



INFORMATICA MUSICALE

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA
LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA
A.A. 2019/20
Prof. Filippo L.M. Milotta

ID PROGETTO: 15

TITOLO PROGETTO: Eco

AUTORE 1: Milone Davide

AUTORE 2: Sangiorgio Davide

Indice

| | |
|--|-----------|
| 1. Obiettivi del progetto | 2 |
| 2. Riferimenti Bibliografici | 13 |
| 3. Argomenti Teorici Trattati | 15 |

1. Obiettivi del progetto

Riflessione dell'onda sonora

Tutti conosciamo, per averlo sperimentato direttamente, il fenomeno della *riflessione* del suono: il fenomeno dell'eco, la particolare acustica di una stanza o di una sala da concerto, la possibilità di abbattere il rumore (si pensi alle barriere o a certi asfalti fono-assorbenti nelle strade di grande traffico), persino la capacità di un pipistrello (o di un sottomarino) di rilevare la presenza di un ostacolo, sono conseguenze di tale fenomeno (o del suo effetto complementare, cioè l'assorbimento del suono).

Quando avviene il fenomeno della riflessione?

La risposta, a prima vista ovvia, è che la *riflessione* dell'onda sonora avviene quando essa incontra un ostacolo.

Tale affermazione è troppo semplicistica per due ordini di motivi:

la presenza di un ostacolo non è di per sé condizione sufficiente a garantire la presenza di un apprezzabile fenomeno di *riflessione* sonora. Gioca un ruolo fondamentale la dimensione relativa dell'ostacolo rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda sonora: il fenomeno della riflessione è significativo solo se la dimensione dell'ostacolo è molto maggiore della lunghezza d'onda dell'onda sonora che incide su di esso. Ovviamente nel caso in cui l'ostacolo circondi completamente la sorgente sonora (si pensi ad esempio alle pareti di una sala da concerto, all'interno della quale sta suonando un'orchestra) è ovvio che il fenomeno della riflessione è importante (l'onda sonora è impossibilitata ad "aggirare" l'ostacolo) e dipende ovviamente dalle proprietà di riflessione e di assorbimento del materiale di cui sono fatte le pareti. Nella progettazione di ambienti aventi determinate caratteristiche acustiche è della massima importanza tener conto del fenomeno della riflessione (anche multipla) che il suono subisce a causa della presenza delle pareti. Non si deve pensare che il problema possa essere semplicemente risolto cercando di limitare (tramite materiali fonoassorbenti) il fenomeno della riflessione: l'effetto inimitabile, anche dai più fedeli apparecchi di riproduzione, che crea la "musica dal vivo" è in larga parte dovuto alla presenza di riflessioni "controllate" che arricchiscono il suono che ci proviene direttamente dagli strumenti degli esecutori.

La presenza di un ostacolo non è nemmeno condizione necessaria per la presenza del fenomeno della riflessione. L'onda riflessa può originarsi anche in presenza di variazioni delle caratteristiche fisiche del mezzo di propagazione dell'onda (riassunte nel concetto di impedenza) senza che vi sia necessariamente la presenza di un ostacolo, normalmente inteso. Ad esempio, la "geometria" degli strumenti musicali a fiato è finalizzata alla formazione di onde riflesse all'interno dello strumento, necessarie alla generazione di quelle onde stazionarie responsabili della produzione dei suoni. Nel caso di tali strumenti la variazione di impedenza (all'origine delle onde riflesse) è dovuta alla diversa pressione dell'aria esistente nella cavità orale dello strumentista, nell'interno della canna e appena all'esterno della canna.

Come si genera l'onda riflessa?

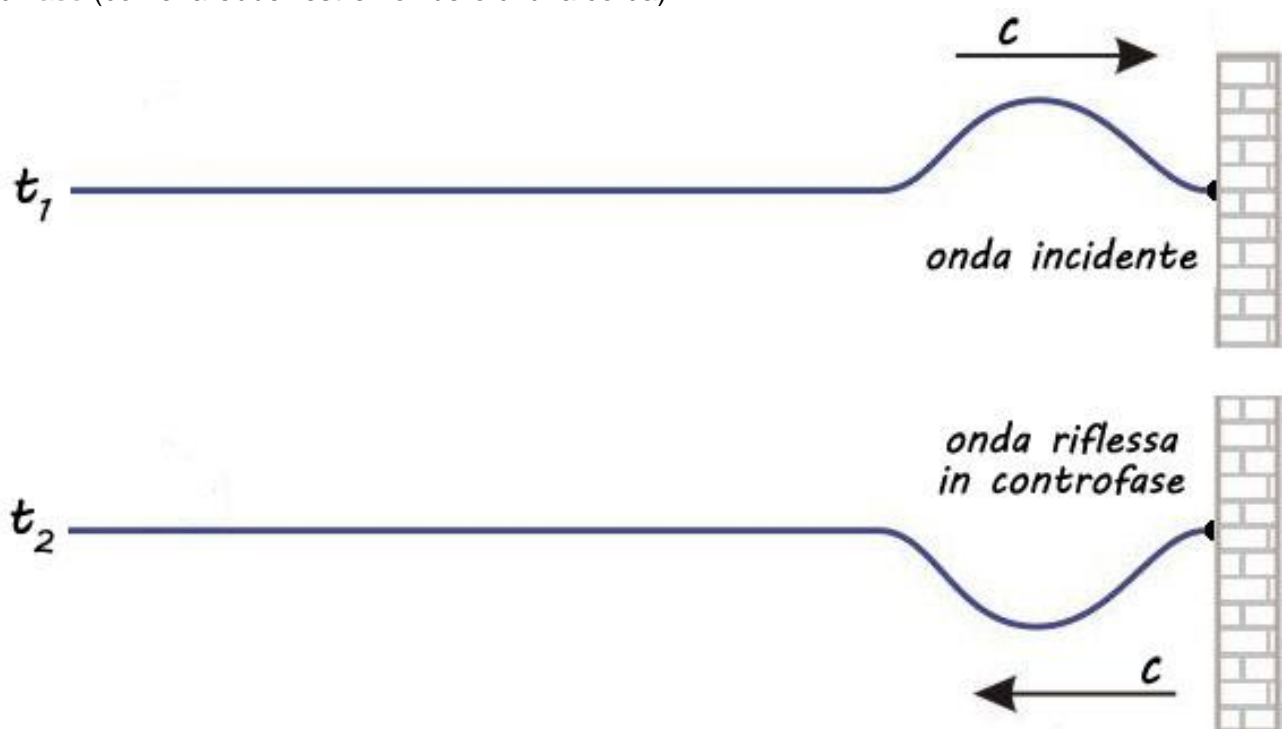
Il meccanismo di riflessione dell'onda sonora è analogo a quello della riflessione nelle corde anche se per il suono l'interazione con il "vincolo", rappresentato dalla parete dell'ostacolo o da una brusca variazione di impedenza del mezzo, è più difficile da descrivere in modo semplice. Innanzitutto, distinguiamo i due casi:

