

21 Febbraio 2007

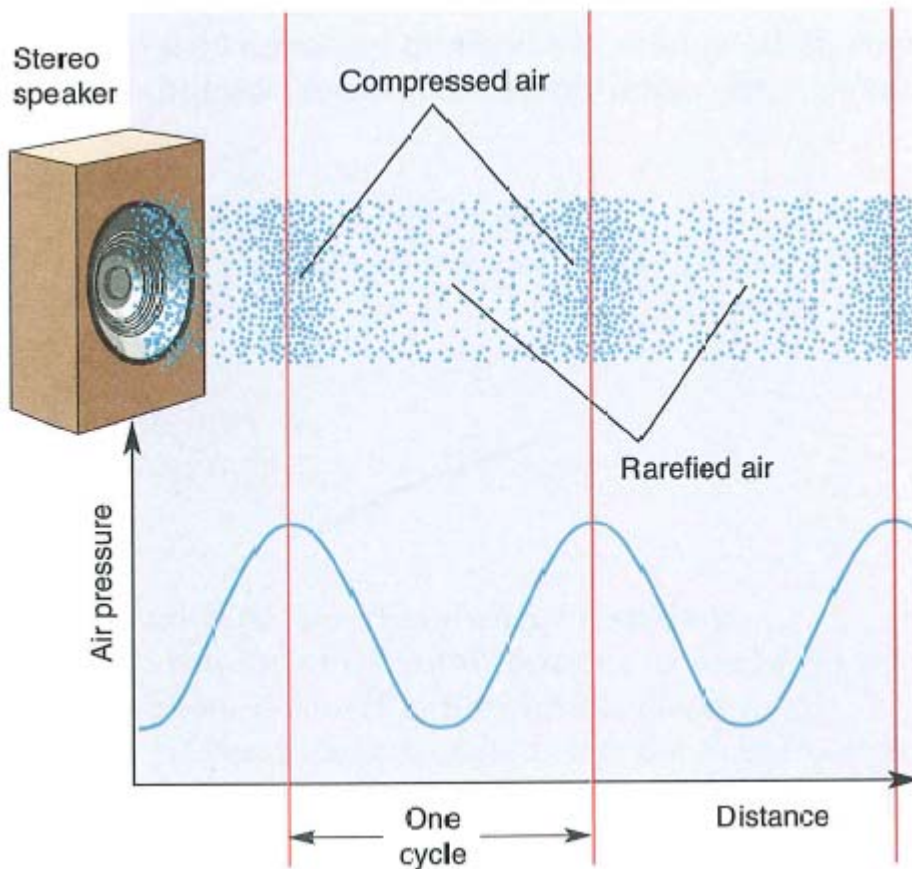
Corso di Laurea in Informatica Multimediale
Facoltà di Scienze MMFFNN
Università di Verona

Il sistema uditivo

Chiara Della Libera

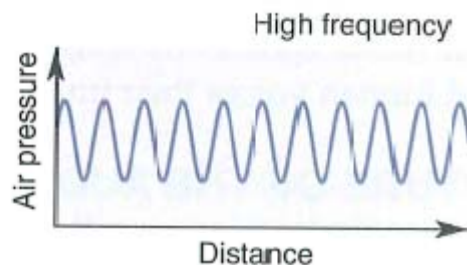
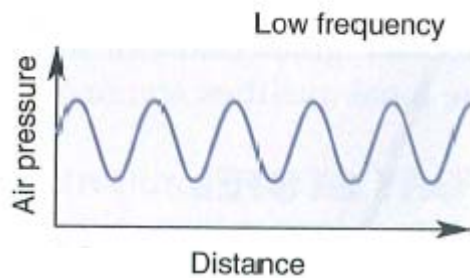
DSNV Università di Verona
Sezione di Fisiologia Umana
tel. 045 802 7198
chiara.dellalibera@medicina.univr.it

Il suono



- E' prodotto da variazioni nella pressione delle particelle d'aria.
- Compressione e decompressione dell'aria possono avvenire in modo periodico, dando origine ad un segnale con determinate proprietà di *frequenza* ed *ampiezza*.
- Le onde sonore si propagano ad una velocità costante, di circa 343 m/sec.

Le onde sonore: *frequenza*

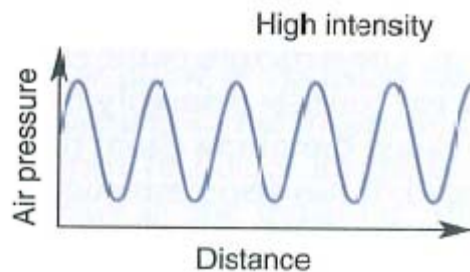
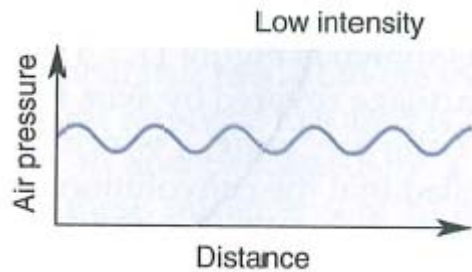


- La frequenza dell'onda sonora determina l'altezza percepita del suono. Suoni ad alta frequenza (con maggiori regioni di aria compressa) sono percepiti come tonalità più alte, suoni a bassa frequenza come tonalità più basse.
- La gamma delle frequenze sonore udibili è compresa tra 20 e 20.000 Hz!

Infra- ed Ultrasuoni

- Onde pressorie al di fuori della gamma udibile sono chiamate infrasuoni (di frequenza inferiore a 20 Hz) o ultrasuoni (di frequenza superiore a 20 kHz).
- Questi stimoli, per noi non percepibili, possono essere uditi da altri animali!
- Il nostro corpo produce continuamente dei rumori di frequenza troppo bassa per essere avvertiti.

Le onde sonore: *ampiezza*



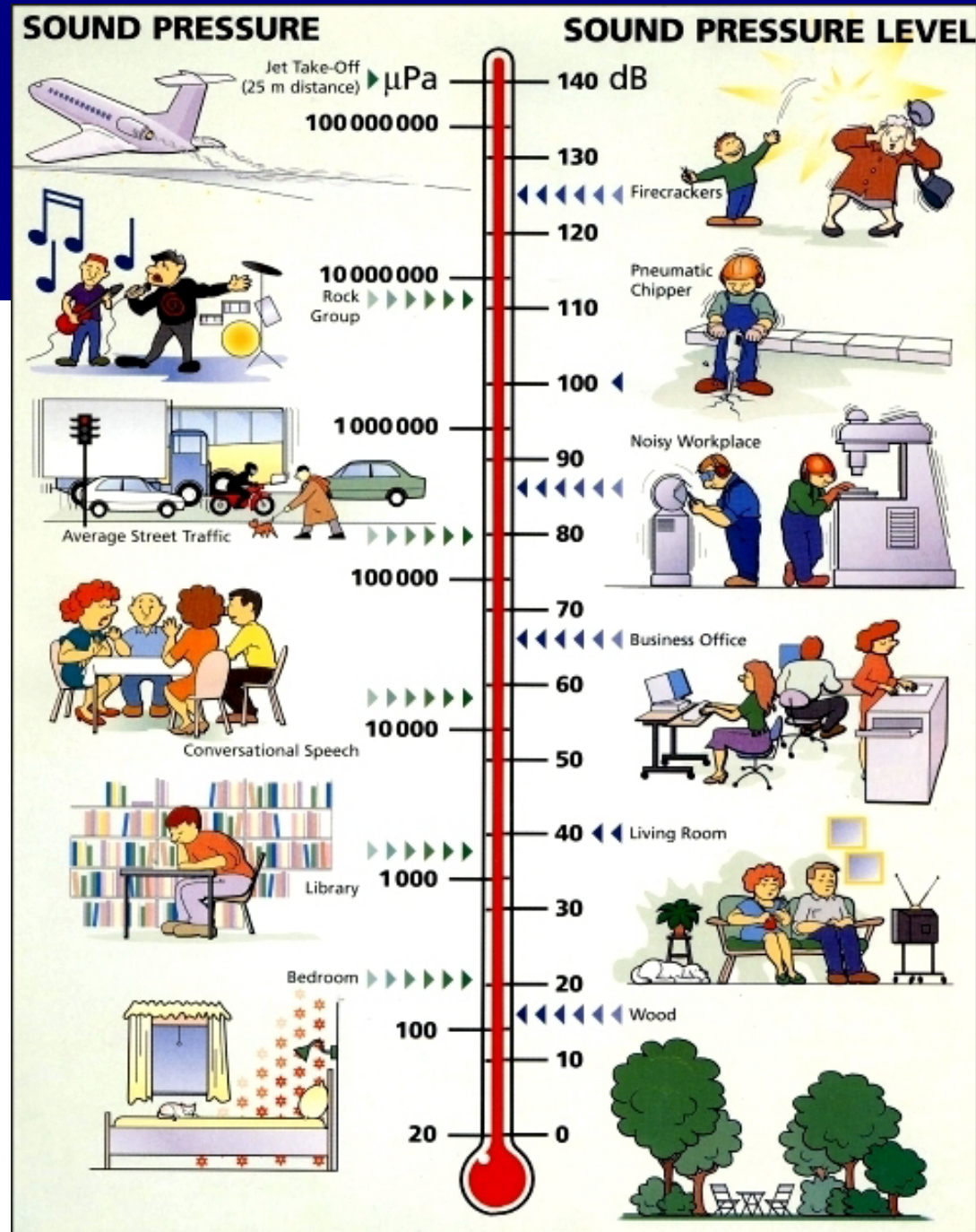
- L'ampiezza dell'onda sonora determina l'*intensità* percepita del suono. Suoni con ampiezza maggiore (con escursioni più ampie fra le zone di compressione e rarefazione dell'aria) sono percepiti come di volume più alto, suoni con ampiezza minore sono percepiti come di volume più basso.
- Siamo in grado di udire suoni entro una gamma di intensità talmente ampia che per poterla rappresentare è necessario usare una scala logaritmica: la scala *decibel*.

