

Capitolo X

Udito

ASPETTI ANATOMICI

L'apparato uditivo è caratterizzato da un *sistema uditivo periferico* (costituito dall'orecchio e dall'organo uditivo del Corti) e da un *sistema uditivo centrale* (costituito dai nuclei superiori e dalla corteccia uditiva). L'orecchio è la parte meccanica del sistema e viene generalmente diviso in: *orecchio esterno* che raccoglie e convoglia gli stimoli sonori, *orecchio medio* che amplifica lo stimolo e *orecchio interno* che contiene l'organo del Corti sede dei recettori uditivi. Questi ultimi sono formati da cellule ciliate che effettuano un'analisi frequenziale dello stimolo e, attraverso le loro terminazioni assoniche, convogliano l'informazione uditiva al *ganglio spirale*. Da questo, attraverso il *nervo cocleare*, l'informazione raggiunge i nuclei del tronco encefalico e quindi attraverso l'*VIII nervo cranico* arriva alla corteccia cerebrale uditiva (figura X.1). Il sistema uditivo è caratterizzato oltre che da vie afferenti, anche da numerose vie efferenti, che fanno parte ancora dello *VIII nervo cranico* e vanno a modificare direttamente la risposta dei recettori e il "guadagno" di amplificazione dello orecchio medio.

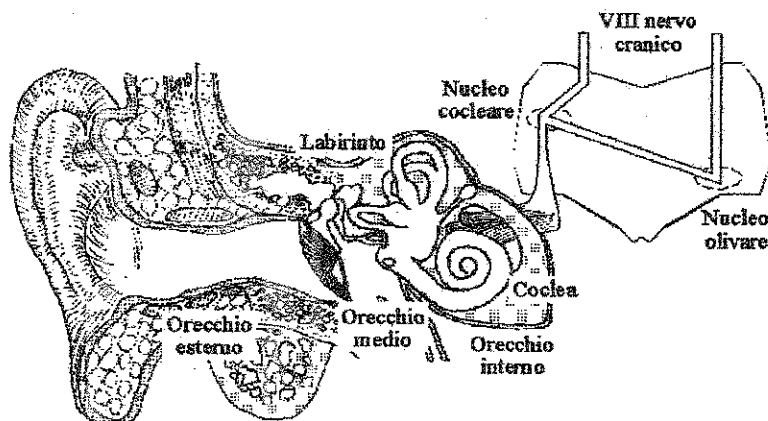


FIGURA X.1 Schema generale del sistema uditivo e vestibolare.

In stretta relazione col sistema uditivo troviamo il *sistema vestibolare* deputato alle funzioni di equilibrio del nostro corpo e alla rilevazione dei movimenti dello stesso. Esso è parte integrante dell'orecchio interno ed è caratterizzato essenzialmente dai *canali semicircolari*, dall'*otricolo* e dal *sacculo*. Le terminazioni nervose del sistema vestibolare fanno parte delle fibre del *nervo vestibolare* e raggiungono l'encefalo attraverso l'*VIII nervo cranico*.

Il sistema uditivo periferico

Orecchio ESTERNO

Esso è caratterizzato esternamente da una piega cutanea concava sporgente dal piano cranico detta *conca*, che continua in una formazione fibrocartilaginea leggermente ellittica che prende il nome di *padiglione auricolare*, il quale si sviluppa intorno alla conca stessa; internamente, la conca prosegue con un canale irregolare chiamato *canale acustico esterno*, il quale raggiunge l'osso temporale in prossimità del timpano (figura X.2).

Il padiglione auricolare è costituito da uno scheletro cartilagineo rivestito di uno strato di pelle sottile ed aderente. Esso presenta fossette e sporgenze, la cui funzione è legata direttamente al convogliamento dei suoni all'interno del canale uditivo e alla percezione della direzione della sorgente sonora esterna all'organismo. È dotato inoltre di fibre muscolari che nell'uomo sono poco sviluppate. Dal punto di vista etnologico o antropologico è importante il rapporto percentuale tra la larghezza e la lunghezza del padiglione auricolare che viene chiamato *indice auricolare* ed è al pari delle impronte digitali o dell'arcata dentaria diverso da individuo a individuo.

Il canale acustico esterno è un piccolo, stretto e tortuoso canale, lungo circa 2-3 cm, ha una forma irregolarmente cilindrica ed ha un diametro compreso tra i 4.5 e i 9 mm; nel primo tratto sale e poi scende bruscamente a formare una punta, dopo ha un decorso più regolare e leggermente in discesa. La sua funzione primaria è quella di convogliare l'onda sonora verso il timpano, ma al tempo stesso, grazie alla sua forma irregolare e alla produzione di cerume ha una funzione protettiva che impedisce ad insetti o corpi estranei di introdursi nel canale e produrre lesioni permanenti.

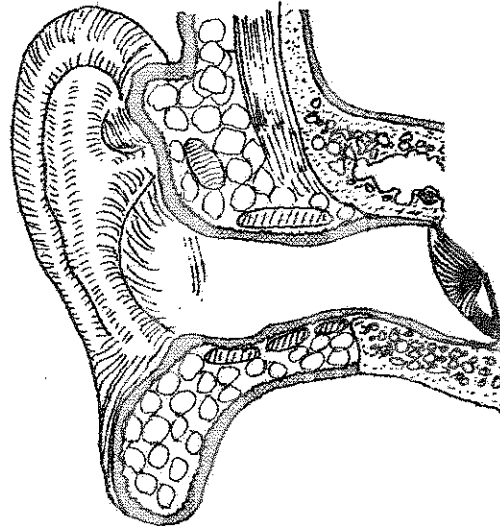


FIGURA X.2 Schema dell'orecchio esterno. Da sinistra troviamo il padiglione, la conca, il canale acustico esterno e il timpano.

Orecchio medio

L'orecchio medio, o cassa timpanica è una camera d'aria scavata nello spessore dell'osso temporale ed è posta in fondo al condotto uditivo esterno, da cui è separata dalla *membrana del timpano* (figura X.3). La parete esterna è costituita da un anello osseo rivestito da una mucosa che in corrispondenza del condotto uditivo forma il timpano. La membrana timpanica è sottile e trasparente, ha una forma circolare di circa 1 cm di diametro ed appena 1 mm di spessore, ha una forma ad imbuto con l'incavo rivolto verso l'interno, un colore tipico grigio-perla ed una disposizione quasi verticale. Le caratteristiche principali di questa membrana sono l'elasticità e la resistenza, tuttavia se esposta a rumori forti ed improvvisi o se corpi acuminati la raggiungono può essere forata o lesa gravemente, producendo sordità permanente.

Sulla parete anteriore invece si apre il piccolo orifizio che comunica con la parte alta della cavità orale, il canaletto di comunicazione è detto *tromba d'Eustachio* e raggiunge la cavità orale nella alta faringe, nel retro della bocca. Questo canale ha una grande importanza nella funzione uditiva, in quanto permette di mantenere la stessa pressione da ambo i lati del timpano, il quale può svolgere a pieno la sua funzione di membrana vibrante, poiché non viene compresso verso l'interno dalla pressione atmosferica. L'esempio tipico di utilizzo della tromba di Eustachio (per ristabilire l'equilibrio pressorio) è dato dall'azione di compensazione durante le immersioni in apnea; se non venisse pompata aria dalla bocca nella cavità timpanica, la pressione esterna porterebbe alla rottura della membrana stessa.

La parete interna ha una forma prominente in quanto confina con la chiocciola del labirinto. In questa parete sono presenti le vie di comunicazione tra l'orecchio medio e quello interno: la *finestra ovale* e la *finestra rotonda*. Queste sono aperture nella parete ossea della chiocciola, chiuse da una membrana vibrante che separa l'aria dell'orecchio dai liquidi interni alla coclea.

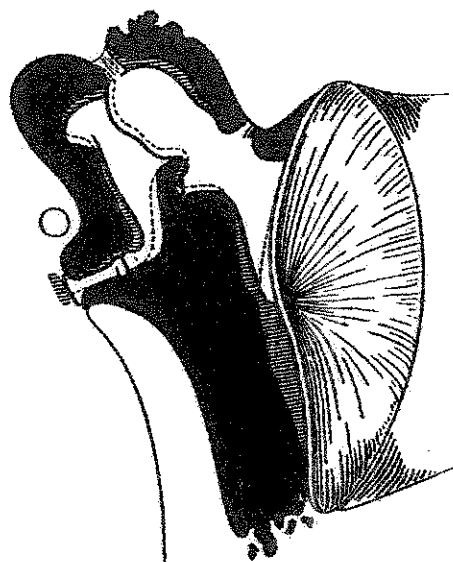


FIGURA X.3 Schema dell'orecchio medio. A destra troviamo il timpano (ombreggiato) su cui appoggia il martello, il quale si poggia sull'incudine e questo spinge la staffa nella finestra ovale (staffa, incudine e martello sono disegnati in bianco, mentre i tratteggi indicano i loro spostamenti).

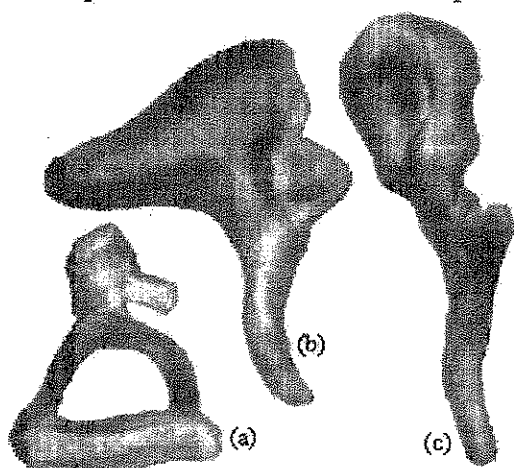


FIGURA X.4 Fotografia dei tre ossicini della catena ossea acustica. (a) Staffa. (b) Incudine. (c) Martello.

Dal punto di vista uditivo la parte più importante è il sistema di amplificazione meccanico, rappresentato dalla catena di tre ossicini disposti nello spazio compreso tra il timpano e la finestra ovale; tale catena assicura la continuità ossea attraverso articolazioni mobili. I tre ossicini sono detti *martello*, *incudine* e *staffa*, a causa della forma (figura X.4). Il martello è formato da un manico rivolto verso il timpano con il quale viene a contatto, da un collo e da una testa che si articola con l'incudine. L'incudine è costituito da una articolazione con il martello e da due punte laterali (apofisi) che si articolano con la testa della staffa. La staffa è formata da una testa alla quale sono

attaccate due branche legate ad un unico piede il quale, inserendosi nella finestra ovale, trasmette le vibrazioni all'orecchio interno. Le articolazioni sono rese mobili da muscoli specializzati che controllano sostanzialmente il guadagno di amplificazione in relazione alla stimolazione nervosa efferente proveniente direttamente dal livello superiore. Questa catena ossea può essere bloccata da uno stato patologico detto *otosclerosi*, nel quale si ha una crescita abnorme dell'osso intorno alla catena

stessa; in tale condizione la catena non può vibrare e nessun suono riesce ad arrivare all'orecchio interno (tale patologia è curabile con intervento chirurgico di fenestrazione, nel quale viene staccata la catena dal timpano e viene riaperta la finestra ovale dotandola di una membrana artificiale).

