

Suono e rumore: una differenza “spettrale”

In questo articolo divulgativo proponiamo un viaggio nell'affascinante mondo dei suoni, dalla generazione alla percezione, ai parametri che permettono di distinguere un suono da un rumore. Esaminiamo i motivi per cui lo stesso suono viene percepito in modo diverso se ascoltato all'aperto, in una piccola stanza o in un grande salone, dai quali si ricavano le caratteristiche ottimali dei materiali da usare per realizzare un teatro e una sala da concerto. Infine, spieghiamo perché le onde sonore si propagano con diverse velocità e diverse intensità in aria, nei liquidi o nei materiali solidi, e come possiamo ottenere una stima quantitativa del rumore proveniente dalla stanza attigua alla nostra

DOI 10.12910/EAI2015-062

■ D. Murra, G. P. Gallerano, P. Di Lazzaro

“Il suono viene percepito da tutti i sensi. I profumi, i colori e i suoni si rispondono”

Charles Baudelaire, 1857

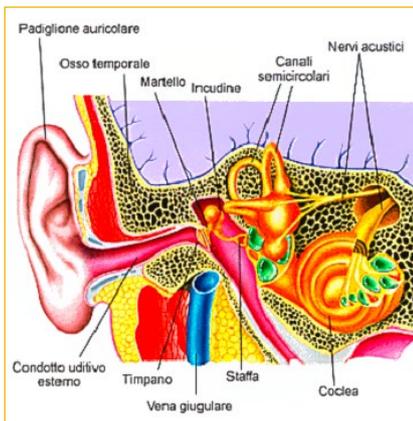


FIGURA 1 Sezione del sistema uditivo umano. Il condotto esterno convoglia le onde sonore alla membrana del timpano, facendolo vibrare. Il timpano trasmette la vibrazione agli ossicini (incudine, martello e staffa) che agiscono da leva e aumentano l'ampiezza dell'onda di pressione trasmessa ai liquidi della coclea
Fonte: tratto da <http://sonoriscausa.over-blog.com> e rielaborato dagli autori

Suoni, voci, rumori ci accompagnano quotidianamente sin dalla nascita, ed è quindi naturale domandarsi che cosa è il suono? Come arriva alle nostre orecchie? Qual è la differenza tra suono e rumore? La velocità e l'intensità del suono sono le stesse in un gas, in un liquido o in un solido? Come si calcola l'intensità sonora delle voci e dei rumori dei vicini di casa? Si possono ascoltare suoni provenienti da altri pianeti? Quando espiriamo, l'aria nei polmoni viene spinta dal diaframma verso la laringe dove si trovano le corde vocali [1]. Nel pronunciare una parola, le corde vocali vengono messe in vibrazione in modo talmente rapido che le molecole d'aria ricevono una spinta e trasmettono l'impulso alle molecole vicine. Questo movimento crea una zona dove le molecole di aria sono più dense

(perché sono state spinte ad avvicinarsi) e di conseguenza una zona in cui le molecole sono meno dense (perché le molecole che si sono avvicinate tra loro lasciano uno spazio vuoto dietro a sé). In questo modo si crea un'oscillazione periodica di zone di aria più dense seguite da zone meno dense, ovvero una “onda di pressione” che si propaga sempre più lontano, fino ad arrivare alle nostre orecchie (vedi la Figura 1) entrare nel condotto uditivo e infine urtare la membrana del timpano, che comincia a vibrare. Il timpano trasmette le sue vibrazioni ad alcuni ossicini che le amplifi-