La scala decibel

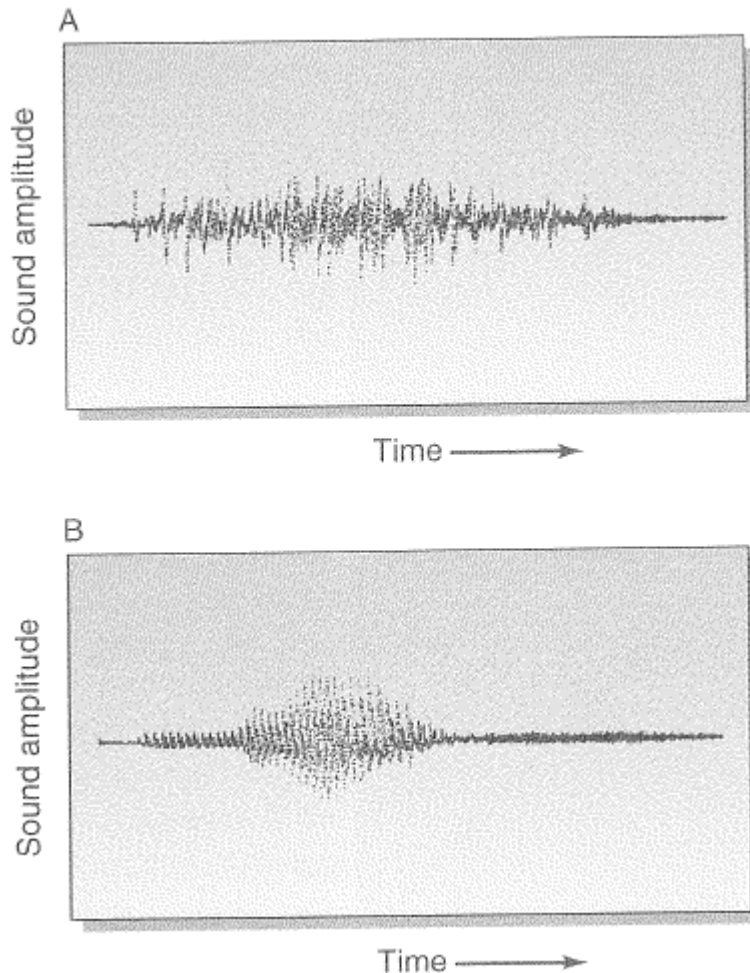
$$\text{dB} = 20 \log (p_1/p_0)$$

p_1 = pressione del suono

p_0 = pressione del suono
minimo udibile,
per convenzione $20 \mu\text{Pa}$



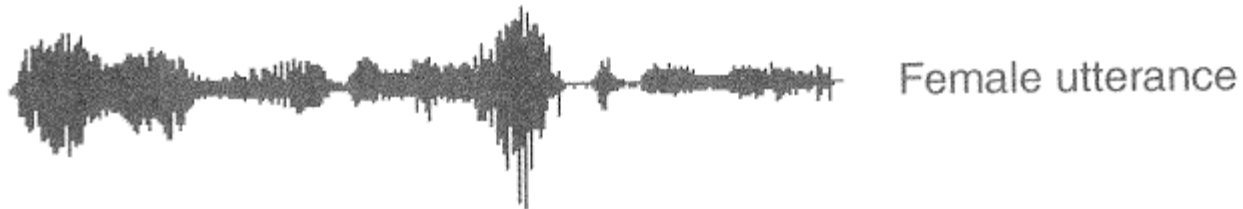
Suono e rumore (i)



- Ciò che tipicamente viene chiamato “rumore” è uno stimolo sonoro che contiene, randomizzate, tutte le frequenze possibili.
- Anche se la maggior parte dei suoni che udiamo sono composti da più frequenze, non li consideriamo “rumori”, perché le frequenze non sono mescolate a caso!

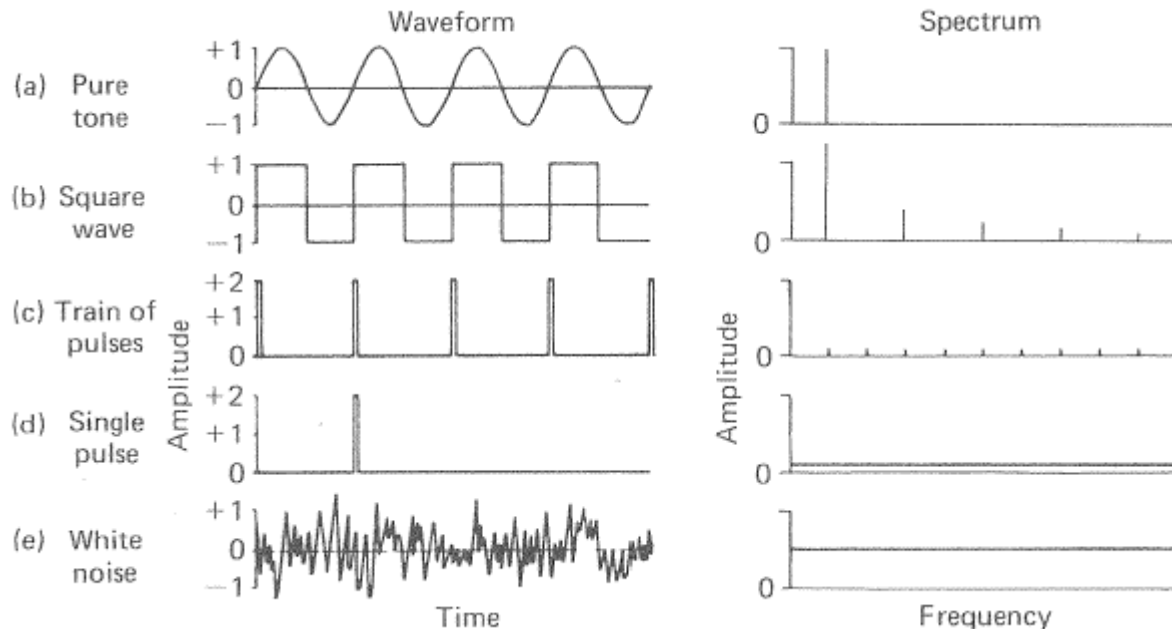
Suono e rumore (ii)

Where were you when the lights went out?



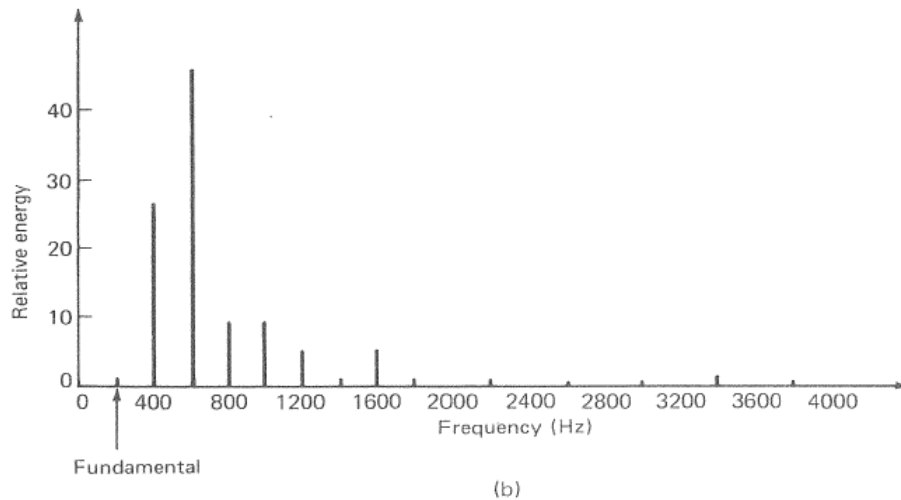
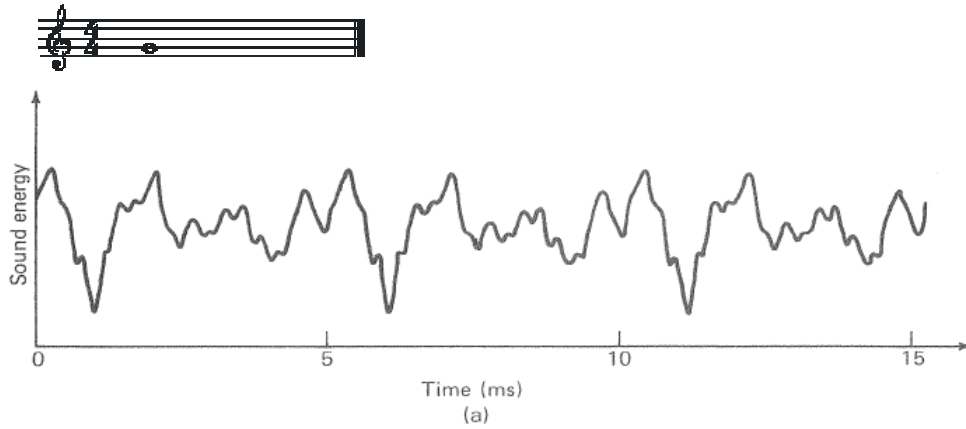
- La combinazione di onde a frequenza ed intensità diverse udite contemporaneamente conferisce a voci e strumenti musicali il loro *timbro* caratteristico ed individuale.