Riflessione dell'onda sonora da una parete o dall'estremità di una canna chiusa

Cosa succede quando l'onda sonora, cioè l'onda di compressione longitudinale presente nell'aria raggiunge, in certo istante, una parete propriamente detta o l'estremità di una canna chiusa? In prossimità della parete le molecole dell'aria non possono più oscillare longitudinalmente, cioè parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda:

si crea un nodo nell'ampiezza dell'onda longitudinale, analogamente a quanto accade all'estremo vincolato di una corda;

Per quel che concerne la pressione, invece, la presenza della parete determina la massima variazione possibile in quanto l'impossibilità di oscillare longitudinalmente delle particelle produce un repentino aumento di densità (e quindi) della pressione dell'aria. La presenza della parete produce, per reazione, un brusco abbassamento della pressione (le particelle rimbalzano indietro provocando una rarefazione e quindi una diminuzione della pressione) in prossimità della parete. Si dice allora che l'onda di pressione generata presenta un ventre e viene riflessa senza inversione di **fase** (come farebbe l'estremo libero di una corda).



Riflessione dell'onda sonora all'estremità di una canna aperta

Cosa succede quando l'onda sonora, cioè l'onda di compressione longitudinale presente nell'aria raggiunge, in un certo istante, l'estremo di una canna aperta? In prossimità dell'estremità della canna le molecole dell'aria ora sono libere di oscillare longitudinalmente, cioè parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda:

si crea un ventre nell'ampiezza dell'onda longitudinale, analogamente a quanto accade all'estremo libero di una corda;

per quel che concerne la pressione, invece, essa è vincolata ad assumere, per continuità, il valore della pressione atmosferica presente appena all'esterno della canna. La presenza della estremità aperta produce in questo caso un **nodo** e l'onda di pressione viene riflessa con una inversione di **fase**.

Riassumendo, esattamente come nelle corde, la presenza di "vincoli" fisici impone

la nascita di onde riflesse che interagendo con l'onda della sorgente determinano la formazione di onde stazionarie di pressione.

La capacità di selezionare determinate onde stazionarie dei tubi sonori (chiusi e aperti) è alla base del funzionamento di tutti gli strumenti a fiato e dell'organo a canne.

Applicazioni tecnologiche della riflessione del suono

II SONAR

La parola SONAR, entrata ormai a far parte del vocabolario d'uso comune, è l'acronimo dell'espressione SO.N.A.R, ossia SOund Navigation And Ranging (navigazione e localizzazione tramite il suono). Già il nome rivela di per sé come tale dispositivo utilizzi il fenomeno della riflessione delle onde sonore (si tenga presente che le onde sonore sono in grado di propagarsi in acqua anche per chilometri, alla velocità di circa 1500m/sec);

come esso venga impiegato a bordo delle imbarcazioni e dei sottomarini per individuare il fondale o corpi immersi (come banchi di pesci, altre imbarcazioni e sottomarini).

I SONAR possono essere passivi o attivi. Nel primo caso, essi sono usati per identificare la presenza di particolari fonti sonore, essendo nella pratica semplici 'orecchi' in ascolto dei suoni che si propagano sott'acqua. Sono i sonar *attivi*, invece, che sfruttano appieno il fenomeno della riflessione sonora descritto in precedenza: essi sono costituiti da dispositivi di trasmissione/ricezione di impulsi sonori (anche ultrasonici) e da misuratori del "tempo di volo" (cioè del tempo di andata e ritorno) dell'onda sonora riflessa. Ovviamente essendo dispositivi elettronici, tali misuratori possono avere un potere separatore tra due suoni successivi molto minore dei limiti imposti dalla fisiologia del sistema uditivo dell'uomo e consentire la localizzazione di ostacoli anche molto vicini.