Contact person: Paolo Di Lazzaro
paolo.dilazzaro@enea.it

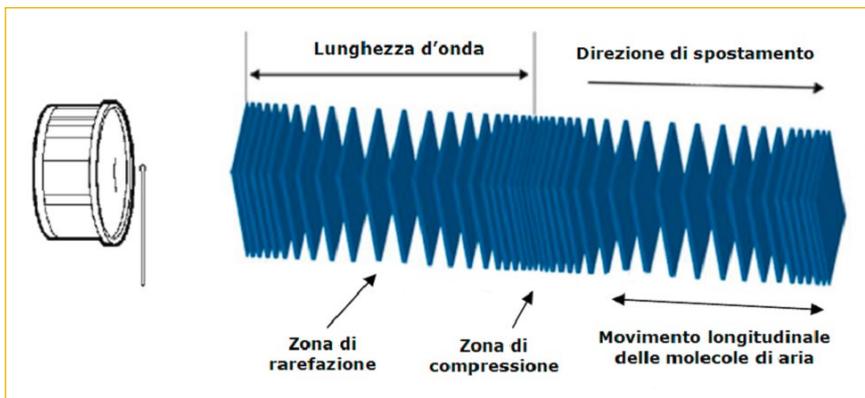


FIGURA 2 Quando un tamburo viene percosso, la membrana si deforma e comincia a vibrare, trasmettendo una spinta oscillante alle molecole di aria vicine. Questa spinta crea l'alternanza di zone di aria compressa (densa) e di zone di aria rarefatta (meno densa). Si tratta di un'onda di pressione longitudinale (cioè oscilla lungo la direzione di propagazione) la quale spinge l'aria fino alle nostre orecchie, dove il sistema uditivo (vedi Figura 1) genera impulsi bio-elettrici modulati, che vengono decodificati in zone specializzate del cervello per generare la percezione uditiva

Fonte: disegno tratto da howstuffworks.com e rielaborato dagli autori

cano e le trasmettono alla coclea [2], dove le vibrazioni meccaniche sono convertite in impulsi elettrici. Questi impulsi bio-elettrici sono infine trasmessi dai nervi acustici fino a giungere ai centri ed alle aree corticali dove si realizza la decodifica degli impulsi elettrici e nasce la sensazione uditiva. In sintesi, quindi, il suono è la percezione a livello cerebrale di un'onda di pressione meccanica che colpisce il timpano.

Tutti i fenomeni sonori si comportano in un modo simile alla voce: all'inizio c'è un impulso che genera la deformazione di un materiale il quale comincia a vibrare (ad esempio le dita che bussano sulla porta, le eliche che muovono l'acqua dove sono immerse, un tamburo percosso). La sorgente vibrante trasmette una spinta oscillatoria alle molecole del mezzo (acqua, aria) a contatto, creando una variazione di densità delle molecole, che

corrisponde ad una disuguaglianza di pressione che genera il movimento dell'onda sonora fino a giungere alle nostre orecchie, come mostrato nell'esempio della Figura 2.

È interessante notare che la propagazione dell'onda di pressione sonora comporta una propagazione di energia, ma senza uno spostamento di materia, la quale oscilla intorno alla posizione che aveva prima di essere investita dall'onda.

Il tipo di suono (acuto, grave, forte, debole) dipende dalla frequenza e dall'ampiezza della vibrazione. Infatti, se busso su due porte di uguale dimensione ma realizzate con materiali diversi (ad esempio una porta di legno e una di metallo) queste vibrano con diverse frequenze e ampiezze, a causa della diversa struttura ed elasticità di legno e metallo, e quindi producono suoni diversi.

Quando due strumenti musicali differenti emettono la stessa nota, con la stessa ampiezza e frequenza fondamentale, il nostro orecchio percepisce due suoni differenti. Ciò che consente di distinguere i due strumenti è il "timbro" ovvero l'effetto della somma di diverse frequenze emesse contemporaneamente dallo strumento musicale. Quando suoniamo, ad esempio, la nota "La" della quarta ottava del pianoforte, ascoltiamo un'onda che vibra a 440 cicli al secondo (Hz), ma anche onde a 880 Hz, 1320 Hz e così via, ovvero frequenze che risultano multiple di quella fondamentale a 440 Hz che vengono chiamate "armoniche". Nell'insieme delle armoniche emesse suonando una particolare nota, troviamo altre note che si trovano nella scala musicale: ad esempio, la nota "Do" di un violino contiene anche il "Mi", il "Sol" ed il "Si bemolle" delle ottave superiori. Le differenti ampiezze di ciascuna delle frequenze emesse da uno strumento rendono l'onda risultante unica, diversa da strumento a strumento.

