

Orecchio

Esterno → padiglione. **Medio** → meato uditivo (concavo, $25 \times 7 \text{mm}$) e timpano. **Interno** → coclea, protetto dall'osso temporale.

I tempi più brevi sono elaborati dall'orecchio interno, quelli più lunghi (0,1s) prima dai collegamenti nervosi e poi dalla corteccia.

L'**emisfero sinistro** è per il breve termine, l'**emisfero destro** per il lungo termine (integrazione spaziale).

La **staffa** poggia sulla **finestra ovale** della coclea, sotto c'è la **finestra rotonda**.

Il **timpano** poggia sul **martello**.

Il **vestibolo** è legato alla coclea.

La **tuba di Eustachio** fa da sacca.

I nervi acustici collegano alla corteccia.

Nervo acustico → oliva superiore → follicolo inferiore → genicolato → corteccia uditiva primaria.

L'orecchio sinistro va all'oliva destra e viceversa.

L'orecchio è tarato sui 4kHz .

Il padiglione auricolare *identifica la direzione* del suono tramite ritardi, attenuazioni e cambiamenti di fase (funzione di trasferimento).

Il meato fa da *risonanza* con una banda di 2kHz intorno ai 4kHz di circa 10dB .

La funzione di trasferimento cambia con l'azimut.

Orecchio Medio

Gli ossicini sono tenuti da tendini e pesano pochi mg, la staffa ha una superficie di 5mm^2 .

La staffa sulla finestra ovale si sposta in base all'ampiezza dei suoni, per i deboli sull'asse verticale, per i forti su quello orizzontale.

Gli ossicini si muovono in modo diverso a seconda delle frequenze.

Il gradiente di spostamento del timpano è ideale al centro (10^{-9}cm , dipende dalla frequenza).

La membrana timpanica è a forma conica.

I muscoli (tensori del timpano sul martello e muscolo stapeideo sulla staffa) di protezione agiscono con 40ms di latenza (per suoni maggiori di 70dB).

Aumentando di rigidità diminuiscono l'ampiezza delle vibrazioni (controllo di sensibilità).

Riducono anche l'effetto mascherante delle basse frequenze.

Il riflesso acustico attenua di circa 15dB irrigidendo il meccanismo, serve a ridurre anche il mascheramento in situazioni rumorose. L'effetto è limitato dai tempi di reazione.

Impedenza

L'orecchio medio fa da *adattatore di impedenza* tra aria e liquido.

Resistenza: $\sqrt{\rho \cdot \text{elasticità}}$ di aria e acqua)

$$R_{\text{acqua}}/R_{\text{aria}} = 3880 = W_{\text{acqua}}/W_{\text{aria}}$$

$$P_{\text{acqua}}/P_{\text{aria}} = \sqrt{3880} = 62 \rightarrow 35 \text{dB di perdita.}$$

Gli ossicini lavorano come leve.

Ciò che permette la conduzione delle vibrazioni nei liquidi è il rapporto tra superficie timpanica e staffa (14:1). La superficie del timpano è 35mm^2 , la finestra ovale 2.5mm^2 .

L'impedenza aumenta con l'elasticità e la massa ed è inversamente proporzionale alla frequenza. Il timpano ha alto smorzamento (4ms).

Impedenza acustica $Z=R^2+(2fM-K/(2f))^2$. Con R attrito coclea, M massa ossicini e K rigidità del sistema ossicini.

Impedenza meccanica $Z=(2\pi M-(E/(2\pi f)))^2+Rm$. Con Rm attrito

L'impedenza totale è minima quando la componente reattiva è minima, cioè quando le componenti in valore assoluto si annullano a una certa frequenza $f=\sqrt{(E/(2\pi M)} \rightarrow 1/(2\pi)\sqrt{(K/M)}$, la frequenza di risonanza.

L'adattamento non è omogeneo su tutte le frequenze (meno efficace su basse e alte).

L'impedenza dei liquidi riflette l'energia acustica (35dB, cioè il 99%).

La reattanza è quasi nulla dopo 1KHz, a quelle alte è positiva (grazie agli ossicini).

Quindi alle basse frequenze serve più ampiezza per l'udibilità.

La conduzione ossea si avverte solo per suoni corporei (quelli esterni sono attenuati di 50dB), in particolare le basse frequenze.

Coclea

L'orecchio interno si trova nella coclea, lunga 35mm e divisa da due membrane in tre compartimenti contenenti liquido (3 rampe).