Suono e rumore (iii)



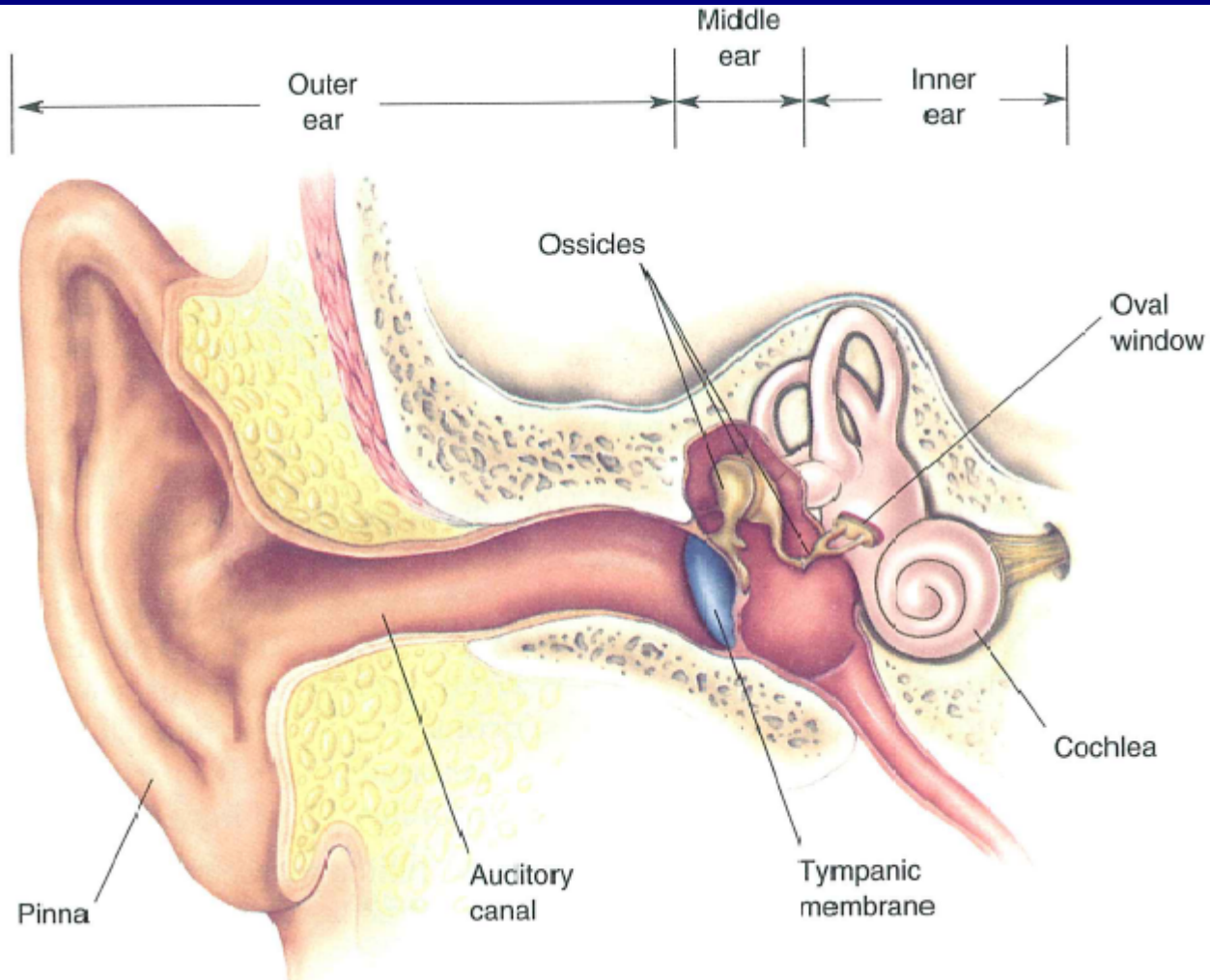
- I suoni che possono essere descritti attraverso una sola funzione sinusoidale sono detti *suoni puri*.

Suono e rumore (iv)



- Normalmente suoni e rumori descrivono onde molto complesse. Con l'analisi di Fourier si possono ottenere le onde sinusoidi che li compongono.
- La frequenza fondamentale è quella più bassa ottenibile dall'analisi di Fourier. Le altre frequenze sono multipli della fondamentale

Dall'onda pressoria al suono



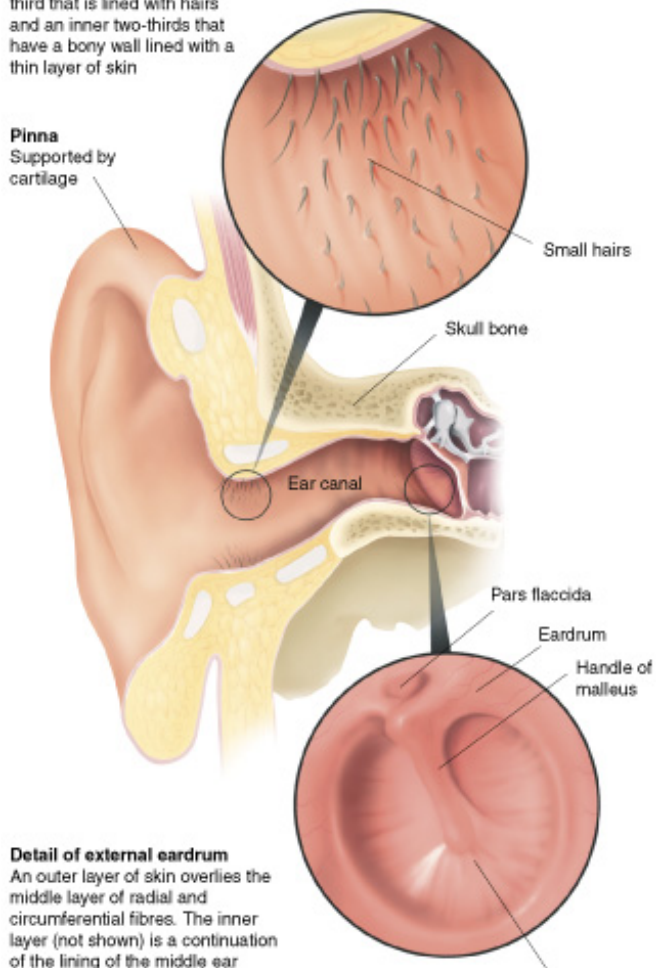
L'orecchio esterno: padiglione e canale auricolare

Ear canal

The ear canal is about one inch long comprising an outer third that is lined with hairs and an inner two-thirds that have a bony wall lined with a thin layer of skin