ORECCHIO INTERNO

Esso è scavato nello spessore della rocca petrosa dell'osso temporale della scatola cranica. Spesso è chiamato anche *labirinto*, in quanto la sua struttura è costituita da molteplici canali e cavità che si intersecano in modo complesso (figura X.5). La funzione dell'orecchio interno non è esclusivamente uditiva; infatti può essere distinto in due parti, ognuna delle quali svolge una funzione: il *labirinto anteriore* che ha funzione uditiva ed è costituito essenzialmente dalla *chiocciola* o *coclea*, e il *labirinto posteriore* che ha le funzioni di presiedere (insieme al cervelletto) all'equilibrio e al movimento del corpo ed è formato dall'*apparato vestibolare*.

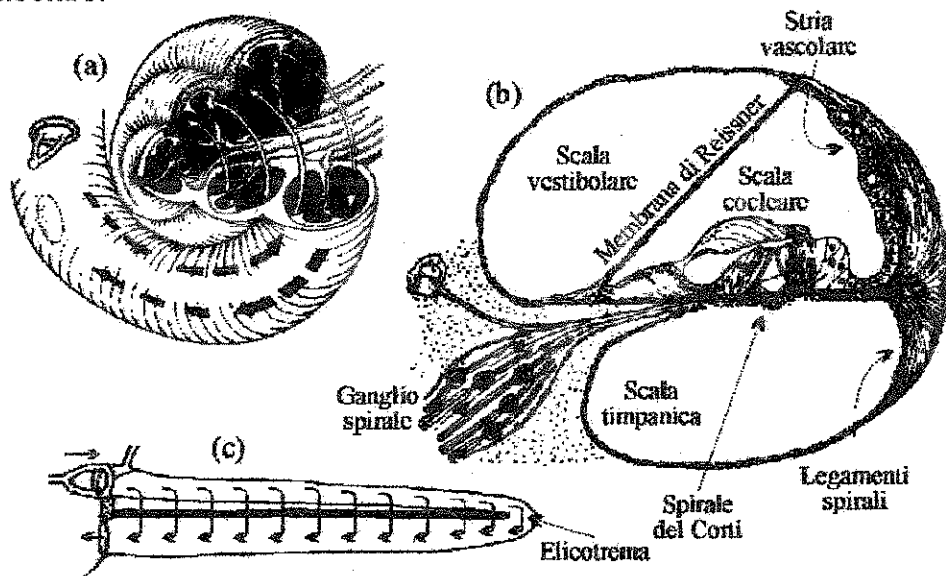


FIGURA X.5 Disegno della coclea o chiocciola. (a) Visione prospettica. (b) Disegno schematico di una sezione transemodiale. (c) Coclea erotolata in cui si vedono la finestra ovale, la finestra rotonda, l'elicotrema e i flussi di pressione prodotti dai suoni.

La coclea è costituita da una formazione conica di tessuto osseo compatto; nel suo centro è posto un perno osseo detto *modiolo*, su cui si avvolge a spirale il canale cocleare per tre giri e per una lunghezza complessiva di 25-30 mm. Esso è diviso in tre setti (figura X.5a): la *scala vestibolare*, la *scala timpanica* e la *scala cocleare* o *media*; ognuno dei quali è riempito di liquido limpido, incolore e con bassa viscosità, detto *liquido endococleare*. Tali liquidi prendono nome diverso a seconda della scala che riempiono: il liquido della scala vestibolare e timpanica è chiamato *perilinf* ed è ricco di ioni sodio, mentre quello della scala cocleare è chiamato *endolinf* ed è ricco di ioni potassio.

La scala vestibolare e la timpanica sono separate da una membrana ossea, esse si aprono rispettivamente sulla finestra ovale e su quella circolare, e vengono in contatto alla sommità della coclea (vicino al modiolo) attraverso un'apertura circolare chiamata l'*elicotrema* (figura X.5c). Le tre aperture sono fondamentali per la funzione uditiva, infatti i liquidi endococleari sono incompressibili, dunque se non vi

fossero pareti elastiche non si avrebbero variazioni pressorie; l'elicotrema ha anche la funzione di smorzare le vibrazioni a frequenza molto bassa, di annullare le pressioni continue e di accelerare il processo di ripristino dell'equilibrio pressorio in modo da ridurre i disturbi.

La scala cocleare è costituita da un canale membranoso (*membrana di Reissner*) situato all'interno della vestibolare (figura X.5b). La scala cocleare si apre nel vestibolo in corrispondenza della finestra ovale, al suo interno è contenuto l'organo uditivo chiamato *spirale del Corti*, poggia sulla *membrana basilare* o *basale*.

LA SPIRALE DEL CORTI E I RECETTORI Uditivi

La spirale del Corti è l'organo uditivo ed è rappresentato in dettaglio in figura X.6. Esso è poggia sulla membrana basale, la quale è costituita da una parte liscia ed una filamentosa, è molto aderente alla lamina ossea e aumenta di spessore e rigidità allontanandosi dal modiollo. La membrana basale si estende tra la lamina spirale e la

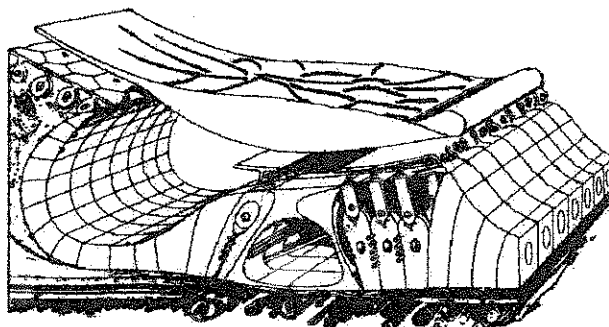


FIGURA X.6 Disegno schematico dell'organo del Corti.

parete della chiocciola, essa dunque rappresenta la struttura portante dell'epitelio uditivo e si trova in condizione di poter vibrare. L'altra struttura portante dell'epitelio uditivo è la *galleria del Corti* costituita da cellule pilastro che formano un elemento triangolare cavo, riempito di cortilinfia (simile alla perilinfia) e su cui si adagiano lateralmente le cellule recettrici ciliate (figura X.6). Intorno ai recettori uditivi si trova una vasta popolazione di cellule di sostegno (cellule di Hensen, di Deiters, di Claudius, cellule interdentali) il cui insieme forma l'epitelio uditivo. Sopra l'epitelio uditivo, a sfiorare i sensori delle cellule uditive, è posta la *membrana tectoria*, essa ha una natura proteica e filamentosa che le permette di rimanere sospesa e libera di vibrare; la sua funzione è quella di amplificare le onde pressorie dell'endolinfa, al tempo stesso permette alle ciglia dei recettori di rimanere in tensione e di attenuare i disturbi esterni.

Le *cellule acustiche* o recettori acustici sono costituiti da un corpo inserito all'interno dell'epitelio uditivo ed emergono nell'endolinfa con un gruppo di ciglia

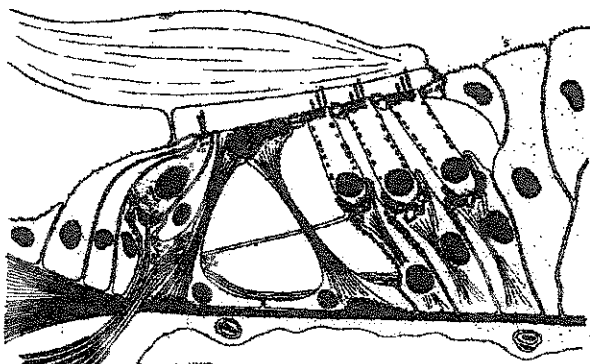


FIGURA X.7 Disegno schematico del tessuto epiteliale uditivo con riferimento alla posizione delle cellule acustiche.

rigide, chiamate *stereociglia* (figura X.7). Sulla base del corpo cellulare è posta la giunzione sinaptica che le lega alle fibre efferenti ed afferenti del *nervo cocleare*. Le cellule acustiche sono posizionate sia sul lato destro che sul lato sinistro della galleria del Corti ed in base a questo vengono chiamate rispettivamente cellule acustiche interne e cellule acustiche esterne (figura X.8).

Le *cellule acustiche esterne* sono circa 13'000 e sono disposte in tre o cinque serie a seconda del giro della coclea. Hanno una forma cilindrica e regolare, hanno molte ciglia (circa 60-100 per cellula), disposte a scalare di numero dalla periferia al centro a forma di "V". La struttura cellulare è caratterizzata da microtuboli, vescicole e mitocondri. La giunzione sinaptica è molto ampia ed avvolge tutta la base cellulare, formando una coppa; in essa sono presenti sia fibre afferenti che efferenti.

Le *cellule acustiche interne* sono circa 3'500, hanno una forma irregolare ed un citoplasma ricco di granuli scuri. Le ciglia di queste cellule sono in numero minore, più rade e di diametro maggiore. La giunzione sinaptica occupa ancora tutta la base della cellula, ma ha una predominanza sul canale afferente.

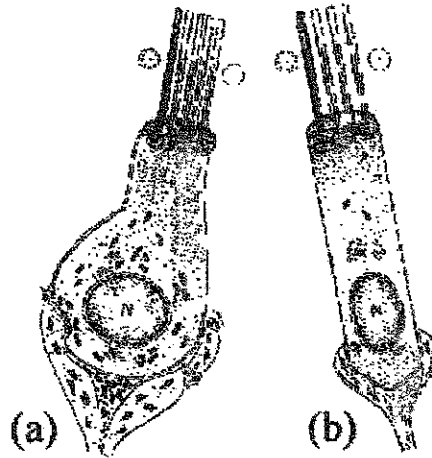


FIGURA X.8 Disegno schematico delle cellule acustiche. (a) Cellule acustiche esterne. (b) Cellule acustiche interne.

Il Ganglio spirale

Le fibre nervose afferenti ed efferenti che partono dalle cellule uditive si allontanano dalla spirale del Corti attraverso un incavo nella lamina spirale (figura X.6), entrano in un condotto che spiralizza verso il modiollo e, giunte in corrispondenza di quest'ultimo, escono come *nervo cocleare*. Prima di spiralizzare verso il modiollo, esse formano il *ganglio spirale*, caratterizzato dal congiungimento di più rami periferici dei neuroni bipolari. Nel ganglio spirale vengono, così, convogliate le informazioni uditive prodotte da più cellule recettrici e viene effettuata la prima elaborazione uditiva, il cui risultato dà origine all'impulso nervoso superiore.