Tuttavia, anche quando lo stesso strumento viene usato in luoghi diversi, come una sala da concerto o in una cattedrale, noi percepiamo un suono diverso. Il motivo è che lo spazio circostante agisce sul suono riflettendo meglio alcune frequenze ed assorbendone altre, quindi variandone il timbro. In pratica, gli oggetti più piccoli della lunghezza d'onda dell'onda sonora (ad esempio, una sedia o una colonna) sono "aggirati" dalla stessa onda che si propaga quasi indisturbata, mentre gli oggetti

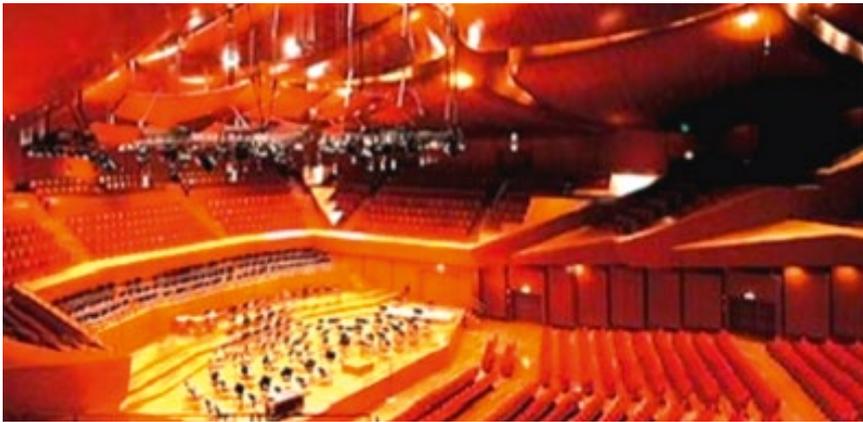


FIGURA 3 Foto della sala Santa Cecilia dell'Auditorium di Roma. Il controsoffitto è formato da 26 gusci in legno di ciliegio, ognuno dei quali ha una superficie media di 180 metri quadri. Il legno riveste anche platea e gallerie contribuendo a rendere la sala una cassa armonica con l'acustica ottimale per i concerti, con un tempo di riverbero di 2,2 secondi
Fonte: Tratto da [4]

più grandi (ad esempio una parete) assorbono e in parte riflettono l'onda sonora, in modo diverso alle varie frequenze a seconda delle caratteristiche del materiale. Di conseguenza, quando si progetta una sala bisogna tener conto di una notevole quantità di variabili (i materiali e la forma di pareti, soffitto, poltrone, galleria, platea, la posizione dell'auditorio rispetto al palco, il volume della sala) che vanno scelte con molta attenzione, in modo da trovare le condizioni ottimali di ascolto calcolando il livello sonoro, il tempo di riverbero, l'intelligibilità. I valori ottimali di questi parametri, tuttavia, variano a seconda della destinazione d'uso della sala. Uno dei parametri più importanti è il riverbero, ovvero la persistenza del suono oltre la durata impressa dalla sorgente sonora, causato dalle riflessioni multiple delle onde sonore da parte delle pareti della sala. Per

evitare di ascoltare l'eco di una parola di breve durata, è necessario che la durata del riverbero sia breve, inferiore a un decimo di secondo che è l'intervallo di tempo minimo necessario all'orecchio umano per distinguere due suoni. Viceversa, se si desidera rinforzare e prolungare il suono di uno strumento, è conveniente avere un tempo di riverbero maggiore. La legge empirica di Sabine [3] ci dice che il tempo di riverbero è proporzionale al volume della sala e inversamente proporzionale alla superficie delle pareti riflettenti e al coefficiente di assorbimento medio delle stesse pareti. In una sala per conferenze, un cinematografo o un teatro in cui bisogna migliorare l'intelligibilità delle parole pronunciate dagli attori, il tempo di riverbero ottimale è minore di un decimo di secondo, e di conseguenza la sala deve avere un volume piccolo, con pareti ampie

e assorbenti. Viceversa, una sala per musica classica il cui tempo di riverbero ottimale è maggiore di un secondo avrà pareti meno assorbenti ed un volume maggiore [3], vedi la Figura 3.

Oltre ai suoni, esistono onde sonore meno piacevoli, i rumori. Che differenza c'è tra suono e rumore?

Il rumore corrisponde a un'onda di pressione irregolare, non periodica, che oscilla con molte frequenze diverse tra loro. Il suono di una nota musicale invece corrisponde ad un'onda di pressione con un profilo di intensità periodica, che si ripete in modo regolare in un certo intervallo di tempo.