La tecnica SONAR oggi si è "emancipata" dalla sua origine nautica e viene impiegata in tutti i dispositivi che utilizzano sensori ad ultrasuoni: ad esempio, nei robot mobili che devono essere capaci di muoversi in un ambiente in modo autonomo ed in sicurezza. Per far ciò essi sono appunto dotati (accanto ad altri sistemi come scanner LASER e a raggi infrarossi) di sensori ad ultrasuoni (tipicamente di frequenza pari a 40kHz, ben superiore al limite delle frequenze udibili di 20 KHz) in grado di localizzare eventuali ostacoli nell'ambiente che potrebbero intralciare il cammino dei robot stessi. Le possibili fonti di errore del metodo SONAR nella misurazione delle distanze possono essere dovute:

a) ad un'imprecisa valutazione della velocità di propagazione del suono in aria (che dipende, seppur debolmente, dalle condizioni di temperatura e di umidità dell'aria);

b) alla natura dell'oggetto che riflette l'onda sonora (ad esempio se è fatto di materiale "fonoassorbente" o presenta una superficie scabra che può dar luogo al fenomeno della *riflessione diffusa*), alla sua inclinazione rispetto alla direzione di propagazione dell'onda sonora incidente (che può compromettere la sensibilità del ricevitore a cui arriva solo una minima frazione dell'onda riflessa). Tali errori, a meno di lavorare in condizioni ambientali estreme, sono comunque, su piccole distanze, più che accettabili: ne è prova il fatto che esistono già in commercio robot mobili che utilizzano i sensori ad ultrasuoni, utilizzati per il trasporto di materiale in ambienti ampi e poco arredati (i lunghi corridoi di un ospedale poco frequentato) o addirittura come guide da museo.

Altri strumenti basati sul fenomeno della riflessione del suono:

- telecomandi per elettrodomestici con sensori ultrasonici;
- interruttori di vicinanza (ad esempio nei cancelli automatici);
- sistemi di misurazione del livello del liquido in cisterne inaccessibili o in pozzi profondi;
- dispositivi montati sul paraurti delle automobili come dispositivi di aiuto per il parcheggio.

L'eco e il riverbero

Nel caso delle onde sonore le lunghezze d'onda variano da circa 17 metri (per i suoni molto gravi, di bassa frequenza) fino a pochi millimetri (per suoni molto acuti, di alta frequenza). Inoltre, il nostro orecchio ha la capacità, per ragioni fisiologiche (in particolare, a causa dei tempi di attivazione delle "parti" della coclea), di discriminare due suoni ricevuti in sequenza, solo se il tempo di separazione è circa di un decimo di secondo. Ricordando che la velocità di propagazione del suono in aria è di circa 340 m/s, un rapido calcolo mostra che, nel caso degli esseri umani, il metodo può essere efficace solo per la localizzazione di oggetti di grandi dimensioni e posti a distanza maggiore di

$$D = \frac{V_{\text{onda}} \cdot \Delta t}{2} = \frac{340 \cdot 0.1}{2} = 17\text{m}$$

In effetti, con la formula precedente, abbiamo ricavato le condizioni per cui ci si può aspettare di apprezzare il fenomeno dell'ECO: l'ostacolo deve essere di grandi dimensioni (ad esempio la parete di una montagna) e posto ad almeno 17 metri dalle nostre orecchie!

Lo stesso Newton utilizzò il fenomeno dell'eco per una prima determinazione della *velocità del suono*: egli ottenne misure incredibilmente precise (entro l'1% del valore noto oggi) utilizzando il porticato della Neville's Court nel Trinity College, a Cambridge, dove aveva studiato, lungo ben



65metri.

Nel caso in cui non si verificassero le condizioni per avere l'eco, ovvero il suono riflesso arrivasse all'osservatore in un tempo inferiore a un decimo di secondo dopo quello emesso, si ha il RIVERBERO, ovvero una sensazione sonora più intensa e causata dal fatto che il suono riflesso si sovrappone al suono di "partenza" generando un'impressione di minor nitidezza e di più difficile localizzazione e della sorgente sonora e dell'ostacolo. Provate ad immaginare, come nel peggior degli incubi, di emettere un urlo in una piccola grotta buia: il suono torna alle vostre orecchie in modo confuso impedendovi la benché minima localizzazione delle pareti. In questo caso probabilmente (anche se non sono soddisfatte le condizioni per avere l'eco, cioè assumendo che le pareti distino da voi meno di 17 metri) avvertireste anche ancora il fenomeno dell'eco dovuto stavolta a riflessioni multiple. Il fenomeno del riverbero è di fondamentale importanza nella progettazione di sale da concerto.

Acustica Architettonica

Quando ascoltiamo il suono prodotto da una sorgente sonora (es. un'orchestra) in un ambiente chiuso il campo sonoro percepito da un ascoltatore è costituito da due contributi:

-il suono diretto costituito dall'onda sonora che raggiunge direttamente l'ascoltatore partendo dalla sorgente. Ovviamente tale suono diretto esiste solo se non esistono ostacoli tra la sorgente sonora e l'apparato ricevente dell'ascoltatore (timpano);

-il suono riflesso che raggiunge l'ascoltatore solo dopo aver subito riflessioni (anche multiple) da parte delle pareti, del pavimento, degli ostacoli (es. poltrone, altre persone del pubblico). Ovviamente tale suono raggiungerà l'ascoltatore con un certo ritardo rispetto al suono diretto e determinerà una "coda sonora" che persiste anche una volta cessata l'emissione da parte della sorgente.

Da queste rapide considerazioni emerge già con chiarezza il problema generale dell'acustica ambientale (e architettonica):

sotto quali condizioni la sovrapposizione tra il suono diretto e il suono riflesso permette di definire l'ambiente dotato di una *buona acustica*?

E quali sono i parametri fisici e percettivi che definiscono tale buona acustica?

Una prima soluzione potrebbe essere quella di cercare di eliminare completamente il suono riflesso: ciò può essere ottenuto ricoprendo le pareti di materiale completamente fonoassorbente. La soluzione è troppo drastica ed anzi impoverisce il suono al quale viene tolto il fascino inimitabile dell'effetto dal vivo. Un certo grado di suono "riverberato" è gradito e rende il suono più caldo, continuo e fluido nel suo svolgersi. A tal proposito si ascoltino questi esempi audio:1)



CL_SampleDRY da vicino.mp3

2)



CL_SampleDRY da lontano.mp3

Il primo esempio è stato registrato con un microfono molto vicino allo strumento in un ambiente molto piccolo; il tempo di ritardo del suono riflesso è praticamente trascurabile cosicché possiamo pensare il suono diretto e riflesso praticamente sovrapposti. Il suono è molto secco (dry) e, malgrado la perizia dell'esecutore appare poco fluido e continuo. Nel secondo esempio il suono è stato manipolato elettronicamente in modo da ricreare il "riverbero" tipico di una sala da concerto; il suono risulta continuo, circondato di un alone che conferisce fluidità, calore e vivezza all'esecuzione.