Il sistema uditivo centrale

Il nervo cocleare è la via uditiva che collega il sistema uditivo periferico a quello centrale, esso porta verso il cervello le informazioni raccolte al livello del ganglio spirale e al tempo stesso trasporta le informazioni di retroazione, per il controllo delle risposte dei muscoli dell'orecchio e dei recettori uditivi. I punti nodali di questa via sono rappresentati dai *nuclei del tronco encefalico*, infatti essi rappresentano sia punti di ritorno intermedi in modo da formare circuiti di arco riflesso, sia punti fondamentali per l'elaborazione della

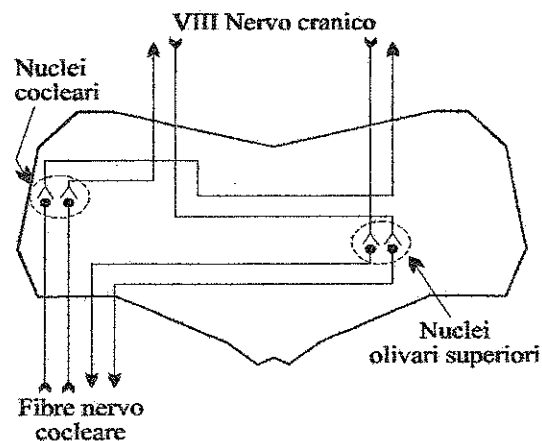


FIGURA X.9 Schema dei collegamenti tra nervo cocleare e VIII nervo cranico nel nucleo cocleare e nel nucleo olivare superiore.

informazione uditiva. I più importanti sono il *nucleo cocleare* e il *nucleo olivare superiore*, formati dalle fibre del nervo cocleare nel punto di innesto con il neurasse (figura X.9). Dal punto di vista anatomico il nucleo cocleare può essere schematizzato come in figura X.10, in cui le fibre bipolari provenienti dal ganglio spinale si ramificano in una struttura dendritica e si agganciano su tre neuroni unipolari distinti, il cui nome rispecchia il tipo di risposta che forniscono: *neuroni di inizio segnale e poi silenti*, *neuroni di inizio segnale e successiva risposta*, *neuroni oscillatori*. Più complessa invece è la struttura dei nuclei olivari superiori in cui convergono fibre motorie e fibre sensoriali (figura X.9); essi sono deputati a produrre gli impulsi retrogradi verso i muscoli timpanici e le cellule recettrici acustiche.

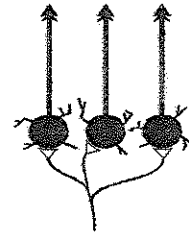


FIGURA X.10 Schema semplificato di collegamento nel nucleo cocleare.

Il sistema vestibolare

Il sistema vestibolare fa parte dell'orecchio interno ed è in particolare localizzato nel labirinto posteriore (figura X.11). Esso è deputato, insieme al cervelletto, alle funzioni di equilibrio e di movimento del corpo. Gli organi fondamentali sono: l'*otricolo*, il *sacculo* e i *canali semicircolari*. I tre organi sono condotti o volumi ossei cavi riempiti di endolinfa, la stessa del canale cocleare.

L'*otricolo* ed il *sacculo* sono paragonabili a due vesciche, il primo di forma ovale e piuttosto allungata, il secondo più sferoidale e più piccolo. La parete di queste vesciche è formata da una membrana fibrosa, la *macula otolitica*, rivestita internamente da uno strato epiteliale, nel quale sono inserite cellule sensoriali e cellule di sostegno. Le cellule sensoriali hanno il corpo immerso nell'epitelio e sporgono nell'endolinfa con un gruppo di *stereociglia*. Su queste ciglia grava la *membrana otolitica*, formata da cristalli di sali di calcio (*otoliti*), il cui peso è maggiore di quello dell'endolinfa (figura X.12).

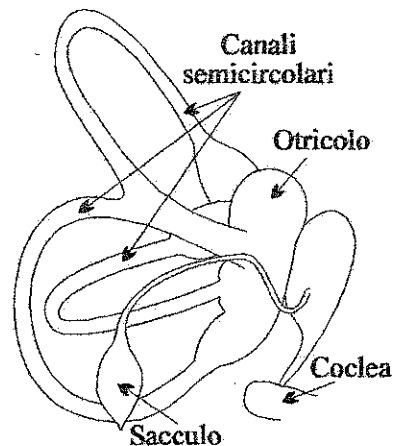


FIGURA X.11 Schema del sistema vestibolare.

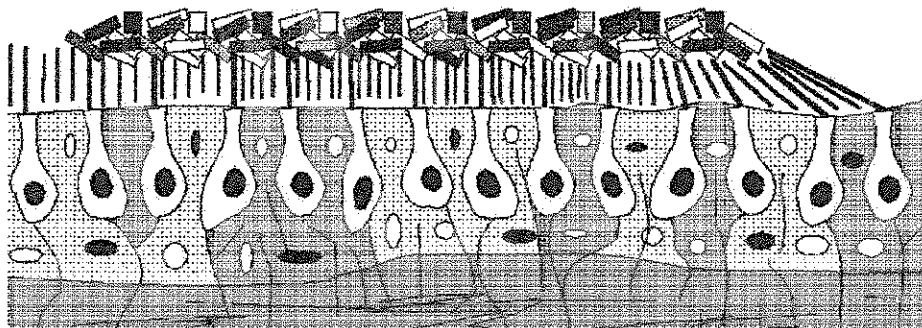


FIGURA X.12 Disegno della struttura dell'epitelio sensoriale dell'otricolo. Le stereociglia sono piegate dal movimento della membrana otolitica, la quale, a causa della sua pesantezza e dell'elevata viscosità del fluido dell'otricolo, rimane nella nuova posizione segnalando anche la componente continua.

I *canali semicircolari* sono condotti tubolari inseriti nei canali ossei, sono disposti secondo le tre direzioni spaziali. I canali sono forgiati a segmento di cerchio (due terzi di circonferenza), partono dall'otricolo con una porzione dilatata detta *ampolla* e ritornano all'otricolo con un'altra estremità senza ampolla. Nell'ampolla si ha un rigonfiamento asimmetrico della parete in forma di cresta, la *cresta ampollare*, coperta da una *cupola* gelatinosa (figura X.13). Questa cresta è una zona epiteliale costituita da cellule sensoriali e cellule di sostegno, come nel caso della macula otolitica, con la differenza che le ciglia sono più lunghe e orientate diversamente.

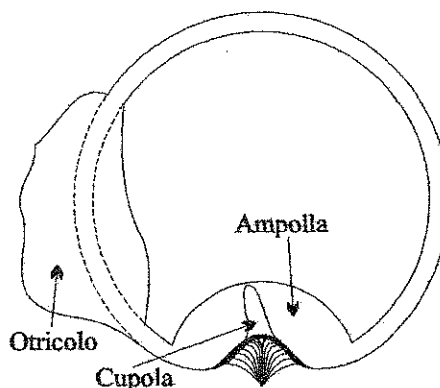


FIGURA X.13 Disegno della struttura dell'epitelio sensoriale di un'ampolla. Sulla parete del canale si alza la cresta ampollare coperta dalla cupola gelatinosa che fa muovere le ciglia.

Le *cellule recettrici* sono molto simili alle cellule acustiche; sono divisibili in due tipi: *a fiasco* (I tipo) e *prismatiche* (II tipo). Quelle di I tipo hanno il corpo rotondeggiante che si stringe all'apice a formare una specie di collo, e quelle di II tipo hanno il corpo affusolato a forma prismatica (figura X.14). Le loro ciglia sono una formazione rigida che tende ad assumere una posizione di riposo estesa e lineare. La diversità tra le cellule è caratterizzata dalla diversa concentrazione di mitocondri, ma soprattutto dalla differente struttura della giunzione sinaptica. Le cellule a fiasco sono contornate per tutta la porzione rotondeggiante da un'ampia espansione nervosa che privilegia l'aspetto afferente, mentre le cellule prismatiche ricevono le terminazioni solo alla base e danno uguale risalto ad entrambi le informazioni afferente ed efferente.

Il meccanismo di rilevamento della componente statica (la posizione) e delle componenti dinamiche (velocità e accelerazione) è compiuta dai tre organi citati attraverso il movimento o il piegamento delle stereociglia. All'interno dell'otricolo e del sacculo viene rivelata sia la posizione che l'accelerazione, infatti la membrana otolitica, pesando di più dell'endolinfa, grava sulle ciglia lasciandole piegate e

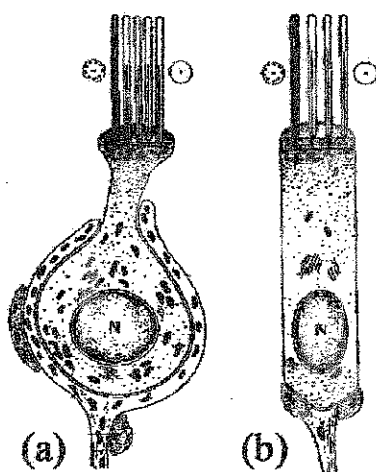


FIGURA X.14 Struttura schematica dei recettori vestibolari. (a) Cellula a fiasco o Tipo I (b) Cellula prismatiche o Tipo II.

facendo registrare loro uno stimolo continuo, paragonabile ad una componente continua di un modello elettrico; al tempo stesso, durante i movimenti, la membrana subisce spostamenti legati alle componenti dell'accelerazione corporea, quindi le ciglia registrano inizialmente anche l'impulso di accelerazione. La misura delle componenti di velocità sono effettuate nei canali semicircolari ad opera delle correnti di flusso del liquido che piegano la cupola, modificando la posizione delle ciglia.

Dal punto di vista funzionale, l'informazione trasmessa dai recettori vestibolari raggiunge il ganglio vestibolare e attraverso il nervo vestibolare raggiunge il tronco encefalico e poi il cervelletto ed i centri motori.

IL MECCANISMO DI TRASDUZIONE

Le difficoltà maggiori nello studio dell'apparato uditivo sono sorte soprattutto perché il "cuore" del sistema uditivo è inaccessibile esternamente, in quanto è situato nella cavità dell'osso petroso temporale, quindi difficile da raggiungere anche con elettrodi o apparecchiature di misura. Anche gli esperimenti condotti in laboratorio su cavie hanno lasciato, in passato, molte perplessità a causa delle possibili interferenze prodotte dall'anestesia sui comportamenti uditivi. Accanto a questi fattori bisogna tener presente la molteplicità di parametri legati alla sensazione acustica e soprattutto alle reazioni psicofisiche dei soggetti sottoposti a prove audiometriche di varia natura.

Percezione uditiva e caratteristiche del suono

Una vibrazione sonora che arriva per via aerea o per via ossea è in grado teoricamente di produrre una sensazione uditiva. In realtà solo un limitato range di suoni può essere udito, a causa delle caratteristiche del sistema uditivo e delle trasformazioni che i suoni subiscono all'interno dell'orecchio.