Nel caso della voce umana, le consonanti (soprattutto la labiodentale "f", l'alveolare "s", le occlusive bilabiali "p" e "b" e le occlusive dentali "t" e "d") vengono articolate unendo o avvicinando le labbra o i denti, in modo che l'aria, diffratta dall'ostacolo, fuoriesca producendo onde irregolari aventi uno spettro di frequenze molto ampio, e quindi sono percepite come rumori.

La "r" introduce una vibrazione rapida, mentre pronunciando la "n" la risonanza della bocca è fortemente smorzata a favore della risonanza della cavità nasale. Viceversa, le vocali ("a", "e", "i", "o", "u") sono suoni selezionati cambiando forma e ampiezza della bocca, che funge da cavità risonante rinforzando alcune frequenze e assorbendone altre.

Ad esempio, nella Figura 4 è riportata la successione temporale delle onde di pressione della voce umana maschile durante la pronuncia della parola "barca" registrate con un personal computer.

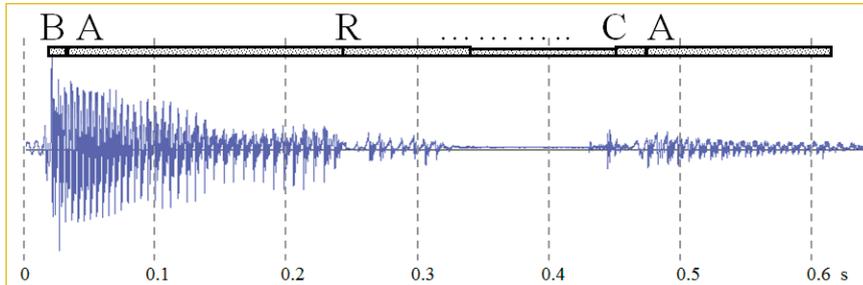


FIGURA 4 Onde sonore della voce umana mentre pronuncia la parola 'barca', registrata al computer. In ascissa, la scala temporale è in secondi
Fonte: elaborazione ENEA

Nella Figura 4 la consonante bilabiale "b" sembra possedere una certa regolarità, ma la sua pronuncia si esaurisce nei primi 25 millisecondi, dopodiché inizia a comporsi l'oscillazione della vocale "a". Questa è ancora poco regolare, ma contiene una certa periodicità: ovvero, una singola oscillazione è diversa da quelle che la precedono o la seguono, ma esiste un gruppo di oscillazioni che si ripete periodicamente. La "r", invece, e ancor più la "c" dura, mostrano una scarsa periodicità ed hanno una forma irregolare dovuta alla somma di molte frequenze. La "r" viene pronunciata dopo circa 250 millisecondi dall'inizio della parola, poi c'è un intervallo di latenza dei suoni che riprendono con la "c" dura a 450 millisecondi dall'inizio. Anche il rumore "c" dura poche decine di millisecondi, per far posto alla "a" finale poco intensa, che si smorza lentamente.

In un altro esempio, la consonante alveolare "s" ha un'evoluzione temporale estremamente più densa e disordinata della labiodentale "f", come mostrato nella Figura 5.

Il suono della voce di un cantante, o ancora meglio di uno strumento musicale, produce una oscillazione periodica e regolare della pressione dell'aria. Ad esempio, nella Figura 6 è riportata la vocale "a" cantata emessa ad una frequenza di circa 110 Hz, la stessa vocale alla frequenza di 220 Hz e la nota "La" (a 110 Hz) emessa dalla corda di una chitarra.

Confrontando la Figura 5 con la Figura 6, osserviamo che il suono cantato della lettera "a" è molto più regolare, periodico e costituito da poche frequenze rispetto alle consonanti. Il suono emesso da uno strumento musicale, oltre ad avere un'elevata periodicità, appare più regolare della voce umana, ovvero ha un minor numero di frequenze "estranee", ragione per cui l'ascolto della musica risulta gradevole [5].

