

# Caratteristiche funzionali del sistema uditivo

Il suono è prodotto da un qualsiasi corpo vibrante che sia immerso in un mezzo elastico come l'aria o l'acqua; nel vuoto assoluto non ci può essere uno stimolo sonoro. Quindi, quello che si trasmette è una variazione di pressione che ha un'andamento sinusoidale nel tempo (vedi Fig: 1). Tale onda ha tre caratteristiche importanti: La frequenza l'ampiezza e il timbro. La frequenza si misura in cicli al secondo o Hertz (Hz). Da un punto di vista percettivo, la frequenza dello stimolo sonoro è correlata con l'altezza del tono: le alte frequenze corrispondono a toni alti e le basse a toni bassi. La frequenza è un parametro molto importante dello stimolo sonoro ed i centri nervosi dell'udito sono organizzati topograficamente sulla base delle frequenze a cui i neuroni sono più sensibili. Nel secolo scorso il fisico Ohm fu il primo a sostenere che il principio fondamentale alla base del funzionamento del sistema uditivo è rappresentato dalla scomposizione dei suoni nelle loro frequenze costituenti. Secondo Ohm, il sistema uditivo esegue un'analisi di Fourier dei segnali sonori scomponendoli nelle varie frequenze di cui sono costituiti. Il secondo

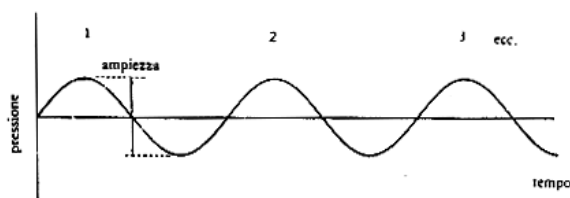


Figura 1: Onda pressoria: i suoi parametri fondamentali sono l'ampiezza e la frequenza.

parametro fondamentale della sinusoide è l'ampiezza, che corrisponde percettivamente all'intensità del suono ed è rappresentata dalla distanza fra il picco dell'onda ed il punto di minore pressione (vedi Fig: 1).L'intensità dello stimolo sonoro si misura in decibel. Ricordiamo la formula per il calcolo del decibel:

$$1dB = 20 \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right)$$

Dove  $P_t$  rappresenta la pressione in esame e  $P_r$  rappresenta la pressione di riferimento, cioè quella pressione minima media necessaria per ottenere una sensazione sonora con una frequenza ottimale. In fine, una terza caratteristica dell'onda sonora è il timbro che dipende dalla forma della curva, per cui suoni aventi la stessa altezza e la stessa intensità possono differire per il timbro, come avviene quando la stessa nota è eseguita da strumenti diversi.

Il sistema uditivo periferico (vedi fig: ??) comprende l'orecchio e i neuroni primari le cui fibre formano il nervo cocleare. Si possono schematicamente individuare tre parti (o unità funzionali) distinte:

- L'orecchio esterno.
- L'orecchio medio.
- L'orecchio interno.

## 1 L'orecchio esterno

L'orecchio esterno (vedi fig: 3) è costituito dal padiglione auricolare e il meato acustico esterno. La porzione esterna e media dell'orecchio rappresentano il sistema di conduzione, che serve a trasmettere il suono dall'aria ai fluidi dell'orecchio interno. Il suono condotto attraverso il meato