Un'onda sonora è il risultato del movimento di strati contigui di particelle in seguito ad una perturbazione di pressione. Si può dunque dire che un'onda sonora è caratterizzata da un susseguirsi di piccole fluttuazioni della pressione tra gli strati di materia che l'onda attraversa. Sulla base di questo concetto, mettendo in relazione il valore della pressione istantanea con il tempo è possibile ottenere una rappresentazione grafica ed analitica dell'andamento dei segnali sonori. Tale andamento può essere *periodico* o *aperiodico*; il primo genera una sensazione uditiva corrispondente ad una nota musicale, il secondo genera una sensazione

TABELLA X.1 Relazioni tra pressione, potenza e livello sonoro.

Suono (effetti approssimativi)	Pressione sonora (N/m ² o Pa)	Potenza sonora (W/m ²)	Livello Pressione Sonora (dB SPL)
Turboreattore Musica rock super-amplificata Soglia del dolore	200	100	140
Soglia di danneggiamento cellule uditive	20	1	120
Soglia del rumore fastidioso	6.32	10 ⁻¹	110
Motociclo	2	10 ⁻²	100
Suono d'orchestra sforzato (<i>sf</i>)	6.32·10 ⁻¹	10 ⁻³	90
Suono d'orchestra fortissimo (<i>ff</i>) Rumore del traffico cittadino	2·10 ⁻¹	10 ⁻⁴	80
Suono d'orchestra medio forte (<i>mf</i>) Conversazione comune	2·10 ⁻²	10 ⁻⁶	60
Suono d'orchestra pianissimo (<i>pp</i>) Rumore di un ufficio tranquillo	2·10 ⁻³	10 ⁻⁸	40
Bisbiglio	6.32·10 ⁻⁴	10 ⁻⁹	30
Rumore notturno della campagna	2·10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰	20
Soglia giovanile di udibilità (1-5 KHz)	2·10 ⁻⁵	10 ⁻¹²	0
Soglia felina di udibilità (1-10 KHz)	6.32·10 ⁻⁶	10 ⁻¹³	-10

uditiva di rumore se è continuo, di "schiocco" se è impulsivo. In particolare, se la forma dell'onda è sinusoidale e la durata temporale è illimitata, si parla di *toni puri* che generano una sensazione uditiva corrispondente ad una nota musicale continua. Per i suoni con andamento periodico si definisce il *periodo* dell'onda (T) (tempo che separa due punti dell'onda aventi le stesse caratteristiche) (tabella X.2).

Dal punto di vista della sensazione acustica è importante, non solo la casualità o la periodicità, ma anche l'ampiezza del segnale; infatti il livello della sensazione è legato strettamente all'intensità del segnale acustico. Poiché il range dinamico di ampiezza dell'orecchio umano è molto esteso (10^{12}), è conveniente scegliere una scala logaritmica per esprimere il rapporto tra l'energia considerata (I_i) e l'energia sonora di riferimento (I_0). Tale rapporto è il *bel*. Poiché questa unità è troppo grande si prende il decimo di bel (*dB*). Pertanto:

$$n \text{ dB} = 10 \text{ Log} \frac{I_i}{I_0}$$

Essendo l'energia sonora proporzionale al quadrato della pressione (P) possiamo anche definire il dB come:

$$n \text{ dB} = 20 \text{ Log} \frac{P_i}{P_0}$$

dove P_i è la pressione misurata e P_0 quella di riferimento. Generalmente come punto di riferimento si sceglie la pressione minima che produce una sensazione per un tono di 1 KHz (si parla allora di dB SPL: decibel Sound Pressure Level). Questo valore è pari a 20 μPa . In alcuni casi si fornisce la potenza per unità di superficie o anche la pressione relativa riferita alla pressione fondamentale prima definita. Dal punto di vista psicofisico spesso invece di parlare di ampiezza, si parla di livello della sensazione sonora (*loudness*) che è misurato in Phon (Ph); la sensazione sonora di n Ph è pari alla sensazione che produce un suono puro di n dB SPL alla frequenza di 1 KHz. Nella tabella X.1 sono riportati alcuni suoni caratteristici e i tipici valori di intensità sonora.

Ad ogni diagramma temporale è possibile associare attraverso la trasformata di Fourier due diagrammi: ampiezza-frequenza e fase-frequenza. Le caratteristiche del suono ed anche della sensazione uditiva sono legate strettamente al diagramma ampiezza-frequenza (tabella X.2); infatti l'orecchio esegue un'analisi delle componenti frequenziali e sulla base di tale analisi produce la sensazione uditiva. Dai diagrammi in frequenza di tabella X.2 si nota che un tono puro è costituito da un'unica componente frequenziale ($f=1/T$), mentre gli altri suoni sono caratterizzati da una componente frequenziale di valore $f=1/T$ (*fondamentale*) e da una serie di altre componenti frequenziali dette *armoniche* a frequenze multiple della fondamentale.

L'analisi delle componenti frequenziali effettuata per via sperimentale è in realtà un compromesso tra frequenza e tempo di risoluzione: per poter rivelare componenti frequenziali molto vicine occorrono filtri selettivi a banda molto stretta e quindi tempi di lavoro molto lunghi. Nell'orecchio umano si è raggiunto un compromesso che sembra essere legato strettamente alla fisiologia del sistema nervoso: si effettua un'analisi frequenziale legata ai tempi di risposta dei neuroni del sistema uditivo periferico.

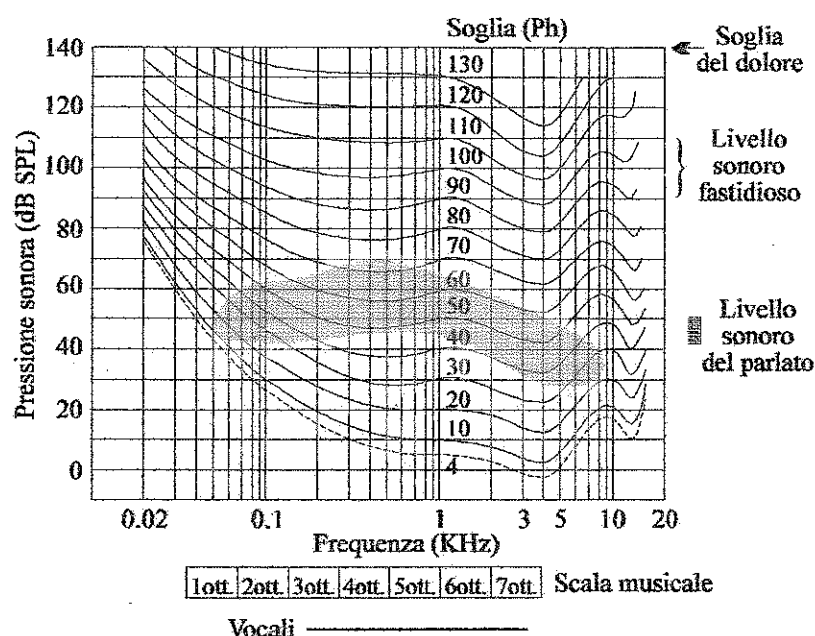
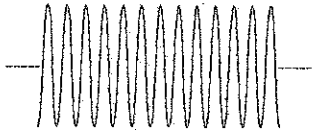
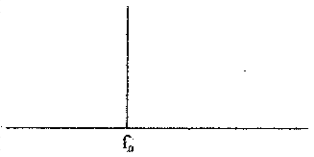
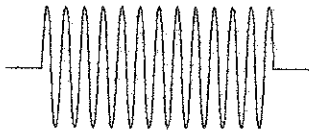
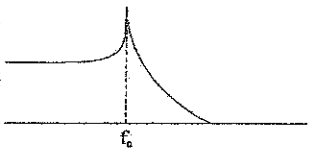
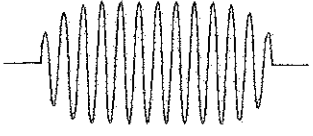
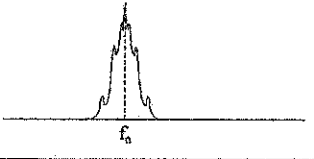
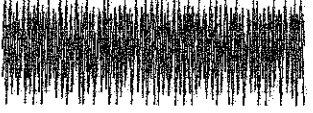
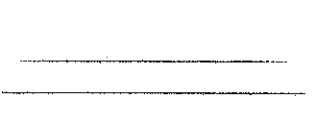
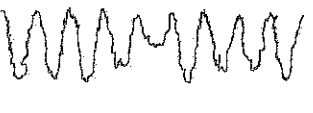
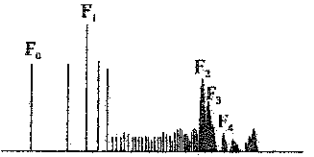
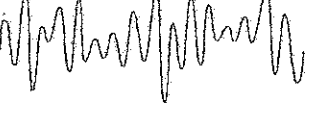
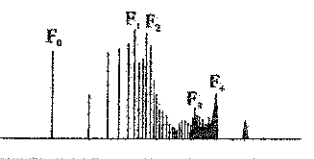


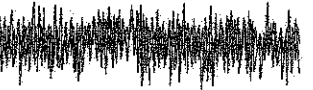



FIGURA X.15 Audiogramma che grafica le soglie di udibilità (espresses in Phon e riferite alla sensazione prodotta alla frequenza di 1 KHz) in funzione della frequenza e dell'ampiezza dell'onda pressoria. Il valore di 140 dB SPL è considerato la soglia approssimativa del dolore, mentre la curva tratteggiata rappresenta la minima soglia udibile. Sotto il grafico è riportata la scala musicale espressa in ottave e lo spettro occupato dalle vocali e dalle consonanti. L'area in grigio è la porzione attribuibile alla voce umana, comunemente definita come area dei livelli del parlato.

Combinando insieme i due parametri, intensità e frequenza, è possibile ricavare un importante audiogramma (figura X.15) che mette in evidenza il campo uditivo umano sia dal punto di vista della frequenza, sia dal punto di vista dell'ampiezza. Nel caso dell'ampiezza vengono definiti due valori limite: la *soglia del dolore* che rappresenta la massima intensità udibile sopra la quale si danneggia irreversibilmente il sistema uditivo (dal grafico 130-140 dB SPL), la *soglia normale minima* che rappresenta la minima intensità sonora che riusciamo a distinguere rispetto al rumore di fondo (20 μ Pa considerato 0 dB SPL). La non uniformità della soglia per tutte le frequenze è dovuta essenzialmente alle caratteristiche filtranti del sistema uditivo meccanico (l'orecchio) e dall'elaborazione neurale. Si può notare che il sistema uditivo è predisposto alla ricezione e all'interpretazione del parlato, infatti nel range di frequenze compreso tra 0.5 e 5 KHz (tipico del parlato) si ha la maggiore sensibilità. Dal punto di vista della frequenza si è accertato che il range udibile è compreso tra i 20 Hz e i 20 KHz per un giovane, e decresce con l'età; infatti già per un uomo maturo è mediamente tra i 30 Hz e i 15 KHz, mentre per un vecchio di 76 anni è circa tra i 50 Hz e i 9 KHz. Nell'audiogramma di figura X.15 sono riportate anche la scala musicale di un pianoforte classico per mettere in relazione le soglie alle tonalità musicali, e anche la zona corrispondente ai livelli del parlato, con particolare riferimento al campo di frequenze di vocali e consonanti.

