e del campo riverberato. A causa del maggior percorso che compie nei "rimbalzi" delle riflessioni, l'energia del campo riverberato arriva con un po' di ritardo rispetto a quella del campo diretto. In compenso il campo riverberato è di intensità (circa) costante in tutta la stanza. A una certa distanza dalla sorgente, detta distanza critica, il campo diretto e quello riverberato si equivalgono in intensità. Ne segue che a distanza maggiore di quella critica prevale il campo riverberato. Quest'ultimo dipende anche dall'assorbimento e, poiché l'assorbimento è in generale funzione della frequenza, lo è anche la distanza critica. Normalmente però si considera un "assorbimento medio" e la distanza critica è anch'essa media. Occorre inoltre tenere conto della direttività dell'ambiente che circonda la sorgente e di quello che circonda le superfici riflettenti; anche qui si considera una media. Per il campo sonoro si usa spesso riferirsi alla Densità di energia sonora o energia volumica

$$D = \frac{E}{V} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right]$$

cioè Energia riferita al Volume, spesso utilizzata in **dB**, ossia

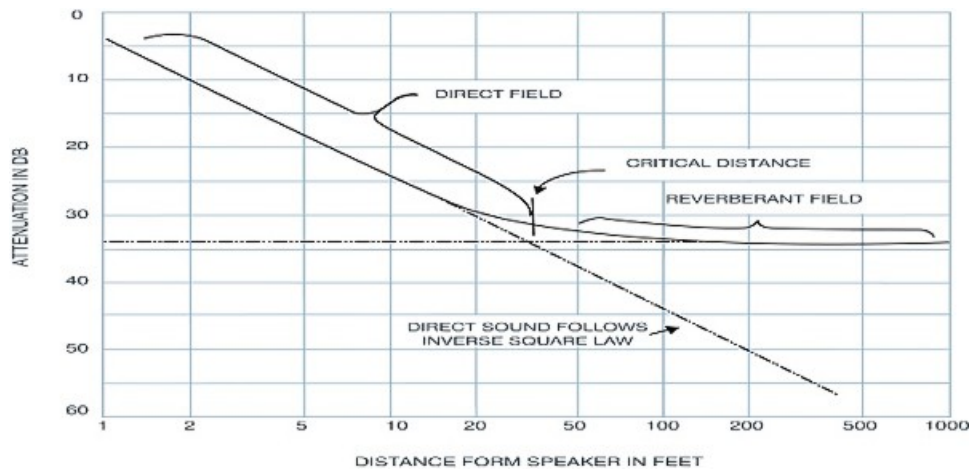
$$L_D = 10 \cdot \log D$$

La figura mostra il contributo dei due campi (notare la distanza espressa in piedi) e che corrisponde alla formula:

$$L_D = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{\alpha_m S} \right)$$

dove:

- $L_D$  : Densità energetica (dB) in un punto
- $d$  : distanza dalla sorgente
- $L_W$  : Densità energetica (dB) alla sorgente
- $\alpha_m$  : coefficiente di assorbimento medio
- $Q$  : Direttività media (rapporto tra intensità emessa in una direzione e intensità media)
- $S$  : area della superficie della stanza



Una conseguenza di ciò è che, a distanza dalla sorgente minore della distanza critica, serve a poco ridurre il campo riverberante aumentando l'assorbimento delle pareti. Per altro verso, un ambiente molto assorbente è adatto solo per effettuare registrazioni; infatti, se il suono emesso dagli strumenti e dalle voci non venisse assorbito dalle pareti, l'effetto delle riflessioni prodotte dall'ambiente in cui ha luogo la registrazione si sommerebbe a quello delle riflessioni prodotte dall'ambiente in cui avviene l'ascolto, ambiente che si suppone mediamente riflettente, come quello casalingo. Peraltro l'assorbimento in uno studio di registrazione non deve essere eccessivo. Il suono risulterebbe troppo "secco" e un ambiente troppo assorbente non è buono per gli esecutori che, soprattutto nella musica classica, si troverebbero in difficoltà. A maggior ragione non è buono nemmeno per ascoltare musica: un po' di riflessione ben distribuita sulle varie frequenze rende il suono più piacevole, più morbido.