Pinna

Supported by cartilage

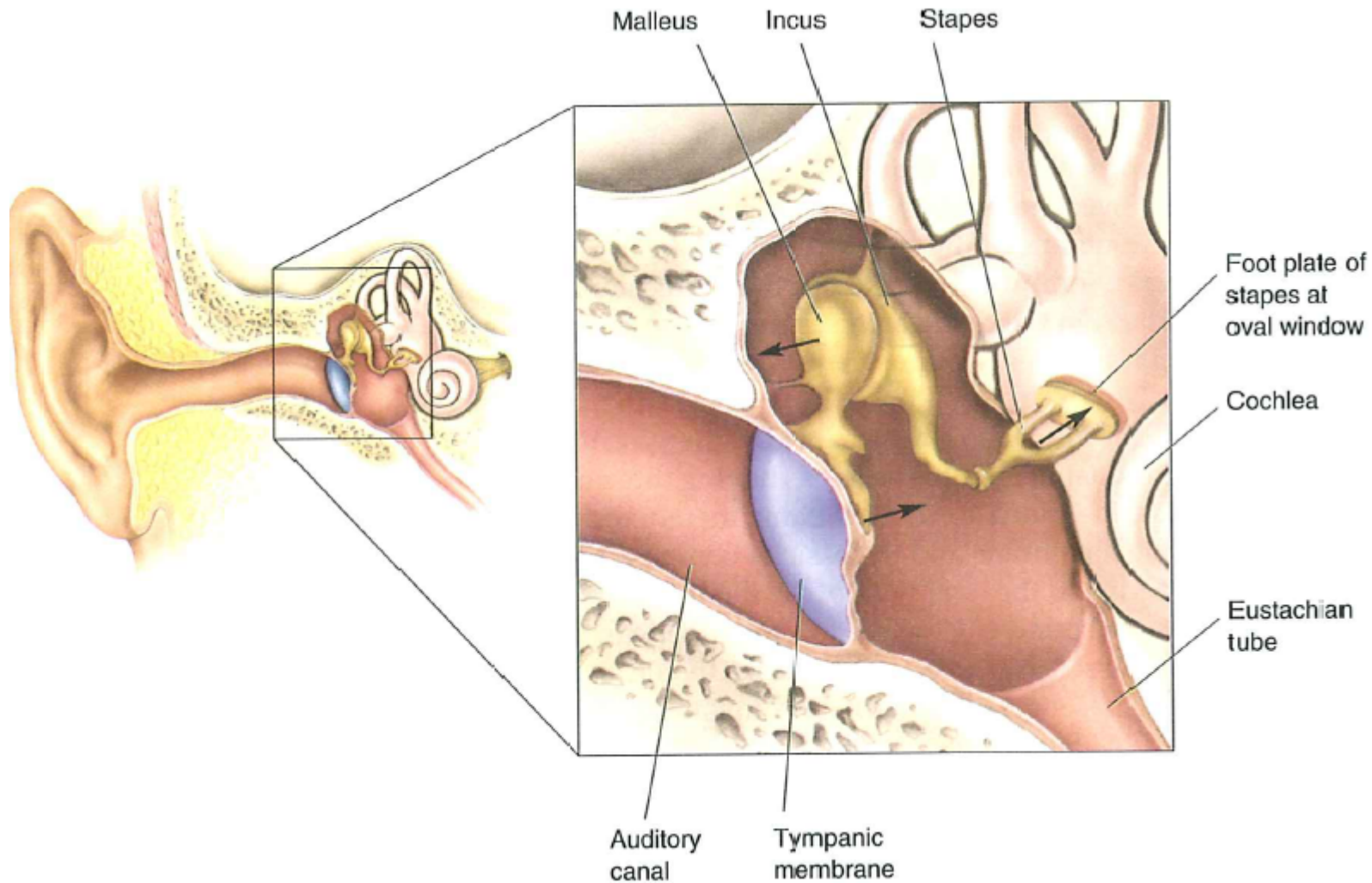


Detail of external eardrum

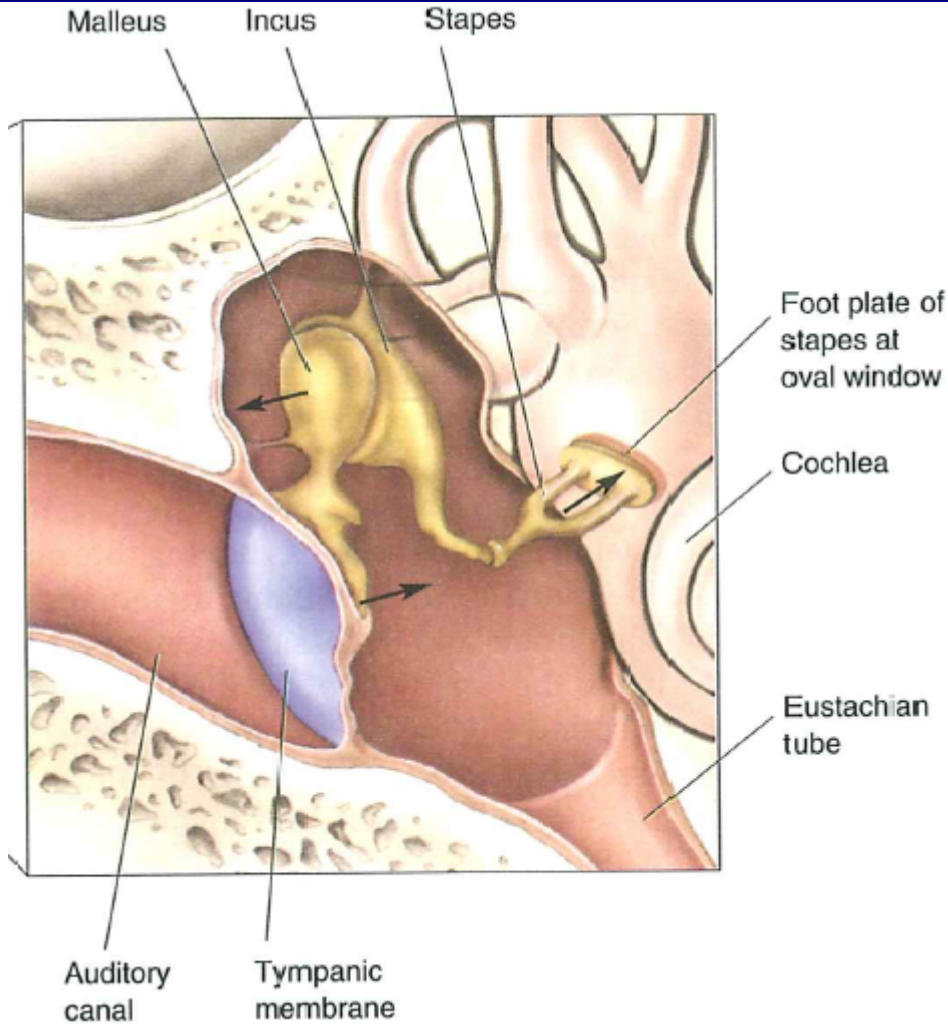
An outer layer of skin overlies the middle layer of radial and circumferential fibres. The inner layer (not shown) is a continuation of the lining of the middle ear

- La *pinna*, o la struttura cartilaginea del nostro padiglione auricolare, svolge l'importante funzione di dirigere le onde sonore verso il *canale auricolare*.
- A seconda della provenienza, il suono colpirà la pinna in modo diverso, permettendoci di inferire la sua posizione di origine.
- Per questo motivo molti animali possono muovere la pinna, per localizzare più efficacemente le fonti sonore.
- Dato che la nostra pinna è quasi immobile, per poterlo fare noi dobbiamo muovere la testa.

L'orecchio medio: timpano ed ossicini (i)

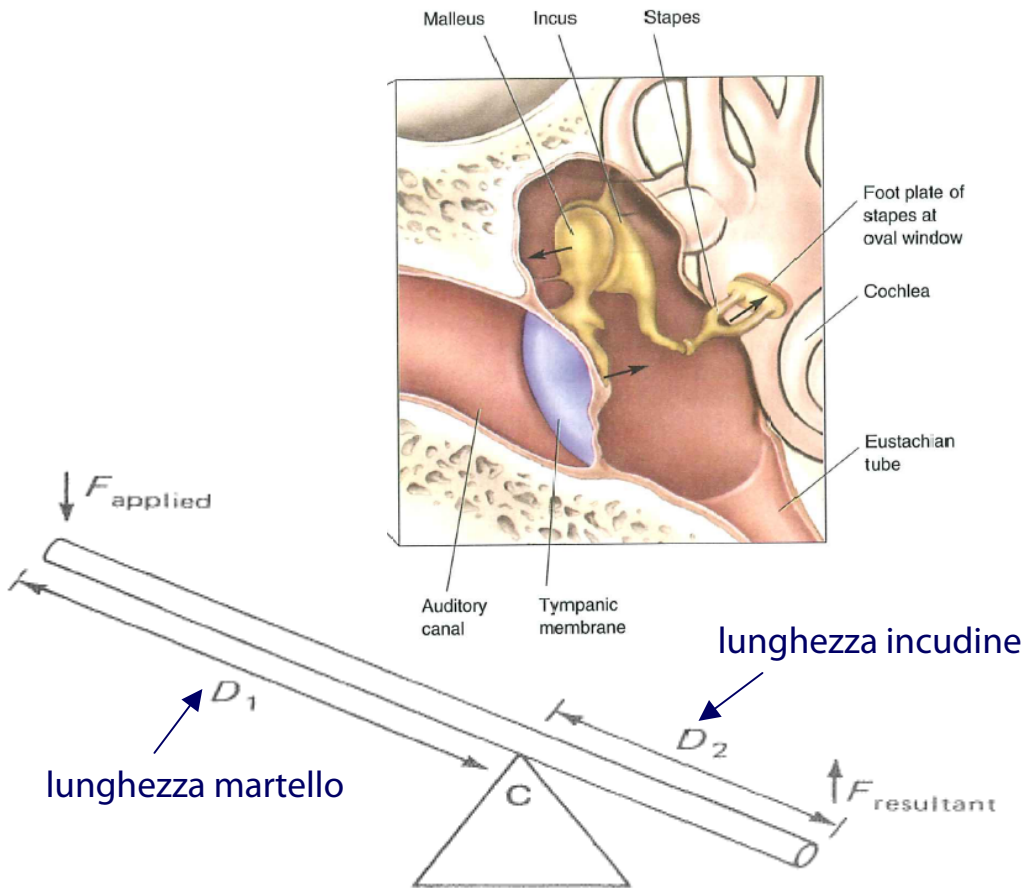


L'orecchio medio: timpano ed ossicini (ii)



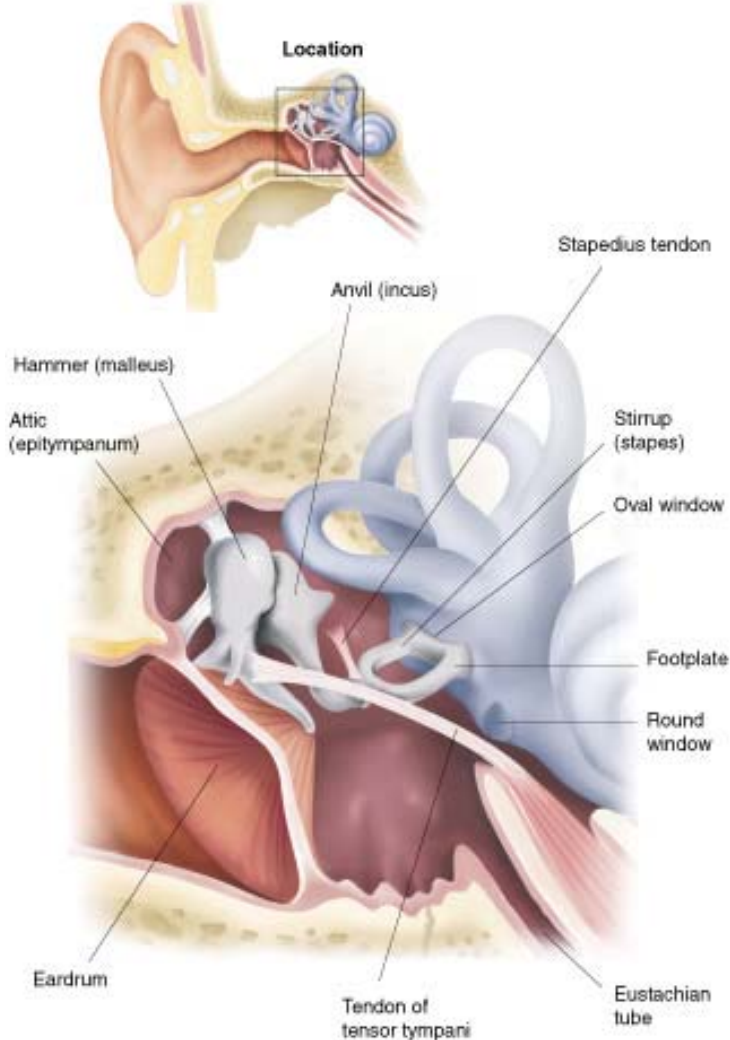
- Il *timpano* riceve una stimolazione meccanica dalle onde sonore, e la trasmette agli ossicini, che sono ad esso collegati.
- *Martello, incudine e staffa* si comportano come leve, che conducono la vibrazione del timpano fino alla *finestra ovale*.

L'orecchio medio: timpano ed ossicini (iii)



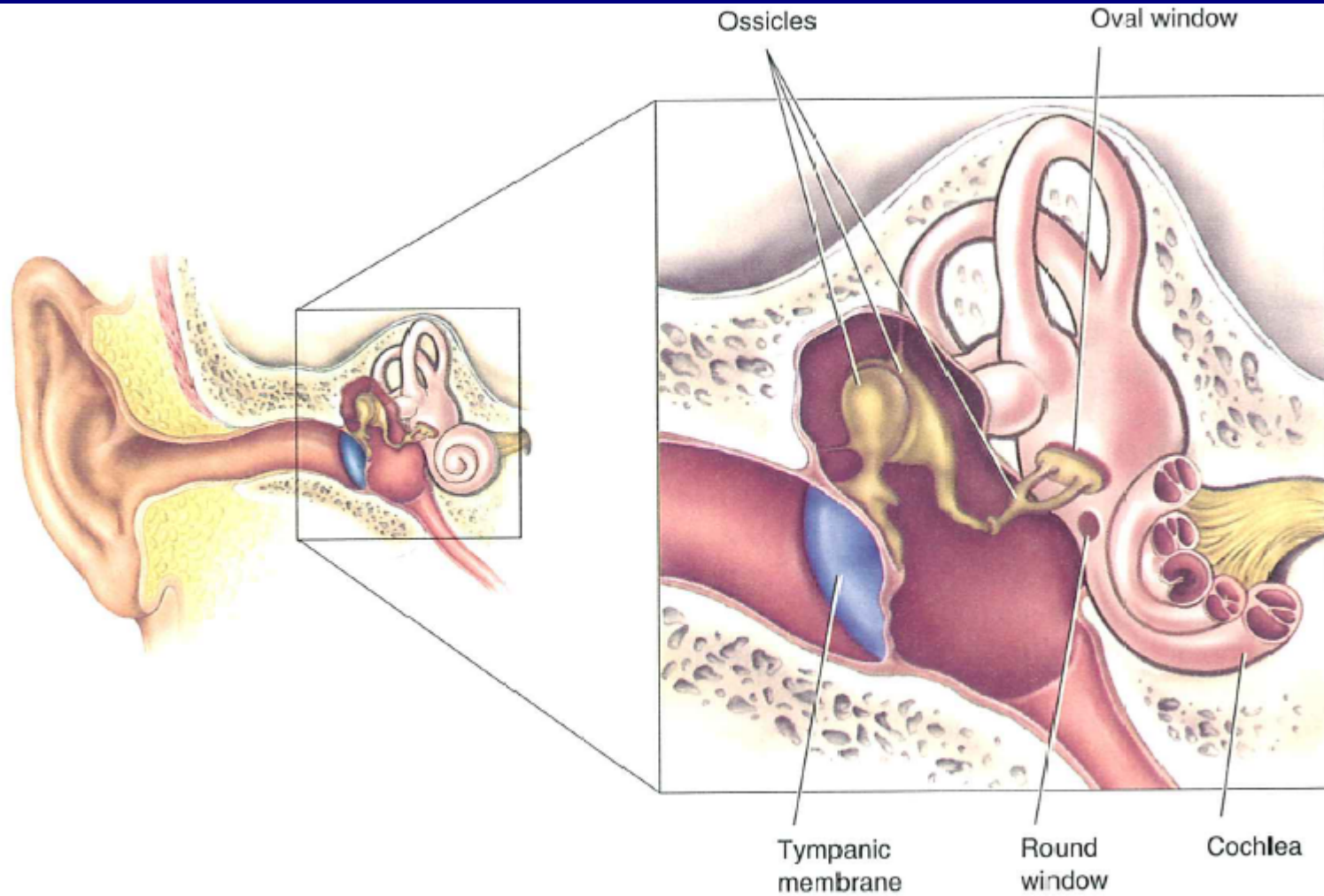
- La stimolazione meccanica che raggiunge la finestra ovale è *amplificata* rispetto a quella esercitata sul timpano.
- Questo è necessario per superare l'inerzia presente nella coclea, che a differenza dell'orecchio medio (che è circondato d'aria), contiene un fluido acquoso.