Il problema del controllo del campo riverberato è da un punto vista teorico un problema estremamente complesso per una serie di ragioni:

la riflessione dell'onda sonora da parte delle pareti è un fenomeno dalle modalità estremamente articolate: essa può andare, a seconda della frequenza dell'onda incidente, dalla "riflessione speculare" per le alte frequenze alla "riflessione diffusa" per le frequenze più basse (cioè di lunghezza d'onda confrontabile con le asperità della superficie riflettente).

la geometria delle pareti riflettenti può dar luogo a fenomeni di focalizzazione del campo riverberato, di eco e di formazione di *onde stazionarie* che compromettono la desiderata uniformità del campo sonoro ottenuto per riverbero.

in ogni fenomeno di riflessione sono sempre presenti anche fenomeni di assorbimento dell'energia sonora che per attrito si converte in parte in calore.

La desiderata omogeneità del campo sonoro riverberato, necessaria per raggiungere gli ascoltatori in tutte le posizioni nel modo più uniforme possibile, può essere ottenuta tramite

specchi e deflettori (che altro non sono se non pannelli di legno lisci e rigidi di varie forme) che posti in posizioni "strategiche" contribuiscono allo scopo;

pannelli fonoassorbenti (quei pannelli bucherellati di materiale poroso che assorbono il suono, anziché rifletterlo) utilizzati per smorzare riverberi e risonanze indesiderate ad esempio nei cinema, dove la potenza dei diffusori è notevole, rispetto al volume della sala.

Il tempo di riverberazione

Un primo parametro che serve a studiare gli effetti della "coda sonora" generata dalle onde riflesse e la loro interazione con il campo sonoro diretto è il tempo di riverberazione.

Per una qualità acustica ottimale occorre trovare un compromesso tra tempi di riverberazioni brevi (che garantiscono chiarezza nel suono e nel parlato impedendo la sovrapposizione di suoni e sillabe emessi in istanti molto diversi nel tempo) e tempi di riverberazione più lunghi che conferiscono pienezza, sonorità e vivezza al suono.

È ovvio che non esiste una ricetta univoca: a seconda della destinazione di uso dell'ambiente chiuso (auditorium per conferenze, sale d'opera, teatro per concerti sinfonici o per musica da camera) o del tipo di musica eseguito, il tempo di riverberazione ottimale subisce variazioni. Una valutazione soggettiva, ma basata sul giudizio di un campione sufficientemente ampio di esperti, ritiene che, per dimensioni tipiche delle sale, il tempo di riverberazione debba essere (i valori sono solo indicativi):

breve (circa 1 secondo) per lezioni e conferenze, nelle quali l'esigenza primaria è quella della intelligibilità del parlato; un riverbero eccessivo porta alla sovrapposizione di sillabe diverse a scapito della comprensione;

medio (da 1 a 1.6 secondi) per opera e musica da camera nella quali è ancora primaria l'esigenza dell'intelligibilità del libretto d'opera e della "tessitura" molto fine della musica romantica e barocca; è tuttavia gradito il contributo di un certo riverbero per i soliti motivi;

lungo (da 1.8 a 2.2 secondi) per musica sinfonica per la quale è primaria l'esigenza di un suono avvolgente in grado di amalgamare, grazie alle riflessioni multiple, il suono proveniente dai vari strumenti dell'orchestra;

molto lungo (3 secondi) per concerti d'organo e canti liturgici (es. canto gregoriano) per i quali le sillabe lunghissime e gli accordi tenuti non determinano problemi di intelligibilità anche per elevati tempi di riverberazione.

Una certa quantità di riverbero è sempre presente in tutti gli ambienti, e, quindi, ci si fa poco caso proprio perché esso è una proprietà "naturale". Il riverbero contribuisce a creare la sensazione di volume dell'ambiente in cui ci si trova, assieme alla percezione visiva, che però è in genere dominante. In realtà il riverbero si fa tanto più notare quanto più ha un impatto acustico negativo. Ciò accade per esempio in ambienti in cui la parola diviene inintelligibile per eccesso di riverbero, o, all'estremo opposto in una camera anecoica, in cui si verifica la condizione di assenza di riverbero. Questo ambiente è spesso percepito come innaturale se non addirittura sgradevole, e mette a disagio il sistema percettivo.

Da cosa dipende il tempo di riverberazione?

-dal volume della sala (sala più ampie costringono il suono riflesso a "tragitti" più lunghi e quindi aumentano il tempo di riverberazione);

-dalle caratteristiche di assorbimento delle pareti e degli arredi, pubblico compreso.

-dalle condizioni di umidità della sala, specialmente nei grandi uditori, dove l'attenuazione dell'energia sonora dovuta all'assorbimento dell'aria non è più trascurabile.

Calcolo del tempo di riverberazione

Un calcolo del tempo di riverberazione non può prescindere da una misurazione accurata dell'assorbimento delle pareti e degli arredi.