Osservando l'onda della vocale "a" a 220 Hz e quella della nota "La" a 110 Hz nella Figura 6 viene da chiedersi perché a due frequenze differenti corrispondano due oscillazioni simili. Il motivo è che la corda della chitarra oscilla sia 110 volte al secondo, sia a frequenza

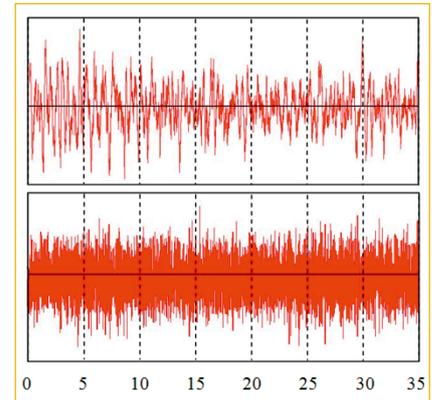


FIGURA 5 Onde sonore emesse dalla voce umana durante la pronuncia delle consonanti "f" (in alto) ed "s" (in basso). In ascissa, la scala temporale è in millisecondi
Fonte: elaborazione ENEA

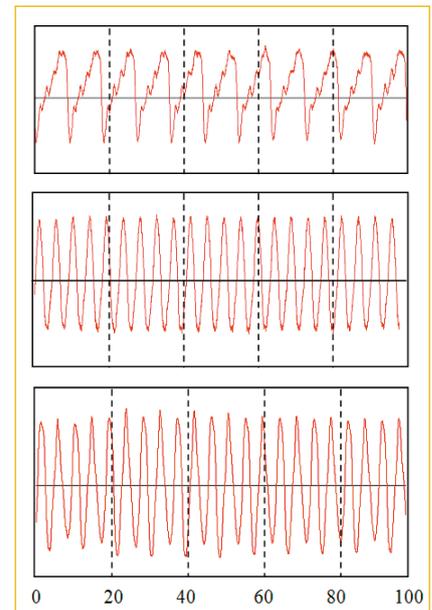


FIGURA 6 Dall'alto in basso: "a" cantata a 110 Hz; "a" cantata a 220 Hz; la nota "La" a 110 Hz emessa dalla corda di una chitarra. La scala temporale in ascissa è in millisecondi
Fonte: elaborazione ENEA

doppia, tripla, quadrupla, etc. con un'intensità paragonabile a quella della frequenza fondamentale, generando un suono dal timbro caldo e armonioso. Viceversa, uno strumento a fiato come il flauto produce poche armoniche aventi bassa intensità, generando un suono dal timbro fluido e semplice.

A quale velocità si propaga il suono? Nei libri di Fisica troviamo che la velocità del suono è data dalla radice quadrata della variazione della pressione al variare della densità del mezzo (i dettagli sono descritti nella nota [6]). Quindi, la velocità del suono dipende dalla densità e dalla comprimibilità del mezzo (gassoso, liquido, solido) in cui il suono si propaga. Intuitivamente, maggiore è la densità delle molecole, maggiore è la pressione necessaria a muoverle. Ed è facile capire che maggiore è la comprimibilità (capacità delle molecole di avvicinarsi, riducendo il volume occupato), maggiore è la spinta che viene utilizzata per avvicinare le molecole, rallentando il processo di spostamento dell'onda di pressione.

Le sostanze solide e liquide si possono comprimere poco, perché le loro molecole e atomi sono già molto vicini, e quando una forza cerca di comprimerli intervengono forze repulsive che si oppongono all'avvicinamento. Al contrario, i gas sono caratterizzati da una grande distanza tra molecole, e possono essere compressi facilmente. Ad esempio, l'acqua ha una densità 770 volte maggiore e una comprimibilità 15.000 volte minore dell'aria. Di conseguenza, la minore comprimibilità dell'acqua

compensa e supera l'effetto della maggiore densità rispetto all'aria, e la velocità del suono nell'acqua è di 1.410 metri al secondo (m/s), più di quattro volte superiore alla velocità del suono nell'aria che a 15 °C è di 340 m/s [7].

I solidi sono più densi ma meno comprimibili dei liquidi, sicché la velocità del suono in un solido è più elevata. Ad esempio, nel rame la velocità del suono è circa 4.500 m/s e nel legno è circa 3.400 m/s. Stiamo parlando di velocità ragguardevoli, di alcuni km al secondo!

Oltre ad essere più veloce, l'onda di pressione sonora nei liquidi e nei solidi è anche molto più intensa che nell'aria, perché la pressione aumenta come il prodotto densità del mezzo per il quadrato della velocità del suono [6]. Per questo motivo è possibile ascoltare rumori e voci della stanza accanto se appoggiamo l'orecchio alla parete! Infatti, le onde sonore della stanza si propagano in aria e raggiungono la parete, che assorbe una parte dell'onda di pressione e quindi comincia a vibrare. La parete trasmette la vibrazione all'aria della nostra stanza fino ad arrivare al nostro orecchio. In questa doppia interfaccia (aria-parete della stanza accanto, parete-aria della nostra stanza) viene perduta gran parte dell'intensità dell'onda sonora, che quindi risulta attenuata e poco percepibile. Viceversa, se poggiamo la testa alla parete, le vibrazioni della parete si trasmettono per via ossea al sistema uditivo, con una maggiore velocità (e quindi maggiore intensità) rispetto all'aria.