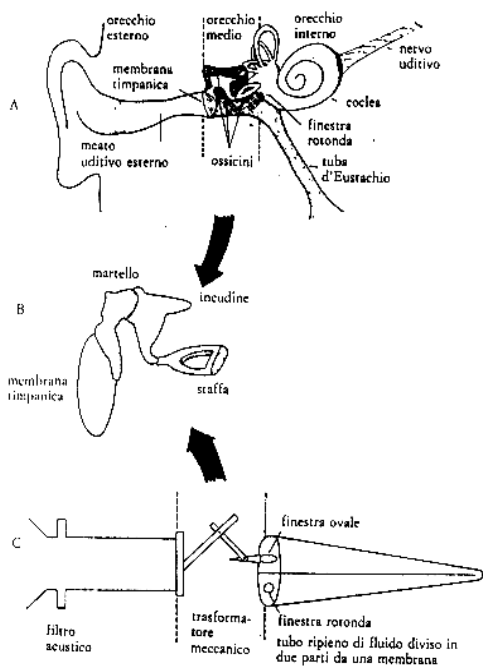


Figura 2: Schema generale dell'orecchio e un equivalente meccanico

acustico esterno fa vibrare la membrana timpanica e queste vibrazioni sono trasferite all'orecchio interno tramite gli ossicini dell'orecchio medio, l'ultimo dei quali detto *staffa* si articola con la *membrana della finestra ovale*, la cui vibrazione mette in movimento vibratorio i fluidi della coclea. Il padiglione auricolare ha la funzione di stabilizzare l'orientamento e regolare l'impedenza del mezzo di trasmissione esterno (aria) rispetto a quello dell'endolinfa presente nel liquido. A tal proposito vale ricordare che quando la vita era presente solo nei mari le onde sonore viaggiavano in un ambiente acqua-acqua (nel senso che non cambiavano mezzo durante la trasmissione e la percezione). Nel corso dell'evoluzione quando gli esseri viventi hanno cominciato a popolare le terre emerse si sono evolute particolari soluzioni (ad esempio Padiglione auricolare) che adattarono l'impedenza del sistema di trasmissione dell'onda acustica alle nuove condizioni di interfaccia aria-acqua. A livello di suoni l'uomo si è trovato a dover recuperare dell'impedenza perduta, l'evoluzione ha comportato la comparsa del meato uditivo (agisce da filtro acustico) e della catena degli ossicini (trasformatore meccanico) come stadi di amplificazione compensativi. Nel dettaglio si è misurato che questi tre stadi (padiglione, meato, ossicini) comportano delle amplificazioni quantificabili in  $6dB$ ,  $12dB$  e  $30dB$ . Semplificando la descrizione possiamo dire che il padiglione in sostanza è un rafforzatore. Il meato uditivo ha una forma particolare, quasi cilindrica, e fondamentalemente agisce da risonatore essendo lungo quattro volte  $\lambda$  lunghezza d'onda media (ci sono 4 nodi).

## 2 L'orecchio medio

L'orecchio medio (vedi fig: 4) è costituito dalla membrana del timpano e dalla catena degli ossicini con le strutture annesse. La membrana timpanica è elastica, separa l'orecchio esterno dall'orecchio medio, ed è collegata al primo elemento della catena degli ossicini. La catena degli ossicini è una struttura costituita da martello, incudine e staffa; la sua geometria basata su giunti mobili tra le sue tre parti la rende particolarmente efficace nell'amplificazione dell'effetto dell'onda sonora sul timpano che viene tradotto direttamente sulla finestra ovale (una membrana elastica alla base

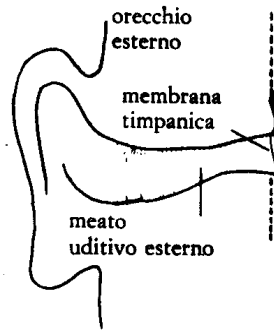


Figura 3: L'orecchio esterno

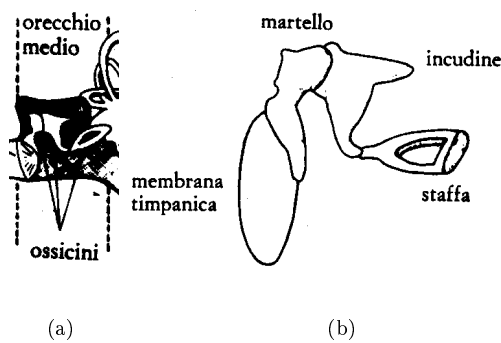


Figura 4: L'orecchio medio (a) e uno schema più dettagliato (b) della catena degli ossicini

della staffa) lo stadio di ingresso della coclea. Se non ci fosse l'orecchio medio la quasi totalità dell'energia sonora sarebbe riflessa e quindi non sarebbe sufficiente a far vibrare i fluidi cocleari. Questo perchè il suono nel passare dall'orecchio medio a quello interno passa da un mezzo ad alta mobilità (l'aria) ad un mezzo di molto minore mobilità (i fluidi della coclea). Il problema è risolto dall'amplificazione meccano-acustica operata dall'orecchio medio che permette la trasformazione del suono in vibrazioni del fluido cocleare.

L'effetto di amplificazione è dovuto alla differenza di superficie esistente tra la membrana timpanica e la finestra ovale. Questo guadagno di pressione serve a vincere la maggiore impedenza del fluido cocleare rispetto all'aria soprattutto a frequenze intorno ai  $4kHz$  in cui l'orecchio umano è più sensibile.