Per quantificare l'assorbimento delle pareti sono stati definiti, per i vari tipi di materiale, coefficienti di assorbimento α che rappresentano la frazione di energia assorbita rispetto all'energia incidente. Tali coefficienti adimensionali sono riportati in tabella per molti dei materiali più usati in funzione della frequenza (di solito si assumono le frequenze centrali di bande separate da un'ottava). I dettagli della tabella sono tali che ci permettono di osservare che

il tempo di riverberazione può essere modificato dall'aggiunta di arredi mobili (tendaggi, tappeti, pannelli vibranti...); tali arredi devono però avere dimensioni opportune per evitare di essere *aggirati dalle onde sonore*, per il fenomeno della *diffrazione*, dall'onda sonora;

oltre alle dimensioni degli arredi è importante anche la natura della superficie assorbente (es. in un tappeto il valore del coefficiente di assorbimento è influenzato dalla altezza del pelo).

le superfici dure, ma anche l'acqua, riflettono quasi completamente l'energia incidente (il coefficiente di assorbimento è prossimo allo zero). Se il nostro sistema uditivo non contenesse un ingegnoso sistema di "ossicini", l'onda sonora che colpisce il timpano verrebbe assorbita in misura molto modesta dal liquido cocleare perché subirebbe una riflessione quasi completa;

Per quantificare l'assorbimento dovuto agli arredi è invalso l'uso di esprimerlo mediante un numero S avente le dimensioni di un'area, che fornisce l'area di una finestra "equivalente" in grado di assorbire la stessa quantità di energia sonora dell'arredo in questione. Per la valutazione delle "sezioni di assorbimento" relative alle persone, si tenga presente che la superficie totale di una persona adulta di normale corporatura si aggira sui due metri quadrati.

È facile convincersi che l'assorbimento totale può essere espresso in termini di "area totale equivalente" A pari a

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot A_i + \sum_j S_j \quad (1)$$

essendo A_i l'area della parete di coefficiente α_i e S_j l'area equivalente dell'elemento di arredo j -esimo.

Una prima formula per il calcolo del **tempo di riverberazione** T_R fu proposta nel 1898 al fisico e matematico americano **Sabine**, che può considerarsi uno dei fondatori dell'acustica moderna,

$$T_R = 0.161 \cdot \frac{V}{A}$$

dove V rappresenta il volume della sala e A è l'area totale equivalente calcolata nella (1).

Tale formula, ricavata utilizzando considerazioni statistiche sul libero cammino medio tra due riflessioni, cade evidentemente in difetto per due motivi:

quando i coefficienti di assorbimento tendono a 1 (come succede nelle camere anecoiche, completamente assorbenti) il tempo di riverberazione non tende a zero;

essa cade in difetto in presenza di forte disomogeneità di assorbimento delle pareti.

Una prima correzione fu proposta nel 1930 da *Carl Eyring* assumendo la formula

$$T_R = -\frac{0.161}{\ln(1-a)} \cdot \frac{V}{A} \quad \text{nella quale} \quad a = \frac{A}{S_{TOT}}$$

rappresenta una sorta di coefficiente di assorbimento medio definito com'è, come il rapporto tra l'area totale equivalente e la superficie S_{TOT} delle pareti. Tale formula ha il pregio di far tendere a zero il tempo T_R quando a tende a 1. Inoltre, essa approssima molto bene la formula di Sabine per piccoli valori di a (come ci insegna l'analisi matematica $\ln(1-a) \simeq -a$ per piccoli valori di a).

Un'ulteriore correzione deve essere introdotta per tener conto, soprattutto nei grandi uditori, dell'assorbimento dell'aria. In questi casi si aggiunge al fattore di assorbimento a un contributo proporzionale al volume della sala. **La formula di Eyring** diventa allora

$$T_R = -\frac{1}{\ln(1-(a+\beta V))} \cdot \frac{V}{A}$$

In ogni caso tutte le formule precedenti si sono rivelate non sufficientemente accurate quando, a partire dagli anni Settanta del secolo scorso, il problema del calcolo del tempo di riverberazione è stato affrontato mediante simulazioni assistite dal computer.



Altri fattori per una "buona acustica"

Il tempo di riverberazione non è certo l'unico fattore per la resa acustica ottimale di un ambiente. Un caso di scuola che mostra la complessità della progettazione di un ambiente con le caratteristiche acustiche desiderate è la Philharmonic Hall del Lincoln Center a Manhattan (immagine a lato).

La sala, pur avendo un tempo di riverberazione sostanzialmente corretto, risultò letteralmente disastrosa dal punto di vista delle qualità acustiche.

Per elencarne solo alcuni la sala presentava numerosi difetti:

un'apparente assenza delle frequenze basse; i violoncelli e i contrabbassi si sentivano appena ed in estremo ritardo. Si scoprì poi che i pannelli del soffitto, quelli responsabili delle prime e più importanti riflessioni, erano troppo piccoli e venivano letteralmente aggirati (*diffrazione*) dalle

frequenze più basse, senza quindi rifletterle; lo spettatore veniva raggiunto dalle basse frequenze solo dopo riflessioni multiple delle pareti, con molto ritardo;

gli orchestrali si sentivano appena gli uni con gli altri (la parete riflettente alle loro spalle, retaggio dell'antica scena, assorbiva troppo);

la geometria delle pareti era tale da determinare fenomeni di focalizzazione dell'energia sonora in alcuni punti della sala (si pensi ad uno specchio parabolico che concentra l'energia in un fuoco) e vere e proprie "ombre sonore" in altri;

il pavimento della sala non era molto inclinato e il suono passava sopra la testa degli spettatori. Gli spazi tra le file erano tali da comportarsi come risonatori e facevano curvare le onde sonore a bassa frequenza verso l'alto. Insomma, un disastro!!