Proviamo a dare una stima quantitativa della percezione dell'on-

da sonora generata nella stanza accanto. Consideriamo una voce maschile a 125 Hz ad un livello sonoro di 60 decibel (dB) [8]. La parete in mattoni assorbe circa il 3% dell'intensità sonora a 125 Hz, e dalla definizione di dB abbiamo che la parete assorbe 45 dB (il calcolo esplicito si trova nella nota [9]). Quindi, poggiando la testa sul muro, una persona nella stanza accanto può ascoltare un livello sonoro di circa 45 dB, equivalente a piccoli rumori in ambiente domestico. Attaccati al muro si ascolta una voce molto meno intensa di quella percepita da una persona nella stanza accanto, vicino a chi parla, ma la voce è ancora udibile. Appena ci stacciamo dal muro, poiché la seconda interfaccia parete-aria trasmette a sua volta circa il 3% del livello di intensità dell'onda sonora assorbita dalla parete, il livello sonoro scende a circa 30 dB, equivalente al sussurro percepito a circa 1 m di distanza, e quindi il riconoscimento delle parole diventa difficile.

In questa stima grossolana, per semplicità abbiamo trascurato alcuni parametri, ad esempio le riflessioni multiple dell'onda sonora sulle pareti (che aumentano l'assorbimento della parete), la dipendenza dell'assorbimento della parete dalla frequenza della voce (per cui le voci femminili vengono mediamente più assorbite di quelle maschili), le curve isofoniche e le curve di compensazione (che tengono conto dello spettro di sensibilità dell'udito). Di conseguenza i valori numerici sono approssimati, ma comunque indicativi del fenomeno.

Rimane un'ultima curiosità: cosa accade al suono quando non c'è aria o altro mezzo dove propagarsi? In questa situazione si trovano gli astronauti che fanno una "passeggiata spaziale" fuori dalla navicella. Nel vuoto interplanetario, senza atomi e molecole, le vibrazioni dell'astronave non possono "spingere" nulla, quindi non c'è onda di pressione, e nessun suono si propaga fino al timpano

dell'astronauta. Nello spazio regna il silenzio assoluto.

E allora, diffidate dei film di fantascienza dove l'inquadratura di un'astronave nello spazio è accompagnata dal roboante rumore dei motori...

**Daniele Murra, Gian Piero Gallerano,
Paolo Di Lazzaro**

ENEA, Dipartimento Fusione e tecnologie
per la Sicurezza Nucleare - Laboratorio Sorgenti,
Antenne e Diagnostiche