L'orecchio medio: il riflesso di attenuazione

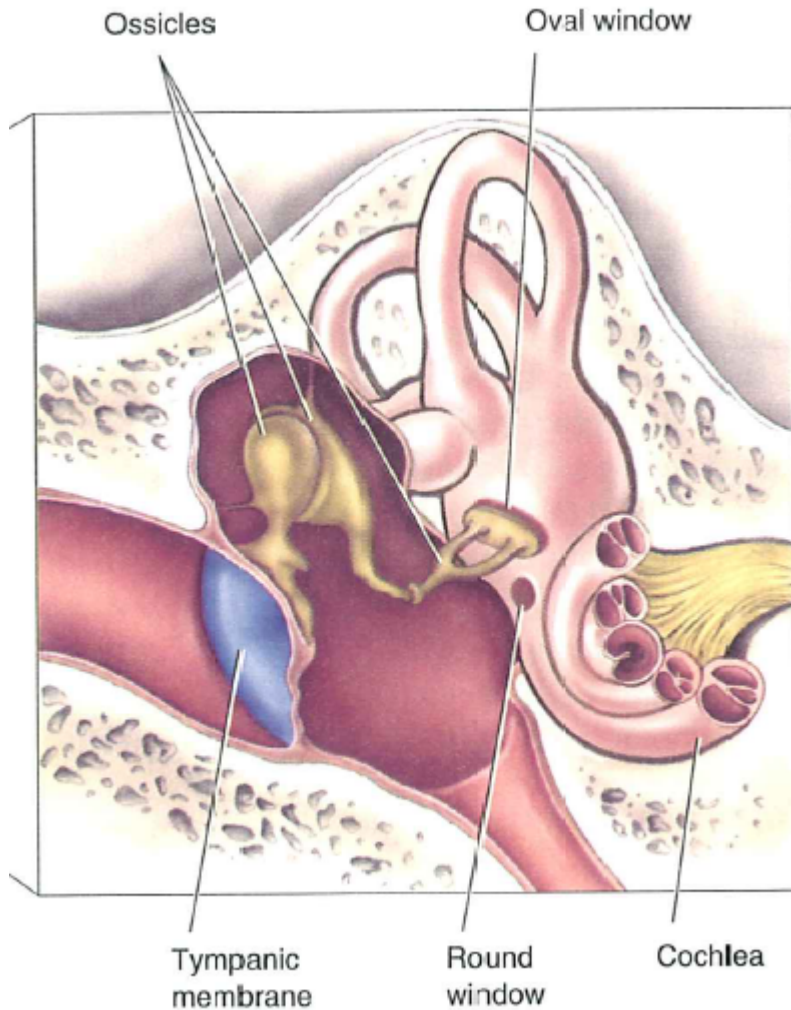


- La tensione del timpano può essere modulata dal *muscolo tensore del timpano*, che contraendosi può ridurre l'elasticità.
- Assieme al *muscolo stapedio*, che è collegato alla staffa, media il riflesso acustico, o riflesso di attenuazione.
- In presenza di suoni o rumori molto intensi questi muscoli si contraggono, riducendo la mobilità di timpano ed ossicini.
- Questo riflesso ha una latenza di circa 200 ms ed è particolarmente efficace per inibire suoni intensi a basse frequenze.

L'orecchio interno: coclea (i)

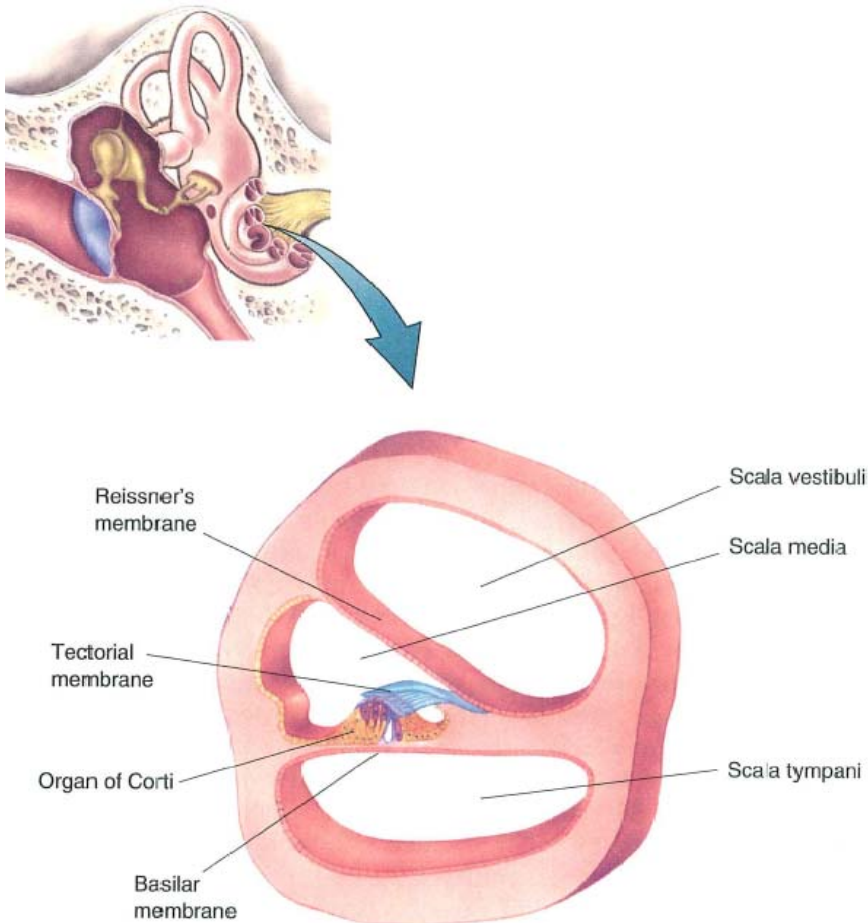


L'orecchio interno: coclea (ii)



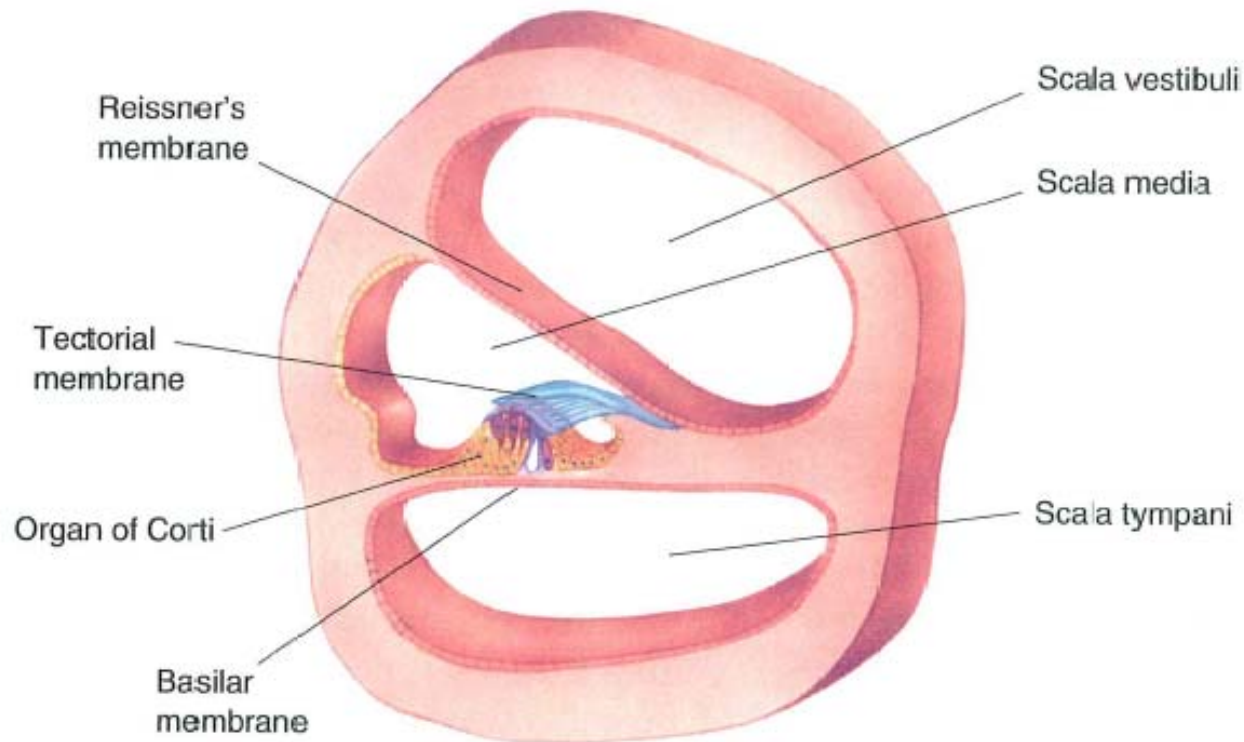
- La *coclea* contiene i recettori sensitivi degli stimoli acustici, che trasformano le stimolazioni meccaniche delle onde sonore in segnali nervosi.
- Ha la forma di una chiocciola, di struttura ossea e cava, arrotolata intorno ad una struttura centrale detta *modiolo*.