Sopra i 3 kHz il coefficiente di assorbimento varia sensibilmente con l'umidità relativa. Le onde riflesse cambiano un po' la natura della sorgente ed è importante che questo tipo di cambiamento sia sufficientemente omogeneo, "ben" distribuito, in modo da non creare differenze troppo accentuate con l'originale. Ciò può avvenire a causa della risonanza, un fenomeno che negli ambienti si manifesta attraverso la riflessione ripetuta tra pareti parallele diversamente disposte, creando onde "stazionarie" e producendo un aumento di intensità di certe frequenze particolari (dette appunto "di risonanza") rispetto a tutte le altre. Le risonanze sono lo spauracchio dell'acustica ambientale, dato che, esaltando certe frequenze, provocano un'alterazione del timbro o addirittura inducono dei fastidi: il cosiddetto "rimbombo" ne è un esempio ben conosciuto. Esse violano quella legge implicita della psicoacustica, secondo la quale è necessario che le alterazioni introdotte dall'ambiente, inevitabile compagno dell'esecutore musicale, siano contenute entro limiti accettabili, numericamente non facili da definire, ma certamente ben valutabili dall'esperienza di un ascolto consapevole ed esperto. Tuttavia ai nostri giorni le tecniche di elaborazione del suono riescono a compensare o a correggere gli effetti

prodotti dall'ambiente.

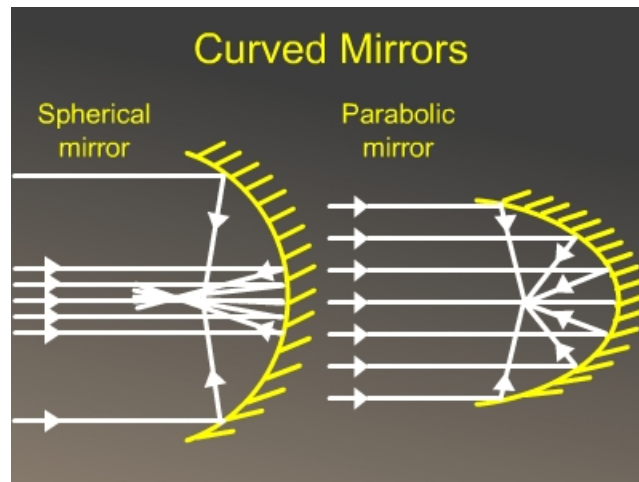
La risonanza si manifesta più facilmente in ambienti regolari. Se consideriamo una stanza a forma di parallelepipedo, ci sarà un'onda per cui la velocità (delle particelle di aria) sarà nulla sulle pareti: la loro distanza corrisponderà quindi a mezza lunghezza d'onda, dalla quale si risale facilmente alla frequenza del modo detto "assiale". Esistono 3 modi assiali fondamentali o "primari", uno per ogni coppia di pareti parallele, a cui si aggiungono, per ognuno, infiniti modi "secondari" multipli interi dei primari. Oltre ai modi assiali ne esistono altri, sempre legati alla geometria della stanza (tangenziali, angolari), meno influenti perché le riflessioni fanno più "salti". Il caso peggiore sembra essere quello del cubo, in cui i tre modi assiali si sommano alle stesse frequenze.

Stando a Vitruvio, gli antichi Greci usavano la risonanza nei teatri allo scopo di rinforzare il suono, sia degli strumenti musicali che della voce degli attori, ponendo in tutto il teatro una serie di vasi di bronzo in funzione di risonatori. Questi erano accordati su alcune particolari note in modo che l'energia reirradiata poteva esaltare varie componenti sonore e far giungere un suono più intenso agli spettatori.

Per aumentare la percentuale di energia riflessa, si possono usare specchi acustici o riflettori, ossia superfici riflettenti per i suoni, piane o non piane, purché molto maggiori della lunghezza d'onda. Il loro impiego è abbastanza diffuso nelle nuove architetture delle sale da concerto e dei teatri; lo scopo è di far arrivare il suono riflesso anche in zone altrimenti in ombra.

Un'applicazione militare abbastanza famosa fu realizzata negli anni '20 sulle coste britanniche, in cui enormi specchi acustici (sferici) permettevano di sentire in anticipo l'arrivo degli aerei; il tutto cadde in disuso con l'invenzione del radar. La forma dello specchio è naturalmente determinante per dirigere il suono in particolari direzioni. Ad esempio, se si pone una sorgente puntiforme (o approssimativamente tale) nel fuoco di uno specchio parabolico, otterremo un rinforzo nella direzione dell'asse della parabola. Lo specchio sferico permette invece di individuare anche la direzione di provenienza del suono.

Una simpatica applicazione, tra le tante, di questo concetto si trova nel porticato alto esterno di Castel sant'Angelo a Roma: due specchi acustici parabolici sono stati ricavati (secolo XVI) in due colonne, uno di fronte all'altro, all'altezza della testa di una persona che sta seduta sotto lo specchio. La testa parlante viene così a trovarsi circa nel fuoco dello specchio e la persona può parlare a bassa voce ad una distanza di alcuni metri con l'interlocutore seduto sotto lo specchio opposto, senza essere sentito dai presenti nel porticato.



*sala Santa Cecilia*

Specchi acustici: modello generico di riflessione e realizzazione nella sala Santa Cecilia dell'Auditorium Parco della musica di Roma

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Clavicordo:acustica-dell-ascolto-musicale-1a-parte>"