Dal punto di vista psicofisico due importanti parametri per riconoscere i suoni sono la *tonalità* e il *timbro*. Queste due caratteristiche del suono ci mettono in grado di distinguere i nostri interlocutori o gli strumenti musicali. La *tonalità* è legata alla locazione di una nota nella scala monotonica delle frequenze, è sostanzialmente la capacità di distinguere due note uguali poste in ottave diverse (generalmente si tende a dare dei giudizi qualitativi di ordine come è un suono alto o un suono basso). Il *timbro* è la qualità che ci permette di distinguere due stessi

TABELLA X.2 Andamenti e spettri di alcuni suoni significativi

Tipo di suono	Andamento temporale	Spettro di ampiezza
Tono puro di frequenza f_0		
Tono puro con attacco e termine netti.		
Tono puro con attacco e termine graduati.		
Rumore bianco		
Vocale "a"		
Vocale "e"		
Consonante "fff..."		
Consonante "sss..."		

suoni aventi stessa tonalità e lo stesso livello di sensazione sonora, esso è legato alla distribuzione di armoniche relative ad una fondamentale data.

Dal punto di vista psicofisico due importanti parametri per riconoscere i suoni sono la *tonalità* e il *timbro*. Queste due caratteristiche del suono ci mettono in grado di distinguere i nostri interlocutori o gli strumenti musicali. La *tonalità* è legata alla locazione di una nota nella scala monotonica delle frequenze, è sostanzialmente la capacità di distinguere due note uguali poste in ottave diverse (generalmente si tende a dare dei giudizi qualitativi di ordine come è un suono alto o un suono basso). Il *timbro* è la qualità che ci permette di distinguere due stessi suoni aventi stessa tonalità e lo stesso livello di sensazione sonora, esso è legato alla distribuzione di armoniche relative ad una fondamentale data.

Anche il riconoscimento di voci umane diverse deriva dal diverso timbro e dalla diversa tonalità che la sensazione uditiva vocale produce. Sembra però, che il

riconoscimento dei fonemi non sia basato su un'analisi completa dello spettro sonoro, ma soltanto su alcune precise componenti frequenziali chiamate *formanti* (F_K), esse sono le frequenze alle quali si trovano i massimi locali nel diagramma ampiezza-frequenza. Nella tabella X.2 è possibile vedere come le vocali "a" o "e" hanno una diversa distribuzione delle formanti. Per le consonanti, invece sembra essere importante la distribuzione dell'energia rispetto alla banda come è visibile dal confronto degli spettri della "s" e della "f" in tabella X.2.

Analisi dell'informazione uditiva

Condizionamento periferico del segnale uditivo

Il segnale sonoro raggiunge la coclea dove viene effettuata la trasduzione attraversando una serie di elementi che ne alterano lo spettro originale, condizionando quindi l'informazione uditiva.

Il primo elemento che l'onda sonora incontra è l'orecchio esterno, che ha la funzione di convogliare l'onda sonora verso il timpano. Nello svolgere questa funzione esso produce un primo filtraggio sul segnale, amplificando di circa 5-10 dB SPL le frequenze comprese tra 2 e 5 KHz; complessivamente esso potrebbe essere schematizzato come un risonatore acustico. Di questo effetto sembra sia responsabile soprattutto il padiglione auricolare; infatti se l'onda sonora viene inviata attraverso una cuffia esterna che comprime il padiglione stesso l'effetto è notevolmente attenuato ed è addirittura assente nel caso in cui l'onda sonora venga immessa direttamente attraverso auricolari interne inserite nella conca. Il fenomeno potrebbe essere legato essenzialmente alla forma del padiglione auricolare e alla sua funzione tipica che è quella di permettere il riconoscimento della direzione della sorgente.

Una volta che l'onda sonora raggiunge il timpano le vibrazioni vengono convogliate sulla catena ossea dell'orecchio medio e portate alla coclea. L'orecchio medio nel suo complesso effettua un condizionamento importante sia dal punto di vista del livello sonoro, sia dal punto di vista dello spettro; infatti esso ha la funzione di adattatore d'impedenza acustica, perché lega l'aria con bassa impedenza alla coclea con alta impedenza; inoltre funziona da amplificatore, perché i muscoli che muovono la catena ossea possono effettuare un controllo sul guadagno. Per comprendere l'efficienza di questa catena di amplificazione è utile tener presente che essa trasmette circa il 60% della potenza sonora, mentre se mancasse arriverebbe alla coclea solo il 3% della potenza. L'adattamento d'impedenza è realizzato essenzialmente dalla diversa area tra la membrana timpanica e la base della staffa (il rapporto tra le aree è di 17 a 1), ma in parte anche dall'amplificazione di potenza che è di circa 1.3; complessivamente risulta che il rapporto tra la pressione in ingresso e quello d'uscita è circa 1 a 22 in condizioni normali e per frequenze al disotto di 1 KHz. Ne segue dunque che l'orecchio medio enfatizza le frequenze basse, in particolare è un filtro passabasso con frequenza di taglio intorno a 1-2 KHz e con attenuazione di 18 dB/ottava. Sperimentalmente Flanagan ha ricavato una funzione di trasferimento tra la pressione del timpano e gli spostamenti volumetrici della perilinfà, esprimibile con la seguente relazione:

$$G(s) = \frac{k}{(s + 1500\pi)[(s + 1500\pi)^2 + 3000\pi]}$$

La trasmissione dell'energia sonora attraverso l'orecchio medio può essere modificata dai muscoli che controllano la tensione del timpano e i movimenti della catena ossea. Questi muscoli vengono contratti attraverso un arco riflesso, quando il livello sonoro supera gli 80 dB SPL con un ritardo compreso tra i 15 e i 150 ms sul tempo di trasmissione dell'orecchio medio. Questo riflesso protegge l'orecchio interno contro continui ed intensi suoni che potrebbero danneggiarlo e può essere evocato in entrambi gli orecchi dagli stimoli che incidono solo su uno dei due.

ANALISI COCLEARE

La staffa riporta, attraverso la finestra ovale, l'onda di pressione nella perilinfia della scala vestibolare, questa è trasmessa attraverso la membrana di Reissner all'endolinfia, nella scala cocleare. La scala timpanica rimane invece alla stessa pressione dell'orecchio medio a causa della rigidità della membrana ossea che la riveste. Si ottiene così una differenza di pressione tempovariante rispetto alle due scale; ciò produce un'onda viaggiante all'interno della membrana basilare che si propaga dalla periferia verso il centro (figura X.16). Grazie al diverso spessore e alla diversa rigidità essa si comporta diversamente da punto a punto in funzione della frequenza, cioè si formano picchi di ampiezza a distanze diverse dal

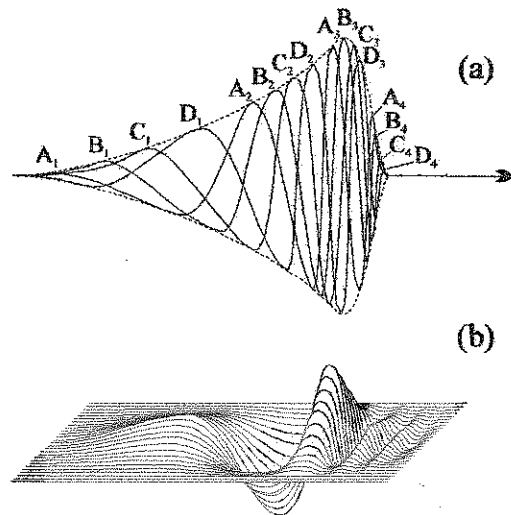


FIGURA X.16 Rappresentazione dell'onda pressoria all'interno della membrana. (a) Rappresentazione bidimensionale dell'onda in corrispondenza di istanti di tempo intervallati di $T/3$ (massimi A_N, B_N, C_N, D_N) (b) Rappresentazione tridimensionale per la prima onda di figura (a).

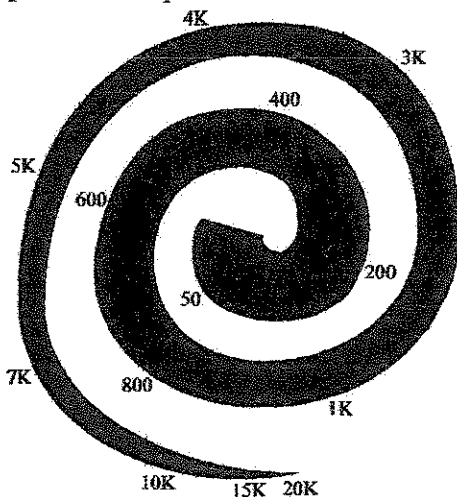


FIGURA X.17 Schema che illustra la scala tonotopica della coclea. Le frequenze più alte sono localizzate alla base, nei pressi della staffa, mentre le frequenze più basse sono vicine all'apice, in prossimità dell'elicotrema.

punto di stimolazione in funzione della frequenza. Si ha così una codifica spazio-frequenza (organizzazione tonotopica) come quella visibile in figura X.17.

Studi fatti in passato sembravano mettere in luce che la caratteristica spazio-frequenza locale è fortemente non lineare (in figura X.18 si vede una caratteristica passabasso con un rapida ed elevata attenuazione per frequenze intorno ai 20 KHz). Tuttavia, studi recenti fanno ipotizzare che le caratteristiche trovate (figura X.18) siano legate essenzialmente alla componente passiva della membrana basilare e che, con tutta probabilità, vi siano anche componenti

attive che modifichino sostanzialmente la risposta.

I movimenti della membrana basilare sono circa trenta volte più grandi in ampiezza di quelli della staffa, nonostante ciò rimangono estremamente piccoli, infatti risultano dell'ordine di 10-100 nm a 100 dB SPL e, supponendo una risposta lineare, sarebbero molto più piccoli delle dimensioni atomiche a 4 dB SPL. Restando fermo il fatto che le vibrazioni dei setti cocleari sono veramente piccole se rapportate alle dimensioni di questi, si deve tener presente, che le fluttuazioni della ciglia potrebbero essere enfatizzate dalla membrana tectoria; tuttavia il meccanismo con cui la membrana tectoria influisce sulla risposta delle stereociglia è ancora poco chiaro, soprattutto perché è difficile misurare i movimenti delle ciglia stesse. Attualmente si ipotizza che le vibrazioni sulla membrana basilare producano sulla membrana tectoria analoghe vibrazioni in fase opposta in modo da enfatizzare il piegamento delle ciglia stesse.