### 3 L'orecchio interno

La coclea rappresenta l'orecchio interno (vedi fig: 5) ed è la responsabile della trasduzione dell'onda sonora in impulso elettrico nervoso, ricopre quindi un ruolo cruciale nell'attività del senso uditivo. Essa è una parte del labirinto osseo e contiene un complesso sistema di canalicoli (il labirinto membranoso). È una struttura ossea grossomodo a chiocciola (labirinto osseo che compie circa tre giri), per la precisione un'elica coloidale, che contiene un liquido (endolinfa) diviso in tre canali da due membrane (la membrana basilare e la membrana di Reissner). Due canali (scala vestibolare e scala timpanica) sono messi in contatto dall'elicotrema un'apertura in prossimità dell'apice

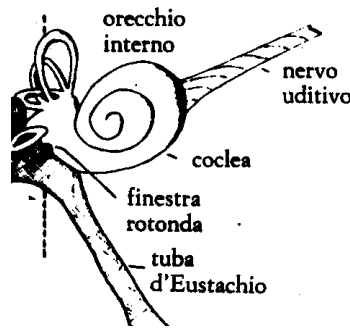


Figura 5: L'orecchio interno

della coclea. La terza regione compresa tra scala vestibolare e scala timpanica é la scala media.

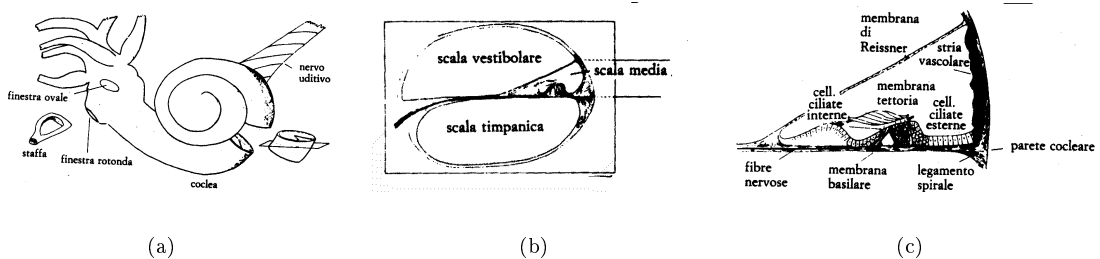


Figura 6: Sezione del cunicolo (a), visione della sezione trasversa (b) e struttura delle cilia nella scala media (c)

Questa zona (vedi fig: 6) contiene delle cellule ciliate puntate contro la membrana di Reissner e disposte sulla membrana basilare. E' fondamentale per le proprietà della coclea che questa abbia tale struttura a spirale. In sostanza la trasduzione del segnale sonoro in impulso nervoso avviene attraverso le suddette serie di ciglia disposte regolarmente sulla membrana basilare. Al sopraggiungere dell'onda di pressione sonora trasmessa dall'endolinfa (nella scala timpanica) queste vengono piegate e di conseguenza eccitate dall'impatto con la membrana di Reissner. Più in dettaglio, a livello meccanico, si formano delle onde di pressione viaggianti lungo la membrana basilare, come accadrebbe a una fune tesa scossa sul piano verticale. A partire dall'ingresso (la finestra ovale), un'onda si propaga nella scala vestibolare, giunge all'elicotrema e passa nella scala timpanica dove agisce sulle ciglia poste sulla membrana basilare. La membrana basilare é caratterizzata da una rigidità variabile (decrescente) lungo la sua lunghezza, il che implica una variazione dell'ampiezza di oscillazione della stessa. Ciascuna frequenza del suono incidente determina un massimo d'ampiezza in un determinato punto della membrana basilare e questo punto si trova tanto più vicino alla base della membrana basilare quanto maggiore é la frequenza dello stimolo acustico fino a un valore massimo di circa 20.000 Hz (vedi fig. 7). Le frequenze basse fanno vibrare le porzioni apicali fino a una frequenza minima di 20 Hz nell'uomo.

Possiamo quindi dedurre di avere di fronte un discriminatore spaziale di frequenze sonore, da ogni punto del quale partono delle terminazione nervose verso il sistema nervoso centrale (corteccia).

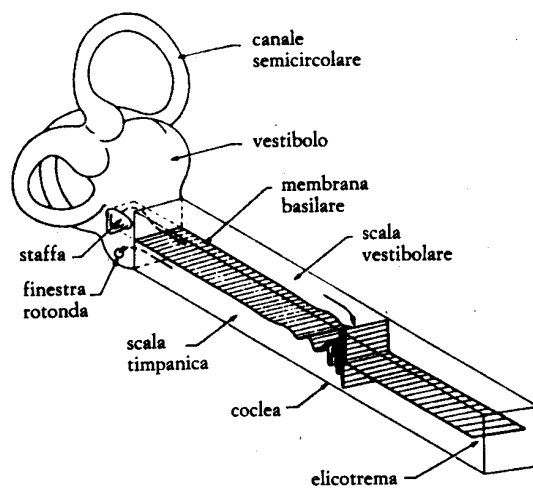


Figura 7: Illustrazione della coclea e del movimento di un'onda lungo la membrana basilare