L'orecchio interno: coclea (iii)



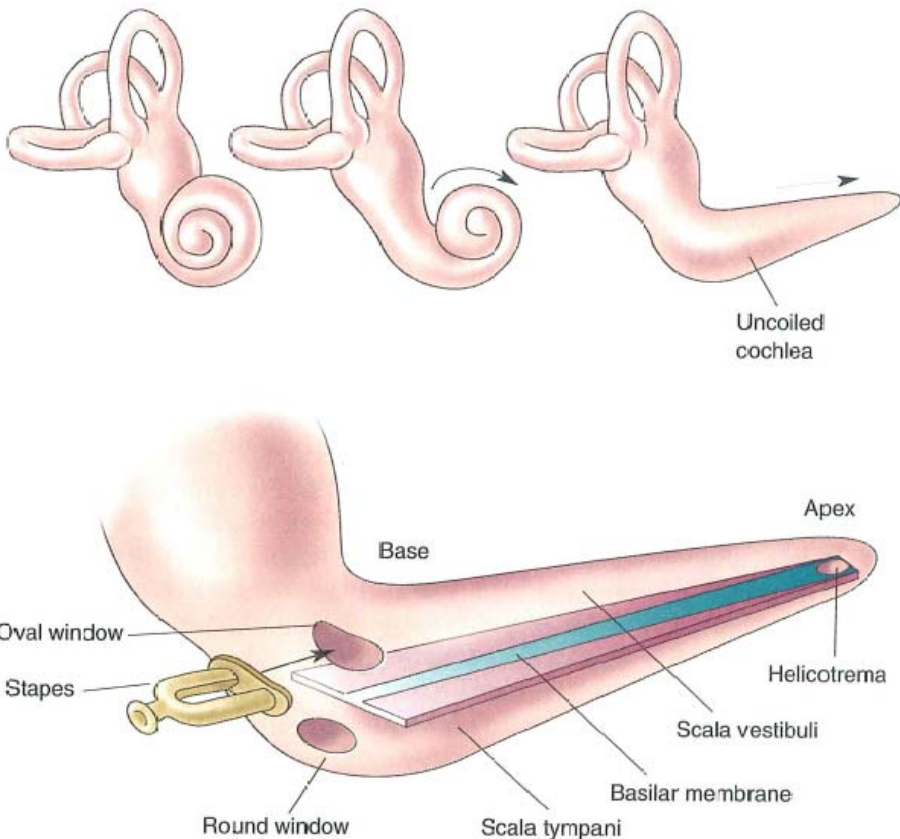
- La coclea è suddivisa longitudinalmente in tre settori, chiamati *scale*:
 - *Scala vestibolare*
 - *Scala media (o dotto cocleare)*
 - *Scala timpanica*
- I settori sono creati da delle membrane dette:
 - *Membrana di Reissner* (fra la s. vestibolare e la s. media)
 - *Membrana basilare* (fra la s. timpanica e la s. media)

L'orecchio interno: coclea (iv)



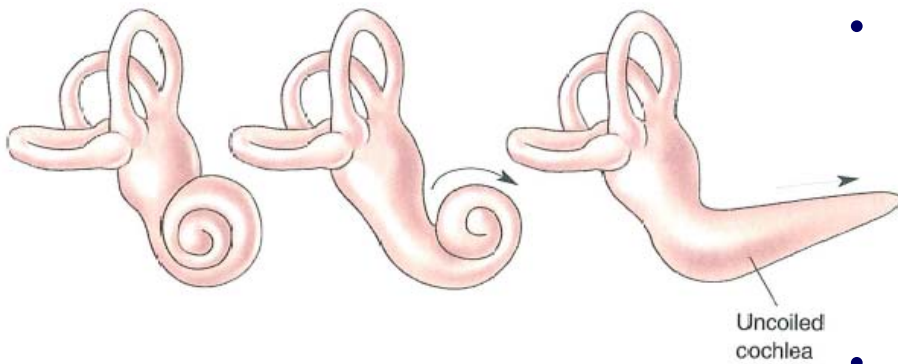
- Sulla membrana basilare, nella scala media, si trova l'*organo di Corti*, che contiene i recettori sensitivi, ed è sovrastato dalla *membrana tectoria*.

L'orecchio interno: coclea (v)

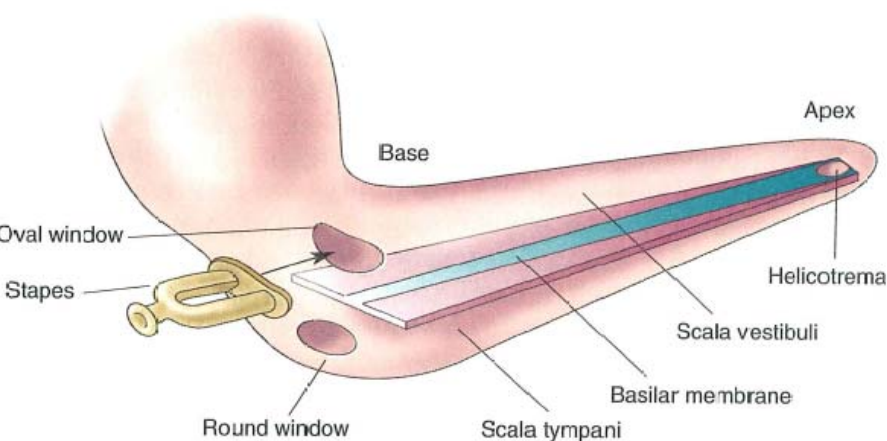


- All'apice della spirale le scale vestibolare e timpanica sono messe in comunicazione da un foro, detto *elicotrema*.
- Mentre il liquido contenuto dalle s. vestibolare e timpanica è detto *perilinf*a (simile al fluido cerebrospinale), quello contenuto dalla s. media è detto *endolinf*a (simile al fluido intracellulare).
- Questi liquidi differiscono fra loro per il grado di concentrazione di sodio (Na) e potassio (K).

La membrana basilare (i)

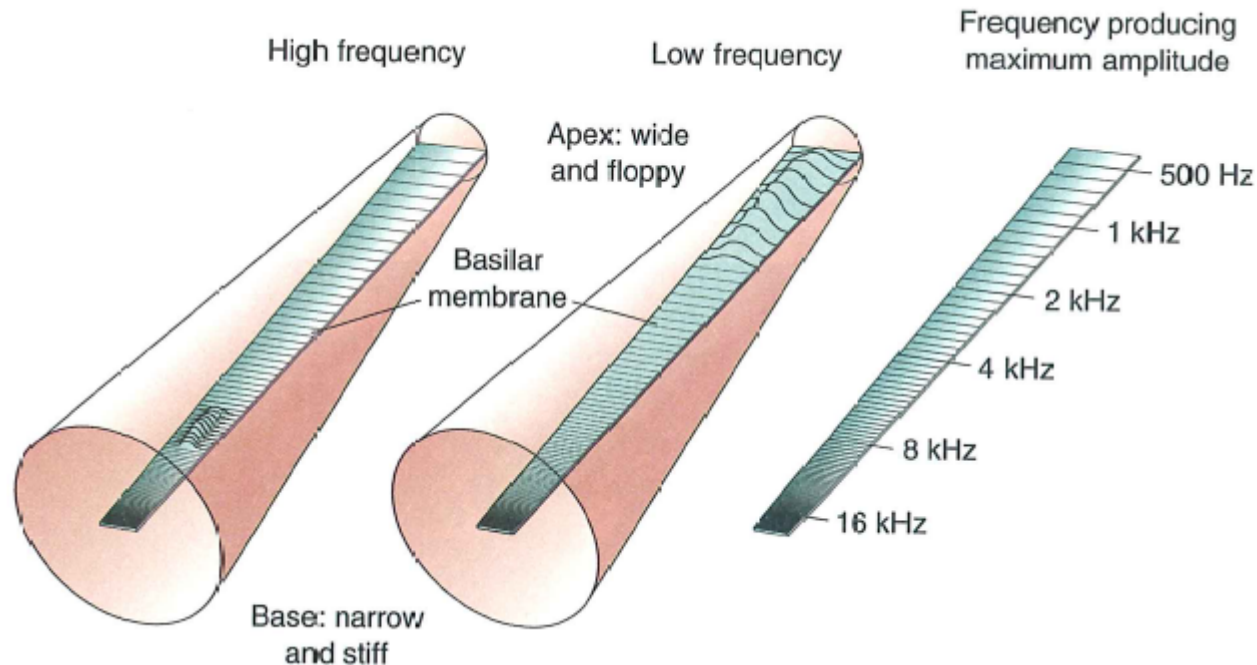


- Le vibrazioni conferite alla finestra ovale da timpano ed ossicini producono spostamenti di endo- e perilinfia che interessano la membrana basilare.