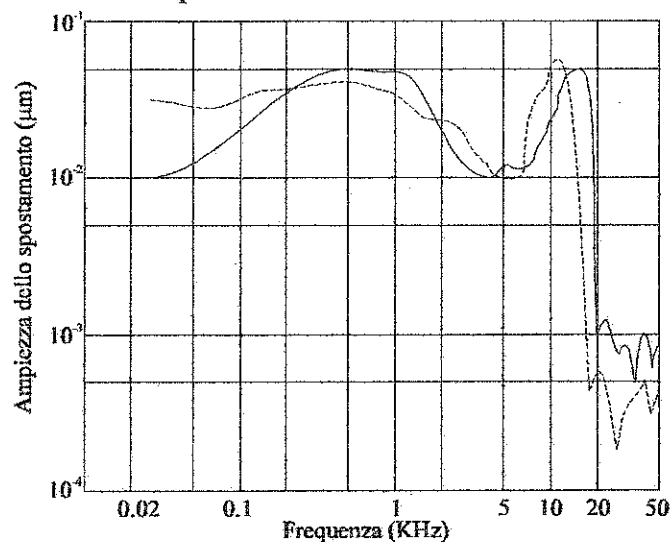


FIGURA X.18 Risposta in frequenza locale della membrana valutata per una pressione sonora di 100 dB SPL. La curva a tratto continuo è valutata a 3.3 mm dalla staffa e la curva a tratteggiata è ricavata a 4.1 mm dalla staffa.

ANALISI COMPIUTA DA RECETTORI E NEURONI PERIFERICI

La traduzione da impulso pressorio ad impulso nervoso viene fatta al livello dei recettori uditivi e poi elaborata a più gradi dal sistema nervoso. L'effettivo meccanismo di conversione non è del tutto chiaro, tuttavia misure del potenziale transmembrana mostrano una stretta correlazione tra stimolo e potenziale d'azione sia per i tempi di risposta, sia per le caratteristiche di ampiezza e frequenza (figura X.19). Si ipotizza che la contrazione delle ciglia produca una riduzione della resistenza di membrana nella regione terminale della cellula uditiva, aumentando così la permeabilità agli ioni potassio; ciò produrrebbe una variazione del flusso di corrente ionica stazionaria. Il meccanismo sembra essere diverso tra i due tipi di cellule uditive, infatti nelle cellule esterne non viene registrata una variazione della componente continua del potenziale, mentre in quelle interne è presente sia una variazione della componente continua che una componente alternata.

La situazione a riposo è caratterizzata dalla massiccia presenza di ioni sodio nelle scale vestibolare e timpanica, e di ioni potassio nella scala cocleare; ciò comporta un potenziale di 80 mV nella scala cocleare e di 2 mV nella scala timpanica, se prendiamo come riferimento la scala vestibolare. Si ipotizza che vi sia una pompa sodio-potassio localizzata nella stria vascolare (figura X.6) che rende possibile il mantenimento delle concentrazioni di sodio e potassio fuori equilibrio. Tra l'endolinfa e l'interno dei recettori uditivi c'è inoltre il potenziale transmembrana tipico di -60 mV, legato al flusso ionico diffusivo. Nelle cellule interne,

quando viene presentato uno stimolo al di sotto dei 300 Hz si ha una risposta con modifica della componente continua e la produzione di una componente alternata, quest'ultima però viene progressivamente ridotta per stimoli con frequenza compresa tra i 300 Hz e i 5 KHz e viene del tutto annullata per frequenze maggiori. Nelle cellule esterne, invece si ha la produzione della sola componente alternata che sembra essere accordata con la vibrazione.

Come risulta visibile dalle curve di figura X.20, nel sistema uditivo umano, l'ampiezza del potenziale d'azione è legata all'intensità e alla frequenza dello stimolo. Ogni cellula uditiva è particolarmente sensibile per una determinata frequenza, detta *frequenza caratteristica* (17 KHz in figura X.20), tuttavia tale sensibilità è legata ad un fattore di soglia, per cui aumentando l'intensità dello stimolo la banda di frequenze rivelate aumenta, e, sopra gli 80-100 dB SPL, l'effetto filtrante

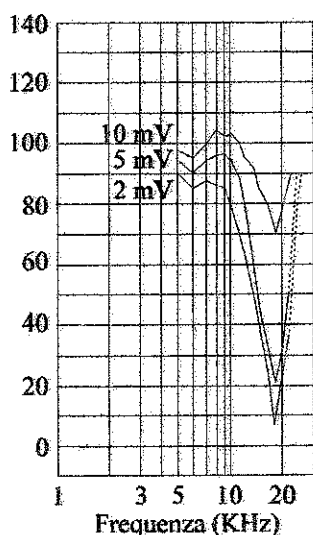


FIGURA X.20 Variazione del livello di stimolo richiesto per mantenere un potenziale transmembrana delle cellule uditive costante al variare della frequenza. Il punto più basso delle tre curve (tracciate per 2, 5 e 10 mV) avviene alla frequenza di 17 KHz che è detta frequenza caratteristica.

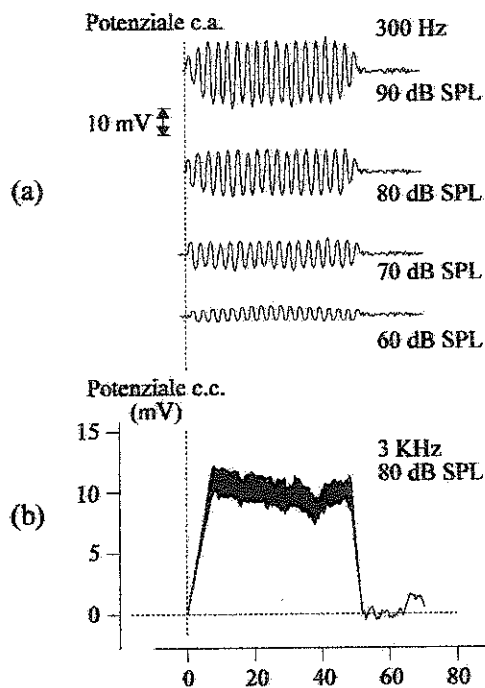


FIGURA X.19 Potenziale transmembrana delle cellule uditive. (a) Componenti alternate per toni puri a 300 Hz a diversi livelli di pressione sonora (60-90 dB SPL). La loro componente continua è trascurabile. (b) Componente continua per un tono puro a 3 KHz, 80 dB SPL. Sovrapposta alla continua (circa 12 mV) si ha una componente alternata che è così piccola da essere assimilabile al rumore di fondo.

è eliminato del tutto. Questa dipendenza rispetto alla frequenza permette di effettuare un'analisi in frequenza del suono e di generare impulsi legati a tali componenti.

Un altro meccanismo ipotizzato è legato allo ione calcio. Si presume che nell'epitelio uditivo vi sia un reticolo contenete calcio che, liberato in seguito alla contrazione delle ciglia, produce un decremento della permeabilità di membrana. In ogni caso è certo che la depolarizzazione della membrana dei recettori uditivi produce il rilascio di neurotrasmettitori chimici che mettono in moto la sinapsi chimica, generando nella fibra nervosa afferente un impulso codificato in frequenza con un ritardo di circa 0.5 ms. Nelle fibre efferenti il neurotrasmettitore usato è l'acetilcolina, che sembra intervenire (come nel muscolo) direttamente al livello di canali ionici dello ione cloro e produrre una iperpolarizzazione, riducendo così l'effetto della depolarizzazione prodotta dagli stimoli sonori.

Analisi al livello di ganglio spirale

Al livello del ganglio avviene la prima integrazione delle risposte prodotte dalle singole cellule uditive. I neuroni che caratterizzano tale ganglio sono essenzialmente di due tipi: i *neuroni silenti* che in assenza di stimolo non danno scarica neurale e i *neuroni non silenti* che in assenza di stimolo continuano ad emettere una scarica. Entrambi questi tipi di neuroni tuttavia presentano una diversità di comportamento solo ai fini dell'assenza di stimolo; in figura X.21 sono riportate le densità di probabilità relative al periodo di emissione degli spikes. Dalla figura X.21a si può vedere che i neuroni non silenti, durante l'assenza di stimolo, hanno una risposta con densità di probabilità molto vicina a quella di Rayleigh che rappresenta la densità di probabilità

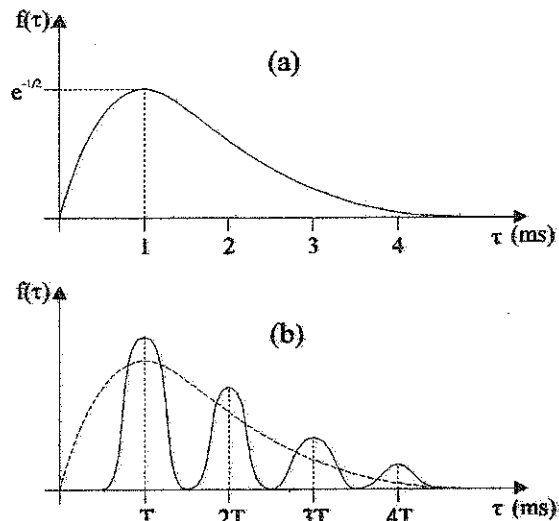


FIGURA X.21 Densità di probabilità relative al periodo di scarica degli spikes per neuroni silenti e non silenti. (a) Densità di probabilità per neuroni non silenti durante assenza l'impulso. (b) Densità di probabilità per neuroni silenti e non silenti durante la presenza di impulso nervoso.

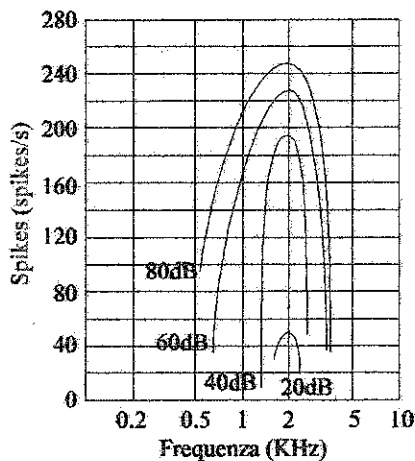


FIGURA X.22 Numero di spikes prodotto dai neuroni del ganglio spirale in corrispondenza di certi valori di pressione sonora (20-80 dB SPL) e per varie frequenze. La codifica in frequenza mostra un picco di risonanza in corrispondenza di 2 KHz, la quale viene considerata frequenza caratteristica.

segue quella del rumore) e che quindi si sincronizzano sui successivi; valutando lo scarto tra i massimi è possibile avere una stima dell'efficienza di tale codifica.