Una possibile fonte di disomogeneità del campo sonoro riverberato può nascere dalla formazione di onde stazionarie. Il confinamento di un'onda determina onde stazionarie aventi frequenze appartenenti ad un insieme discreto. Le frequenze devono soddisfare ad una condizione di quantizzazione che, nel caso di stanza a forma di parallelepipedo di dimensioni A, B e C, sono date da

$$f = \frac{v_{suono}}{2} \cdot \sqrt{\frac{n_x^2}{A^2} + \frac{n_y^2}{B^2} + \frac{n_z^2}{C^2}}$$

I modi di vibrazione permessi nella stanza sono caratterizzati dall'insieme dei tre numeri interi n_x , n_y , n_z . Variando i tre numeri uno alla volta possiamo costruire la tabella di tutte le possibili frequenze di risonanza.

ove $V = A \cdot B \cdot C$ è il volume della sala.

È facile fare interferire due suoni?

Si riserva il termine "interferenza" al caso di una sovrapposizione tra onde che avvenga con le seguenti modalità:

le onde che si sovrappongono sono onde periodiche di uguale frequenza (ed eventualmente ampiezza);

le sorgenti delle onde oscillano in fase, cioè in modo perfettamente sincrono, o comunque con uno "sfasamento" noto;

quando si parla di interferenza costruttiva (o distruttiva) ci si riferisce sempre all'interferenza totalmente costruttiva (o distruttiva);

Sotto tali ipotesi il fenomeno di interferenza avviene in modo che, fissato un punto nello spazio, esso è sede di interferenza sempre costruttiva, o sempre distruttiva, in modo invariante nel tempo.

In definitiva il problema principe dell'interferenza è di stabilire, note le posizioni delle sorgenti, le frequenze di oscillazione e gli eventuali sfasamenti, se un dato punto dello spazio è sede di interferenza costruttiva o distruttiva. Se invece anche una sola delle ipotesi viene a mancare, l'interferenza si complica e le onde si sovrappongono senza produrre regolarità facili da analizzare quantitativamente.

Nel caso delle onde sonore è molto difficile ottenere sorgenti aventi le caratteristiche sopra descritte e mantenere per un tempo sufficientemente lungo (per poter compiere osservazioni) le

condizioni di interferenza distruttiva o costruttiva. Tale difficoltà sperimentale fu superata da un'osservazione di Herschel che ebbe l'idea di far interferire due onde provenienti dalla stessa sorgente facendole sovrapporre dopo aver loro imposto di percorrere cammini diversi.

Un interferometro a riflessione: il tubo di Kundt

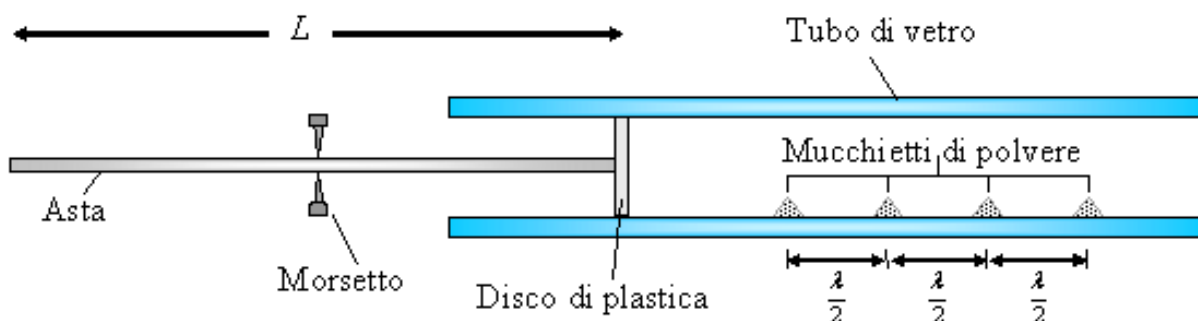
L'idea alla base del funzionamento del tubo di Kundt è di sfruttare il fenomeno della riflessione del suono per far interferire le onde sonore (generate da un disco di plastica vibrante) e le onde riflesse dall'estremità del tubo (aperta o chiusa). L'apparato sperimentale consiste

di una sbarra di metallo recante all'estremità un disco di plastica di massa trascurabile;

di un morsetto per fissare il centro della sbarra di metallo e vincolare tale punto ad essere un nodo dell'oscillazione della sbarra;

di un tubo di vetro in cui far scorrere il disco di plastica in modo da modificare la "lunghezza efficace" del tubo;

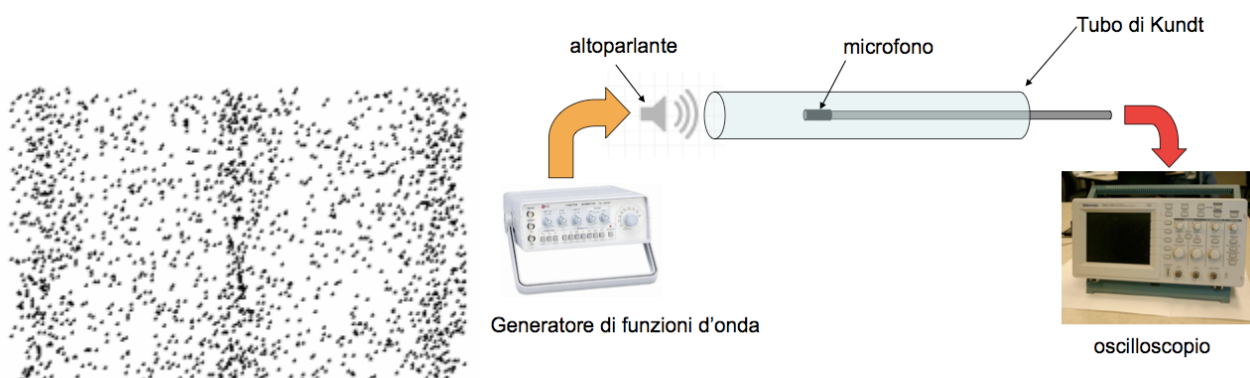
di polvere a grana fine sparsa all'interno del tubo di vetro con la funzione, seguendo le variazioni di pressione sonora all'interno del tubo, di depositarsi in prossimità dei nodi di oscillazione.