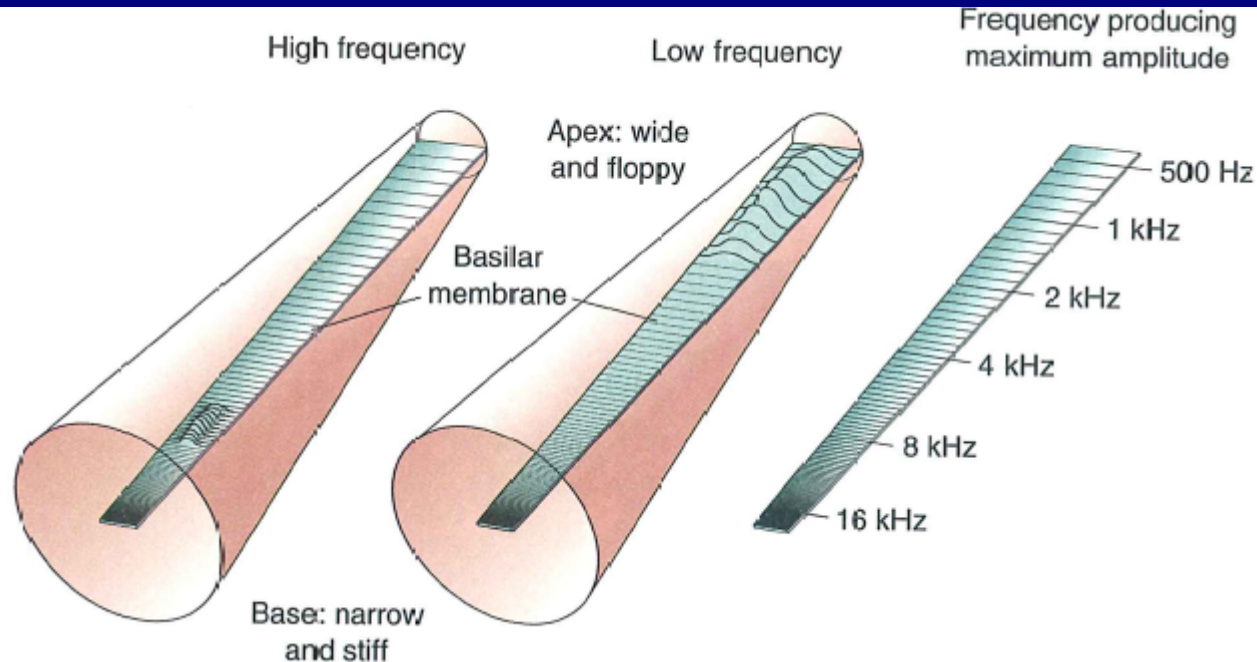
- La membrana basilare è sensibile agli stimoli sonori grazie a due caratteristiche principali:
 1. L'ampiezza della membrana aumenta verso l'interno della coclea, diventando 5 volte più larga che alla base.
 2. La rigidità della membrana diminuisce verso l'interno, diventando 100 volte più flessibile che alla base.

La membrana basilare (ii)



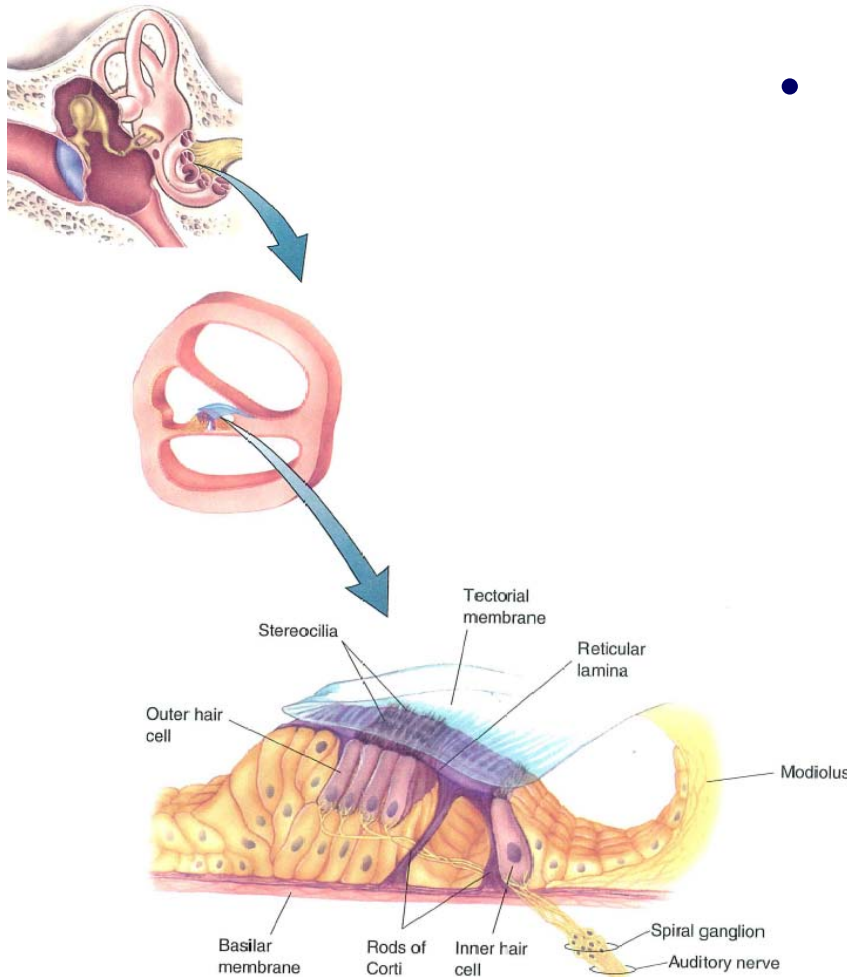
- Il movimento dell'endolinfa determina una curvatura della parte iniziale della membrana basilare, che si propaga come un'onda per tutta la sua lunghezza.

La membrana basilare (iii)

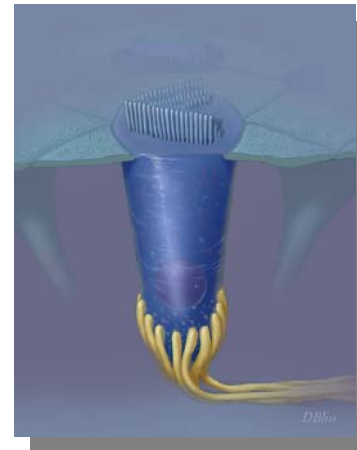


- Più bassa sarà la frequenza del suono e maggiore sarà la distanza percorsa da quest'onda.
- Zone diverse della membrana sono massimamente stimolate da stimoli con frequenza diversa, c'è una codifica spaziale (*tonotopica*) della frequenza dei suoni.

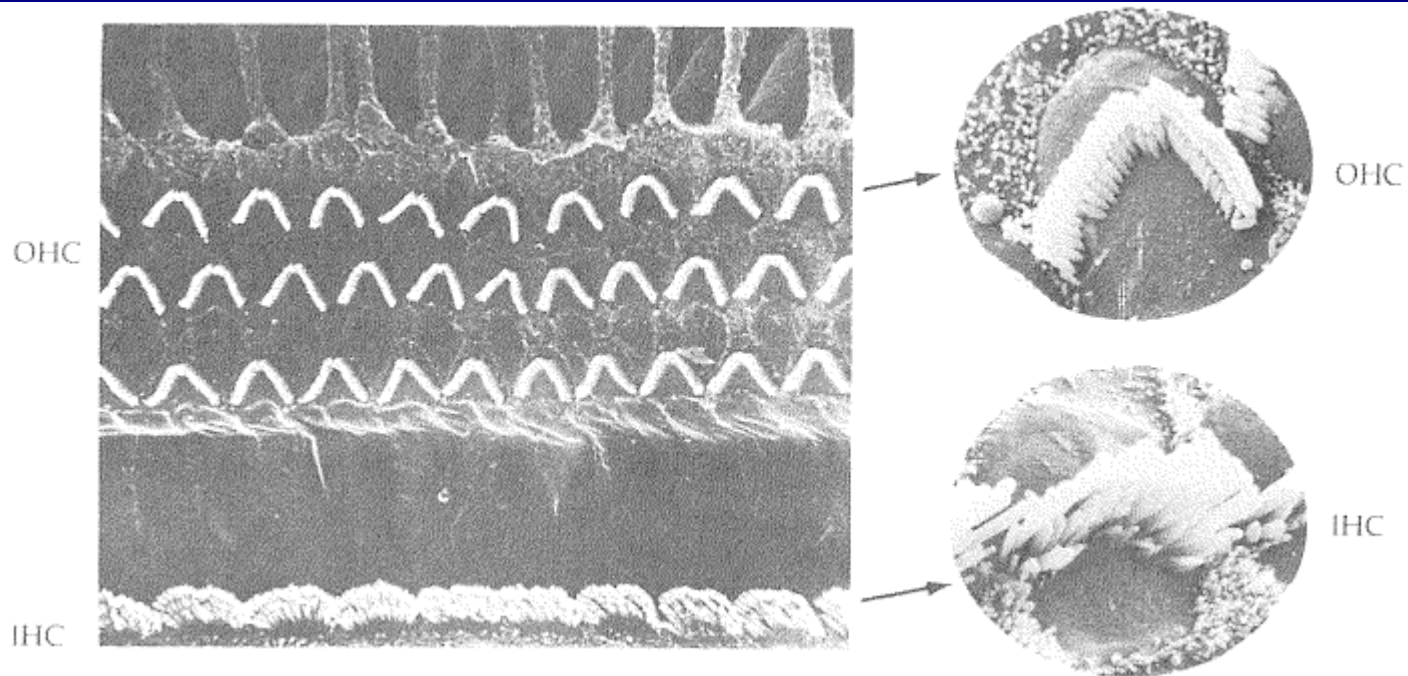
L'organo di Corti (i)



- L'organo di Corti contiene i recettori degli stimoli sonori: le *cellule cigliate* della coclea.