Dal grafico di figura X.22 si vede che anche i neuroni del ganglio spirale effettuano un filtraggio in frequenza attraverso un meccanismo a soglia come quello presentato dai recettori. Il grafico mette in relazione il numero di spikes al

dell'involuppo del rumore gaussiano filtrato da un sistema passabanda. Il massimo si verifica per tempi dell'ordine del millisecondo (rappresenta la varianza) e sembra essere legato ai periodi di latenza e refrattarietà dei neuroni stessi. Dalla figura X.21b invece si vede un fenomeno particolare chiamato *sincronizzazione*; esso è legato alla particolare distribuzione dei massimi della funzione densità di probabilità, infatti in presenza di stimolo sinusoidale di periodo T compreso tra 1 e 10 ms, i neuroni silenti e non silenti producono una risposta codificata in frequenza che si sincronizza mediamente con quella dello stimolo. In particolare, l'emissione degli spikes avviene nel semiperiodo corrispondente allo spostamento della membrana basilare verso la scala vestibolare. Questo fenomeno è rilevante perché è una diversa codifica dello stimolo rispetto alla codifica spazio-frequenza della membrana cocleare. La presenza dei picchi successivi implica la possibilità che alcuni neuroni perdano il sincronismo a causa del rumore (l'andamento dei massimi

secondo emessi da un nervo del ganglio spirale, per un livello costante di pressione sonora, al variare delle frequenze. L'andamento tipico di una curva di risonanza mette in evidenza la presenza di una frequenza caratteristica (2 KHz in figura X.22); inoltre si vede che la codifica del numero di impulsi è legata anche all'ampiezza del livello sonoro, quindi vengono combinate insieme le informazioni di frequenza ed ampiezza dello stimolo in una codifica unica e legata ad una modulazione in frequenza del numero di spikes.

Un altro fenomeno che viene attribuito ai neuroni del ganglio spirale, ma che (con probabilità assai minore) potrebbe essere dovuto anche alla limitatezza del sistema di analisi frequenziale, è la *soppressione*; questo fenomeno consiste nella soppressione di un tono quando ne vengono trasmessi due.

Analisi compiuta dai nuclei del tronco encefalico

Attraverso il nervo cocleare l'informazione uditiva raggiunge due nuclei fondamentali del tronco encefalico: i nuclei cocleari e i nuclei olivari superiori. I primi effettuano una elaborazione diretta sull'informazione uditiva, mentre i secondi sono legati maggiormente alla retroazione.

Nei nuclei cocleari viene analizzata l'informazione e vengono prodotte tre risposte su tre diversi tipi di neuroni; proprio in relazioni alle caratteristiche delle loro risposte questi neuroni vengono chiamati: *neuroni di inizio segnale e poi silenti* nei quali la risposta è di tipo impulsivo ed è correlata all'inizio dell'oscillazione (figura X.23b), *neuroni di inizio segnale e successiva risposta* nei quali oltre ad evidenziare l'inizio dell'oscillazione si mette in evidenza anche la durata dello stimolo (figura X.23c), *neuroni oscillatori* nei quali si presenta ancora un'oscillazione, ma scorrelata in ampiezza e frequenza rispetto a quella dello stimolo (figura X.23d). Importante da sottolineare è l'aumento del ritardo con cui viene presentata la risposta in uscita dal nucleo, segno evidente di una complessa elaborazione; esso tuttavia risulta mediamente uguale per tutti e tre i tipi di neurone. Questi nuclei sembrano presentare nuovamente una codifica spazio-frequenza, probabilmente dovuta al fatto che i neuroni d'arrivo sono ancora legati alla codifica della membrana basilare.

I nuclei olivari superiori sono importanti per i coordinamenti motori ed in particolare gli archi riflessi. Essi sembrano particolarmente specializzati per l'individuazione di una sorgente uditiva attraverso la differenza di tempo e di intensità della stimolazione che giunge ai due orecchi. In particolare si è visto che la rivelazione della posizione avviene attraverso una comparazione della fase per

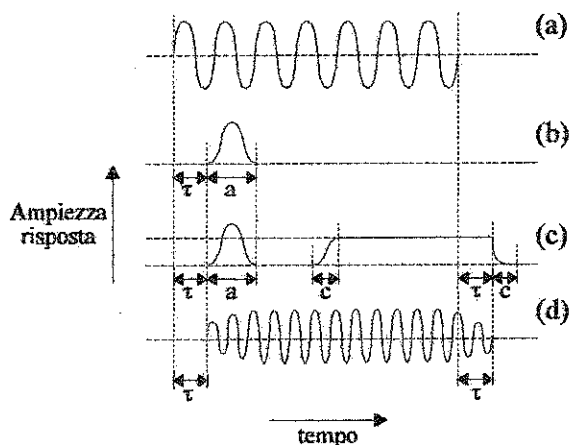


FIGURA X.23 Schema che riporta la risposta ideale dei neuroni del nucleo cocleare. In tutte le caratteristiche si notino gli intervalli temporali comuni. Le ampiezze e le frequenze delle risposte sono svincolate da quelle dello stimolo. (a) Stimolo costituito da un tono puro a frequenza f_0 . (b) Risposta dei neuroni di inizio segnale e poi silenti. (c) Risposta dei neuroni di inizio segnale e successiva risposta. (d) Risposta dei neuroni oscillatori.

frequenze inferiori ad 1 KHz, mentre avviene attraverso una comparazione d'ampiezza per frequenze superiori.

Analisi legata ai fenomeni psicofisici

Molto interessante dal punto di vista dell'elaborazione dell'informazione uditiva è andare a valutare i risultati sperimentali legati alle prove psicofisiche di riconoscimento vocale. Infatti è possibile vedere come non solo l'orecchio umano sia strutturato in modo da poter ricevere messaggi vocali, ma anche come il linguaggio utilizzato dall'uomo abbia delle caratteristiche molto ridondanti in modo da risultare chiaro anche se non vengono percepiti tutti i tratti del messaggio trasmesso. In particolare si è visto da prove sperimentali che la logicità dei messaggi influenza molto le misure sulle caratteristiche uditive. Si tende quindi a superare questo problema utilizzando suoni oppure *logatomi*, cioè fonemi posti in sequenze tali da non contenere parole conosciute.

Queste prove di riconoscimento vengono condotte con due intenti diversi: uno mira ad identificare la capacità di riconoscere un certo messaggio vocale in

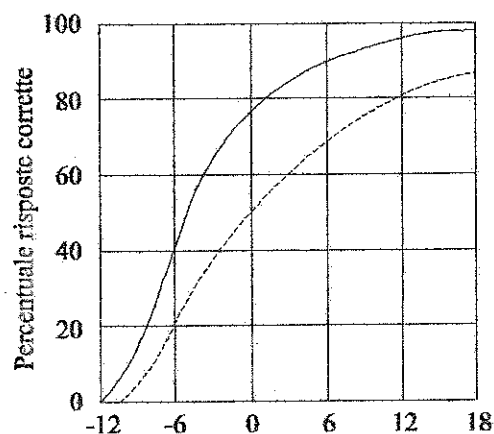


FIGURA X.24 Percentuale di risposte corrette in funzione del rapporto segnale rumore. La curva a tratto continuo è stata ricavata con messaggi di senso compiuto, la curva tratteggiata è stata ricavata con logatomi. Il dislivello tra le curve è probabilmente attribuibile ad un'estrapolazione effettuata al livello superiore grazie al contesto del messaggio.

relazione all'ampiezza dello stimolo, l'altro è inerente al tipo di analisi condotta dal sistema uditivo per riconoscere i messaggi vocali.

Nel primo tipo di prova il messaggio fonetico è reso noto a priori al soggetto e in seguito trasmesso. Al soggetto viene poi chiesto di annotare ciò che ha udito. Nel grafico di figura X.24 sono riportate due curve che riportano le percentuali di risposte corrette in funzione del rapporto segnale rumore con cui viene trasmesso il messaggio (curva continua) o la sequenza di logatomi (curva tratteggiata).

Nel secondo tipo di prova audiometrica (prova di riconoscimento con vocoder) viene trasmesso un messaggio ancora conosciuto dal

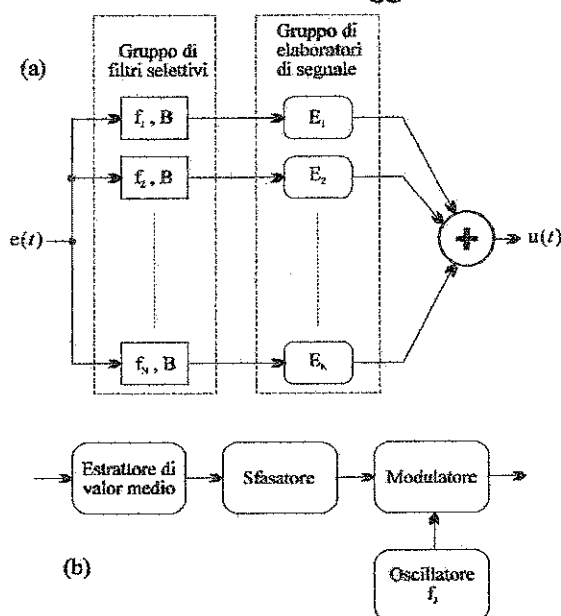


FIGURA X.25 Schema logico dell'apparecchiatura (Vocoder) che permette di elaborare il segnale sonoro. (a) Schema logico del Vocoder. (b) Schema a blocchi di un possibile elaboratore.

soggetto sottoposto all'esperimento, tuttavia vengono fatte delle alterazioni spettrali. In particolare, viene suddiviso lo spettro in una serie di bande utilizzando un codificatore (figura X.25a), le bande frequenziali così ottenute vengono elaborate individualmente, infine viene riassembleato lo spettro complessivo e il suono ottenuto viene presentato al paziente. La suddivisione viene fatta tenendo conto della posizione delle frequenze fondamentali che individuano i fonemi. I risultati ottenuti mostrano che, se i blocchi elaboratori sono quelli di figura X.25b, l'informazione vocale viene riconosciuta correttamente con probabilità tendente all'unità, anche se il timbro della voce risulta in parte alterato. Questo mostra come la sensazione uditiva di un fonema o di un logatoma derivi essenzialmente dalle formanti; infatti, se si assume una distribuzione in banda delle ampiezze di tipo gaussiano, le formanti coincidono con il valor medio. Risultati molto interessanti si ottengono annullando certe bande o spostando i massimi d'ampiezza, infatti si sono stabilite corrispondenze tra formanti e fonemi in modo univoco. Si è visto che le prime due formanti individuano le vocali, mentre con la terza e la quarta si individua l'interlocutore.

Alterazioni della sensibilità uditiva

Una diminuzione della sensibilità uditiva può dipendere da lesioni nel canale uditivo esterno, nell'orecchio medio e interno e nelle vie uditive centrali. Le lesioni del canale uditivo esterno o nell'orecchio medio producono un deficit uditivo di tipo trasmissivo mentre le lesioni nell'orecchio interno o nell'ottavo nervo cranico producono una perdita uditiva sensoriale e neurale.