Per eseguire concretamente l'esperienza occorre seguire i seguenti passi:

per prima cosa si strofina la sbarra con un panno intriso di resina in modo da eccitarne le onde longitudinali;

tali oscillazioni, comunicate al leggero disco di plastica, fanno sì che esso agendo da stantuffo sull'aria contenuta nel tubo, generi un'onda sonora longitudinale;



facendo scorrere il disco di plastica avanti ed indietro si ricerca la posizione in cui nel tubo inizia a comparire un'onda stazionaria: ciò è rilevato dal fatto che la polvere fine inizia a depositarsi in punti ben precisi ed equidistanti tra loro (sono i nodi in cui vi è assenza di oscillazione);

<https://www.youtube.com/watch?v=3dKvGaZ5lQ>

misurando la distanza tra due nodi successivi è possibile risalire alla lunghezza d'onda dell'onda stazionaria e verificare che valgono le condizioni di quantizzazione.

L'informazione relativa alla lunghezza d'onda può essere sfruttata in due modi:

assumendo come nota la velocità del suono in aria (misurata per altra via) è possibile ovviamente risalire alla frequenza dell'onda stazionaria e quindi alla frequenza di oscillazione longitudinale della sbarra, che è ovviamente la stessa (ricorda che la frequenza non cambia nell'interfaccia disco di plastica-aria!). Ricordando poi che la frequenza fondamentale di oscillazione f_0 di una

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

sbarra longitudinale di lunghezza L e densità ρ è data da

la conoscenza di f_0 può servire a valutare il modulo di Young del materiale di cui è fatta la sbarra.

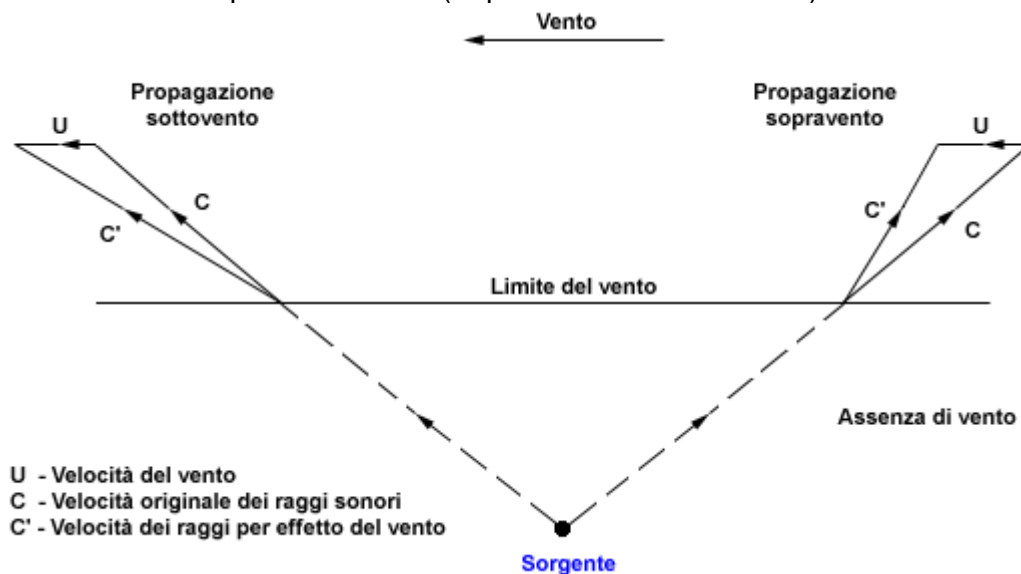
assumendo invece come note frequenze proprie della barra (e quindi delle oscillazioni longitudinali dell'aria) è possibile risalire, di nuovo, alla velocità del suono.

Effetto del vento

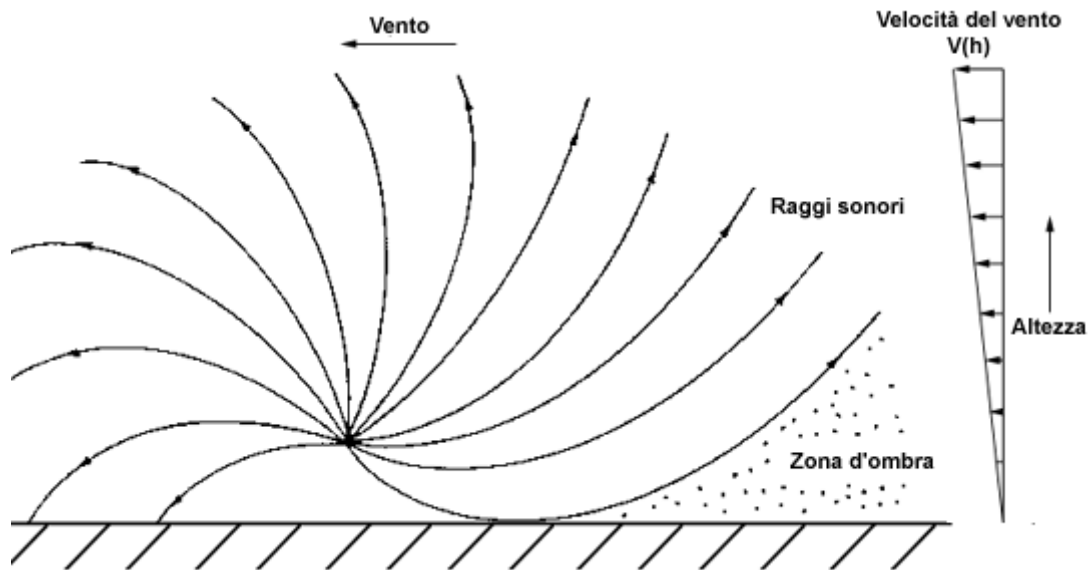
I fattori che invece influenzano la propagazione del suono in ambienti esterni sono sicuramente legati alla presenza di barriere o superfici tra la sorgente ed il ricevitore, ma, per una corretta analisi delle onde sonore, vanno considerati anche i fenomeni ambientali.