La **rampa media** divide la rampa **vestibolare** da quella **timpanica**.

La staffa batte sulla vestibolare.

Ogni punto della coclea risponde a una certa frequenza.

La coclea è stretta alla base e larga sulla punta (da 0,04mm a 0,5mm), le frequenze basse sono verso la punta.

La scala timpanica è collegata alla vestibolare con l'elicotrema che si trova sulla punta.

La **membrana basilare** è costituita da fibre via via più lunghe che vibrano come uno strumento.

Alla base della scala vestibolare c'è la **membrana tectoria** sotto cui si trova l'organo del Corti con i suoi ricettori cigliati: questo è il tratto cocleare.

Le cellule cigliate sono collegate al nervo acustico.

Sulla membrana basilare si formano **onde viaggianti** le cui forme dipendono dalla frequenza e dall'intensità.

Il massimo spostamento della membrana non avviene progressivamente ma viene raggiunto improvvisamente al punto di attivazione, al di là del quale declina rapidamente.

La membrana basilare si comporta come un filtro passa banda con *sintonia fine*.

Non è solo un processo meccanico ma anche attivo.

Al variare dell'ampiezza vengono inviati più impulsi sul nervo ma non in modo proporzionale all'aumento.

La coclea è sull'asse osseo del modiolo.

Le rampe vestibolari e timpaniche contengono **perilinf**.

La rampa media contiene **endolinf** che è ricca di potassio.

Organo Del Corti

3k moduli lungo la membrana, composti da cellule cigliate che trasformano le vibrazioni in segnali elettrici.

I movimenti della membrana deformano l'organo.

La **membrana basilare** é sottostante, l'onda arriva dalla scala timpanica.

La **membrana di Reissner** divide il tratto cocleare dalla scala vestibolare.

Ogni modulo ha **1** cellula cigliata interna e **3** esterne. Queste stanno ai lati opposti del tunnel di Corti.

Le cellule cigliate sono ricoperte da stereociglia nella parte apicale.

Le ciglia sono collegate da tip link per avere un meccanismo a molla.

Le CCE nelle sono poste sulle cellule di Deiters e le ciglia più lunghe sono ancorate alla membrana.

La CCI é collegata a una decina di fibre nervose.

Le CCE sono a cilindro, le CCI a pera.

Le CCE non sono assicurate alla tectoria, le CCI si.

Le ciglia delle CCI non sono appoggiate alla membrana, ascoltano i movimenti del fluido.

Le **CCE amplificano** l'onda sonora, le **CCI traducono** in messaggio nervoso.

Le CCE hanno la funzione di amplificare le oscillazioni della membrana basilare, la maggior parte dei segnali va dal cervello a queste cellule. Fanno un'amplificazione specifica per la frequenza -> sintonia fine.

L'amplificazione data dalle CCE é più alta per le alte frequenze di poca intensità, questo introduce un effetto di non linearità.

Ci sono un centinaio di ciglia per cellula disposta su 3 file a V ogni filo con ciglia di lunghezza diversa.

Le deflessioni delle ciglia creano depolarizzazione (verso l'esterno) e iperpolarizzazione (verso l'interno).

Ci sono circa **16k** CCE: hanno ciglia più numerose e base alla base della membrana.

Ci sono due componenti elettriche: una continua per lo stimolo acustico e una alternata che riproduce la frequenza.

Le ciglia sono nell'endolinfa (con più **K**), il corpo nella perilinfina (con più **Na**) .

Il potenziale a riposo delle cellule é **-53/-70mV**, nell'endolinfa **80mV** (differenza di 150mV).

Con la depolarizzazione che avviene quando le ciglia spostandosi fanno passare cariche elettriche, viene contratta la cellula.

La risposta elettrica delle CCI dipende dalla frequenza del suono, è possibile tracciarne curve isofoniche con forte selettività in frequenza.

La depolarizzazione è proporzionale all'ampiezza della stimolazione fino a un limite di saturazione.

La dinamica di un neurone é **40dB**-> non si può rappresentare la dinamica di un suono, di questo si occupano le CCE, poi ci sono neuroni che si attivano solo ad alte soglie.

Le cellule si mantengono in stato di contrazione parziale e accentuano le risposte di stimoli lievi.

La coclea equalizza i livelli di stimolazione acustica, sopprime i toni vicini meno intensi, accentua la risposta nell'attacco di un tono, caduta della risposta alla fine di un tono.