Deficit di tipo trasmissivo e di tipo uditivo

I *deficit di tipo trasmissivo* derivano da ostruzioni del canale uditivo esterno per presenza di cerume o di corpi estranei, per rigonfiamento delle pareti del canale o per restringimento e occlusione dello stesso. Altre cause di deficit uditivo di tipo trasmissivo sono provocate dalla perforazione della membrana timpanica (come avviene nell'otite media cronica), dalla distruzione della catena degli ossicini (ad esempio a causa di traumi o infezioni), dalla fissazione della catena di ossicini conseguente a otosclerosi, dalla presenza nell'orecchio medio di liquido infiammatorio, da cicatrici o neoplasie.

I *deficit uditivi sensoriali* sono dovuti principalmente a danni alle cellule capellute dell'organo del Corti. Queste cellule possono venire danneggiate da rumore intenso e prolungato, infezioni virali, farmaci, fratture dell'osso temporale, meningiti, otosclerosi cocleare, malattia di Ménière e a seguito di processi involutivi legati alla senescenza. I deficit uditivi di tipo neurale sono dovuti principalmente a tumori.

La differenziazione dei deficit uditivi di tipo trasmissivo oppure di tipo sensoriale e neurale può eseguirsi sulla base della differente soglia uditiva alla stimolazione per via aerea o per via ossea. La valutazione della funzionalità uditiva alla conduzione per via aerea viene effettuata presentando lo stimolo sonoro in

vicinanza del canale uditivo esterno senza toccare il capo. Tale funzionalità è influenzata dalla viabilità del canale uditivo esterno, dal grado di efficienza dell'orecchio medio e dall'integrità dell'orecchio interno, dell'ottavo nervo e delle vie nervose centrali. La valutazione della funzionalità uditiva alla conduzione ossea si effettua ponendo un oscillatore e lo stelo del diapason in contatto con il capo. La sensibilità uditiva alla conduzione ossea è indipendente dall'integrità del canale uditivo esterno e dell'orecchio medio mentre dipende dalla funzionalità dell'orecchio interno dell'ottavo nervo cranico e delle vie uditive centrali. Se la soglia uditiva alla conduzione per via aerea è elevata e la conduzione per via ossea è nel normale ambito funzionale, il deficit responsabile di una perdita di udito sarà localizzato nel canale uditivo esterno o nell'orecchio medio. Se risulteranno elevate sia la soglia uditiva alla conduzione aerea e alla conduzione ossea, la lesione responsabile del deficit uditivo sarà localizzata nell'orecchio interno, nell'ottavo nervo cranico oppure nelle vie uditive centrali. Naturalmente vi può essere coesistenza di deficit uditivo alla conduzione per via aerea e per via ossea; in questo caso vi sarà un aumento della soglia uditiva per entrambe le modalità di trasmissione dello stimolo. In quest'ultimo caso, comunque, la soglia uditiva alla conduzione aerea sarà più elevata della soglia uditiva per via ossea. La maggior parte dei soggetti con deficit uditivo di tipo trasmissivo possono avere l'orecchio medio ricostruito usando particolari procedure quali la timpanoplastica dopo una otite media cronica o un trauma e la stapedectomia (asportazione della staffa) da eseguirsi nel caso di otosclerosi. La timpanostomia permette il pronto recupero dell'udito nei bambini e negli adulti con versamenti nell'orecchio medio. Le protesi uditive per i deficit uditivi di tipo trasmissivo sono efficaci e ben tollerate. I soggetti con perdita uditiva sensoriale e neurale possono venire riabilitati con protesi uditive di varia configurazione e di varia potenza. Nei casi di sordità di grado elevato potranno essere d'aiuto gli impianti cocleari.

Gli acufeni

Gli *acufeni* si definiscono come la percezione di suoni in assenza di stimolazione acustica nell'ambiente. Possono presentarsi come un ronzio, uno scroscio o un tintinnio e possono essere pulsatili (sincroni con il battito cardiaco). Gli acufeni si accompagnano di solito sia ai deficit uditivi di tipo trasmissivo sia a quelli di tipo sensoriale e neurale. La fisiopatologia degli acufeni non è ancora completamente chiarita. La causa che determina la comparsa degli acufeni è di solito la stessa che determina la comparsa di un deficit uditivo. Gli acufeni possono costituire il primo sintomo di una grave malattia quale ad esempio uno schwannoma (tumore dei nervi periferici, presumibilmente originato dalle cellule di Schwann) del nervo acustico. La gamma di frequenza e di intensità degli acufeni può spesso venir riprodotta mediante un audiometro; in tal modo potrà essere determinata l'inibizione residua degli acufeni. Si potrà ottenere sollievo dagli acufeni mediante mascheramento con una musica di background. Anche le protesi uditive potranno essere d'aiuto nella soppressione degli acufeni; ad esempio gli apparecchi per il mascheramento degli acufeni produrranno, a livello dell'orecchio malato, un suono più piacevole di quanto lo siano gli acufeni. L'applicazione di questi apparecchi è spesso seguita da una inibizione, anche di molte ore, degli acufeni.

LA SINDROME DI MÈNIÈR

Malattia di Mènièr, o sindrome di Mènièr, è il termine che si applica alla vertigine ricorrente, accompagnata da acufeni e sordità. Questi ultimi sintomi possono mancare durante la fase iniziale delle crisi vertiginose, ma compaiono inevitabilmente al progredire della malattia e aumentano di gravità durante un attacco accessuale. Nelle forme più lievi il soggetto colpito si potrà lamentare più di una sensazione di malessere al capo, di modesta instabilità e di difficoltà a concentrarsi che di una vertigine vera e propria e potrà essere scambiato per un soggetto ansioso o depresso. La malattia di Mènièr esordisce più frequentemente nel quinto decennio di vita anche se non risparmia gli adulti più giovani e gli anziani. Le modificazioni patologiche consistono in una dilatazione del sistema endolinfatico, che porta ad una degenerazione delle cellule ciliate vestibolari e cocleari.

Un altro disturbo labirintitico caratterizzato dalla comparsa di vertigini parossistiche (fenomeno accessionale e violento) e nistagmo (movimento rapido e ripetuto del globo oculare) quando la testa assume certe posizioni particolari è la così detta *vertigine posizionale benigna*.

Vi sono molte altre cause di vertigine acuta: labirintite purulenta a seguito di meningite, labirintiti sierose da infezioni nell'orecchio medio, labirintite tossiche da farmaci, da emorragie nell'orecchio interno ecc. In questi casi le crisi vertiginose tendono ad avere una durata più lunga rispetto ai casi ricorrenti, ma i sintomi sono, per gli altri aspetti, simili.

UDITO ARTIFICIALE

Negli ultimi anni si sono sviluppati molti studi nel campo del riconoscimento automatico della voce, soprattutto per permettere un colloquio tra uomo e macchina; del resto la comunicazione per mezzo del linguaggio è per l'uomo il mezzo più naturale e più veloce per uno scambio di informazioni. Tuttavia, non possiamo identificare un sistema uditivo con un riconoscitore di voce, per le notevoli differenze concettuali di progettazione. Un sistema uditivo artificiale deve essere in grado di comportarsi come quello umano ed estrarre informazioni anche estrapolate in base al contesto.

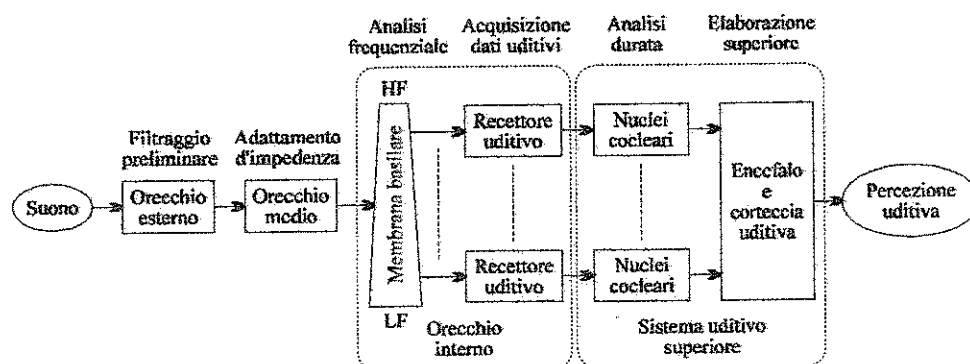


FIGURA X.26 Schema a blocchi del sistema uditivo umano con i relativi passi del processo uditivo.

In figura X.26 è riportato lo schema a blocchi del sistema uditivo umano con i relativi passi del processo uditivo. Tale processo è costituito da una catena di operazioni che permettono di passare dall'onda pressoria alla percezione sonora. Nel sistema artificiale, ognuna di queste operazioni deve essere svolta da sistemi fisici interconnessi, in modo tale da realizzare un complesso capace di rispondere agli stimoli in modo adeguato. Alla luce di questo si tende a realizzare un sistema uditivo con due livelli distinti: al primo livello prendono parte tutti i sistemi devoluti all'acquisizione, al filtraggio, all'analisi in frequenza, alla codifica e alla memorizzazione dei suoni; mentre nel secondo livello troviamo i sistemi devoluti all'estrazione delle informazioni. Questa suddivisione permette di avere controlli locali sul guadagno, sul filtraggio e sulle risposte dei sensori, lasciando al livello superiore solo un controllo di coordinamento complessivo.

Il filtraggio effettuato dall'orecchio esterno può essere effettuato inserendo un padiglione artificiale che abbia una funzione di trasferimento analoga a quella naturale oppure effettuando un filtraggio di post-rivelazione. In entrambi i casi, prelevando i segnali sonori con un microfono ed effettuando un'elaborazione elettronica del segnale la funzione tipica dell'orecchio medio viene limitata alla sola amplificazione e ad un filtraggio che limiti le caratteristiche del rumore. Il successivo blocco è caratterizzato da un analizzatore di spettro che valuta le ampiezze delle componenti frequenziali presenti nel segnale sonoro, le codifica in informazioni numeriche e le memorizza su memoria di massa. Un sistema software successivo le elabora ed estrae le informazioni vocali.

L'aspetto più complesso resta comunque quello dell'interpretazione univoca del messaggio, risolvere cioè i problemi delle incomprensioni vocali o delle omofonie. Nel nostro sistema uditivo interviene l'elaborazione cerebrale che, sfruttando il contesto e l'enorme quantità d'informazioni preacquisite, sceglie la giusta interpretazione. Nei sistemi artificiali, le tecniche usate sono molteplici, tuttavia negli ultimi anni un aiuto decisivo è venuto dalle reti neurali contestuali, le quali sono in grado di elaborare facilmente dati in relazione al contesto scaturito dalle elaborazioni precedenti.