Anche il vento, come la temperatura, può influire notevolmente sull'andamento dei raggi sonori. Quest'ultimo "soffia ad una velocità più bassa vicino al suolo e più elevata ad alta quota. La differenza tra queste due velocità induce una *rifrazione*. Nel caso in cui la direzione delle onde sonore è uguale alla direzione in cui soffia il vento, queste verranno rifratte verso il basso. Se la direzione è opposta le onde saranno rifratte verso l'alto".

In presenza di vento infatti la **velocità del suono e quella del vento si sommano** come composizione vettoriale. In realtà, il vento può trasportare il suono solo quando la velocità del vento è confrontabile con quella del suono (e questo è abbastanza raro).



Il vento inoltre può **CURVARE i raggi** sonori. Infatti, in presenza di un gradiente di velocità al variare della quota fa sì che i raggi sonori curvino sottovento.



Questa curvatura data dal vento porta alla formazione di una zona d'ombra sopravento e di una zona in cui il suono "piove" sottovento.

Per tenere conto di questi fenomeni esiste la normativa ISO-9613/2 che descrive i metodi di calcolo appropriati. Tale normativa risulta però estremamente complessa, tanto da risultare praticamente inapplicabile senza l'utilizzo di calcolatori avanzati.

Per semplificare il calcolo considero sempre la condizione di sottovento e quindi immagino i raggi sonoro sempre curvati verso il basso. In genere si utilizza un raggio di curvatura di 2000 o 3000 metri. In ogni caso, la curvatura del raggio sonoro si apprezza solo quando la distanza di propagazione è confrontabile con il raggio di curvatura scelto.

2. Riferimenti Bibliografici

- 1) http://fisicaondemusica.unimore.it/Riflessione_del_suono.html

Sul sito "Fisica onde musica", è spiegato esaurientemente il fenomeno della riflessione, in particolare quella delle onde sonore. Il sito è molto chiaro ed è stato per noi di forte ispirazione per i collegamenti tra gli argomenti trattati.

- 2) http://www0.mi.infn.it/~camera/lab-fisica/dispense/Kundt_2013.pdf

Utile per una descrizione teorica ed illustrativa del Tubo di Kundt.

- 3) <https://www.youtube.com/watch?v=3dKvGaZA5IQ>

Funzionamento del tubo di Kundt rappresentato in un video.

- 4) http://fisicaondemusica.unimore.it/Acustica_architettonica.html

Ulteriore approfondimento proposto dal sito sopra citato riguardante l'argomento: Acustica Architettonica.

- 5) http://www.hk-phy.org/iq/sound_wind/sound_wind_e.html

Sito proposto dal Prof. Milotta nelle slide.

6) <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense01/florio130494/florio130494.htm>

approfondimento sulla propagazione di onde sonore in ambienti esterni.

3. Argomenti Teorici Trattati

- La riflessione, rifrazione e diffrazione del suono e le sue implicazioni;

La **riflessione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda che colpisce la superficie di separazione tra due mezzi di propagazione differenti. Incapace di attraversare tale superficie, l'onda viene deviata. Affinché un suono che incontra un ostacolo sia riflesso, è necessario che la sua lunghezza d'onda sia molto più piccola dell'ostacolo. In ogni caso il suono riflesso perderà una parte della sua energia che dipende dal materiale della superficie con cui si scontra. Se in certi ambienti si vuole evitare la riflessione, si ricorre a materiali detti fonoassorbenti. Anche se le condizioni per la riflessione sono soddisfatte, la maggior parte dell'energia verrà comunque assorbita.

La **rifrazione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda causata da una variazione nella velocità di propagazione della stessa. La velocità varia se cambia la temperatura, oppure se cambia il mezzo di propagazione.

La **diffrazione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda che incontra un ostacolo. Nel tentare di superarlo l'onda si allarga o si «spezza». Affinché un'onda sonora che incontra un ostacolo o una fenditura sia diffratta, è necessario che la sua lunghezza d'onda sia molto più grande dell'ostacolo o fenditura.

- Eco;

Uno dei fenomeni più noti dovuti alla riflessione è quello dell'eco. Esso consiste nella sensazione che un suono emesso da una sorgente in una direzione, venga rimesso dopo un certo tempo da un'altra sorgente nella direzione opposta. Affinché l'essere umano possa apprezzare l'eco, non basta che l'onda venga riflessa. Serve che la superficie riflettente si trovi ad una certa distanza dalla sorgente!

- Riverbero;

Se la superficie riflettente è a distanza inferiore di 17m, il suono originale e il suono riflesso si sovrapporranno. A livello percettivo si avvertirà un aumento di intensità e/o di distorsione. Questo fenomeno prende il nome di riverbero. L'acustica delle sale si ottiene studiando e sfruttando il fenomeno del riverbero; In musica spesso si usa il riverbero per arricchire le melodie.

- Approfondimento: Does sound travel with the wind?

Il vento trasporta le parole? Solitamente il vento soffia ad una velocità più bassa vicino al suolo e più elevata ad alta quota. La differenza tra queste due velocità induce una rifrazione. Nel caso in cui la direzione delle onde sonore è uguale alla direzione in cui soffia il vento, queste verranno rifratte verso il basso. Se la direzione è opposta le onde saranno rifratte verso l'alto. Per questo si ha l'impressione che il vento «trasporti» le parole. In realtà le onde vengono deviate e non trasportate.