bibliografia e note

- [1] Le corde vocali possono essere messe in vibrazione solo quando c'è un passaggio d'aria. Anche quando proviamo a cantare a bocca chiusa, c'è comunque una espirazione attraverso il naso. Infatti, se chiudiamo bocca e naso, non riusciamo ad emettere nessun suono
- [2] La coclea è la parte più complessa dell'organo uditivo, il cui funzionamento non è ancora stato compreso nei più intimi dettagli a livello molecolare. La coclea si compone di tre canali membranosi avvolti a spirale attorno ad una formazione ossea centrale. Il canale che occupa la rampa vestibolare e quello che occupa la rampa timpanica confluiscono a livello dell'apice della spirale miscelando i loro liquidi (perilinfia). Tra i due dotti membranosi, vestibolare e timpanico, è ospitato il dotto cocleare, che contiene un secondo liquido -endolinfa- e infine la struttura più sofisticata dell'orecchio, l'organo del Corti, una sorta di motore bio-elettrico dove le cellule ciliate producono impulsi elettrici tramite trasduzione meccanico-elettrica. L'energia bio-elettrica raggiunge la cellula gangliare, dove avviene una rimodulazione del segnale che viene quindi inviato ai nuclei cocleari ventrali e dorsali. In pratica la coclea funziona come una pila elettrica, e di conseguenza il mantenimento di un gradiente elettrochimico è garantito dalla ricchezza di potassio nella endolinfa e di sodio nella perilinfia. Per una introduzione elementare al funzionamento della coclea, vedi ad esempio [http://it.wikipedia.org/wiki/Coclea_\(anatomia\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Coclea_(anatomia))
- [3] Vedi ad esempio E. Moretti: "Acustica architettonica" http://www.crbnet.it/fisicacatecnica/didattica/lezioni/edilizia/l.acustica_architettonica.pdf
- [4] <http://www.auditorium.com/it/auditorium/la-struttura>
- [5] Per una analisi acustica dettagliata della voce umana, vedi ad esempio http://fisicaondemusica.unimore.it/Voce_umana.html
- [6] La velocità v del suono è data dalla radice quadrata della derivata della pressione rispetto alla densità del mezzo in cui si propaga l'onda sonora: in formula, $v = (dP/d\rho)^{0.5}$, dove dP è la variazione di pressione P generata dall'impulso iniziale e $d\rho$ è la variazione della densità ρ del mezzo dovuta al movimento delle molecole del mezzo stesso. Nel caso del gas, tramite la relazione $dP/d\rho = \gamma P/\rho$ possiamo calcolare la velocità del suono come $v = (\gamma P/\rho)^{0.5}$ dove γ è un numero il cui valore varia da $\gamma = 1,7$ a $\gamma = 1,3$, a seconda dei gradi di libertà delle molecole gassose. Poiché la lunghezza d'onda sonora è molto più grande del cammino libero medio delle molecole del mezzo possiamo utilizzare l'equazione adiabatica per calcolare la velocità del suono, in quanto nell'onda non c'è un passaggio di calore rilevante. L'equazione adiabatica nel caso di un gas si può scrivere come $PV^\gamma = \text{costante}$, dove V è il volume del mezzo. Utilizzando l'equazione della velocità del suono, l'equazione adiabatica e la legge dei gas perfetti, dopo qualche passaggio matematico otteniamo $v = v_{\text{media}} \times (\gamma/3)^{0.5}$ dove v_{media} è la velocità media delle molecole del gas. Quindi, la velocità del suono è pari a poco più della metà della velocità media delle molecole che costituiscono il gas
- [7] Dalla nota [6], sappiamo che la velocità del suono v è proporzionale all'inverso della radice quadrata della densità del mezzo. All'aumentare della temperatura, la densità diminuisce e quindi aumenta v . Alla temperatura $T = 0$ °C in aria a pressione $P = 1$ atmosfera e $\gamma = 1,4$, abbiamo $v = (\gamma P/\rho)^{0.5} = 331$ m/s. Per calcolare v alle altre temperature possiamo usare la legge empirica $v = (331 + 0,6T)$ m/s per cui a 15 °C abbiamo $v = 340$ m/s mentre a 20 °C $v = 343$ m/s
- [8] La minima intensità sonora che riusciamo a percepire è pari a $I_0 = 10^{-12}$ W/m². Il nostro udito percepisce i suoni in ragione del logaritmo della loro intensità I . È stata perciò adottata una scala di percezione sonora in decibel (dB) definita come il logaritmo dell'intensità sonora normalizzata alla minima intensità percepibile, moltiplicata per 10. In formula, $I_{\text{dB}} = 10 \times \log(I/I_0)$. Essendo l'intensità sonora I proporzionale al quadrato della pressione meccanica P dell'onda sonora, possiamo riformulare la definizione di dB sonori come $I_{\text{dB}} = 10 \times \log(P/P_0)^2 = 20 \times \log(P/P_0)$, dove $P_0 = 3 \times 10^{-5}$ Pa è la pressione corrispondente all'intensità I_0 . Quando un suono/rumore è al limite di udibilità, $I = I_0$ ($P = P_0$) e abbiamo $I_{\text{dB}} = 0$
- [9] Invertendo l'equazione nella nota [8] che definisce I_{dB} , abbiamo che 60 dB corrispondono ad una intensità sonora $I = 10^{-6}$ W/m². Il 3% di I corrisponde quindi a 3×10^{-8} W/m². Ponendo questo valore nella equazione $I_{\text{dB}} = 10 \times \log(I/I_0)$ otteniamo $I_{\text{dB}} = 44,7$ dB, che nel testo approssimiamo a 45 dB