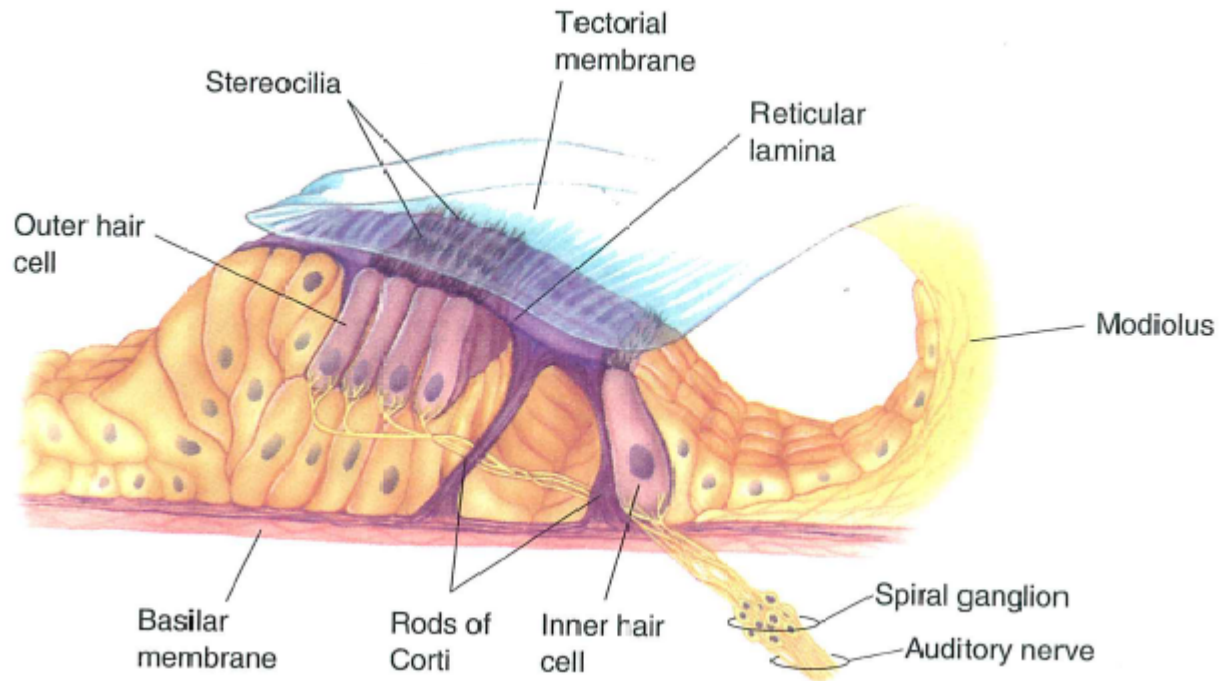


L'organo di Corti (ii)



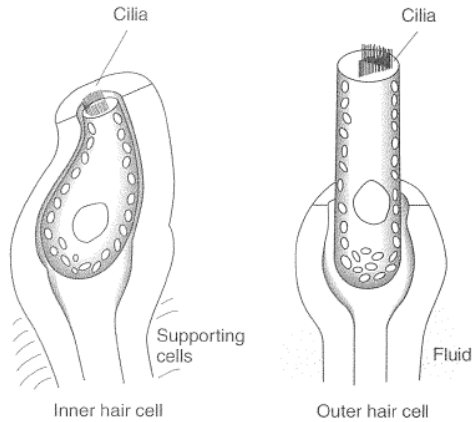
- Le cellule cigliate traducono la stimolazione meccanica in segnale nervoso.
- Ognuno di questi neuroni possiede circa 100 prolungamenti, detti *stereociglia*.

L'organo di Corti (ii)

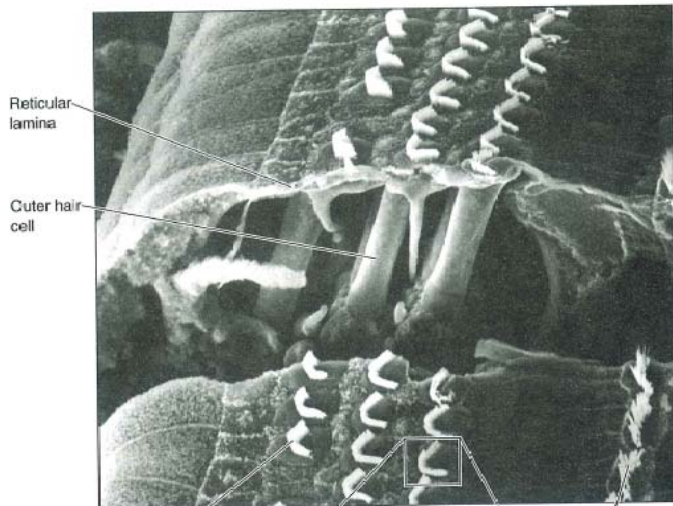


- Le stereociglia attraversano una membrana detta *lamina reticolare* e, circondate da endolinfa, raggiungono la membrana tectoria.
- Mentre le ciglia all'inizio della m. basilare sono più corte e rigide, quelle vicine all'elicotrema sono più lunghe e sottili.

Le cellule cigliate (i)



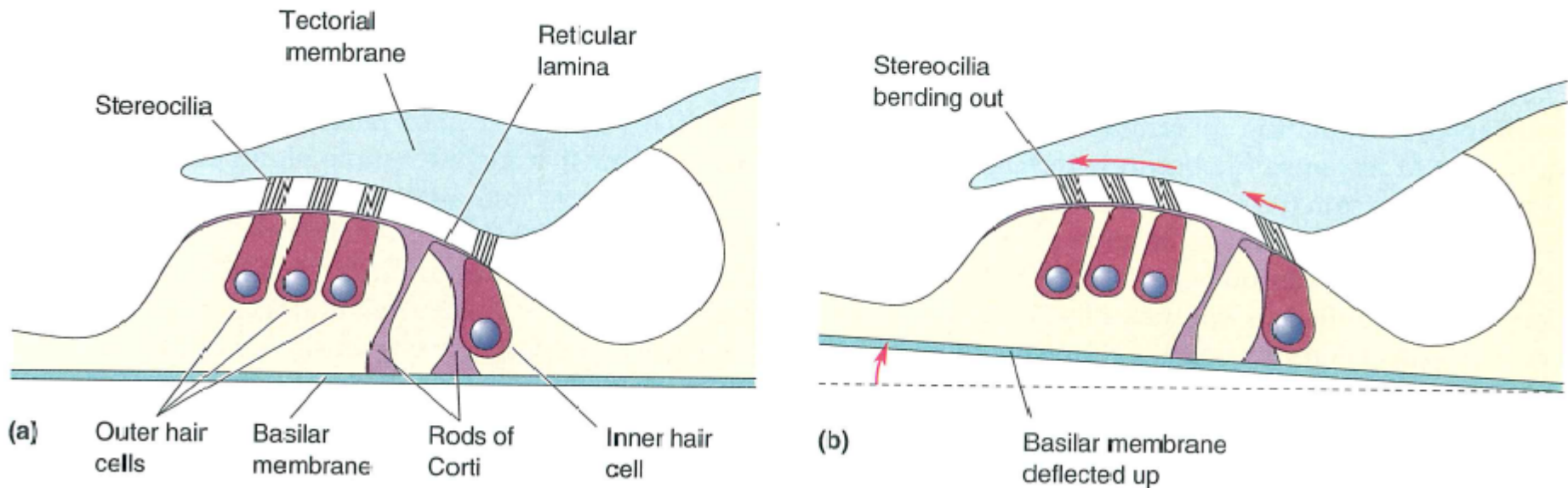
- Esistono due tipi di cellule cigliate, *interne* ed *esterne*, che differiscono fra loro:
 - Per la posizione che occupano sulla membrana basale (vicino al modiolo o verso l'esterno della coclea)
 - Per quantità (3500 interne vs. 20000 esterne)
 - Per la forma che hanno (le interne sono più grandi e a “fiasco”, le esterne sono più piccole e cilindriche)
 - Per la disposizione delle ciglia



Le cellule cigliate (ii)

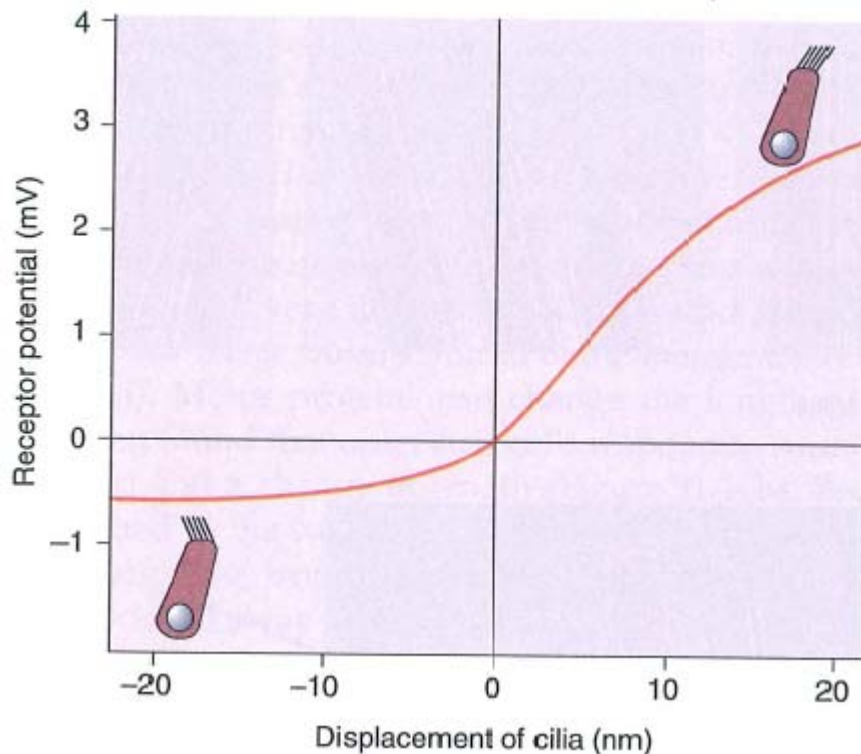
- Quando la staffa trasmette il movimento alla finestra ovale, la membrana basilare si sposta, e con essa si muove tutta la struttura dell'organo di Corti.
- Il movimento della membrana tettoria sarà invece *indipendente* da quello della m. basilare, permettendo alle stereociglia di piegarsi sia verso il modiolo che verso l'esterno della coclea.
- Dato che le ciglia di ogni cellula sono collegate fra loro, queste assumono un piegamento omogeneo.

Le cellule cigliate (iii)



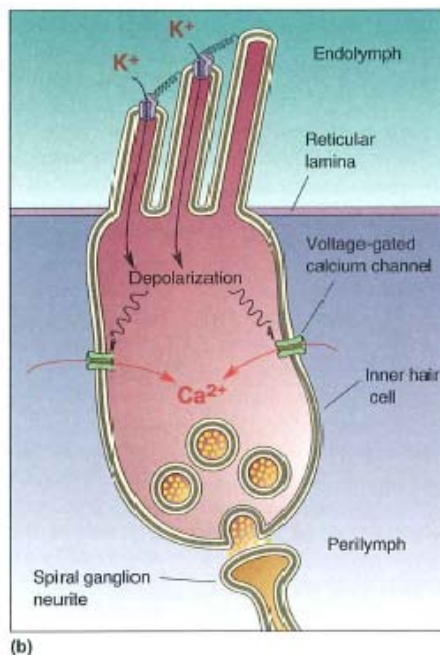
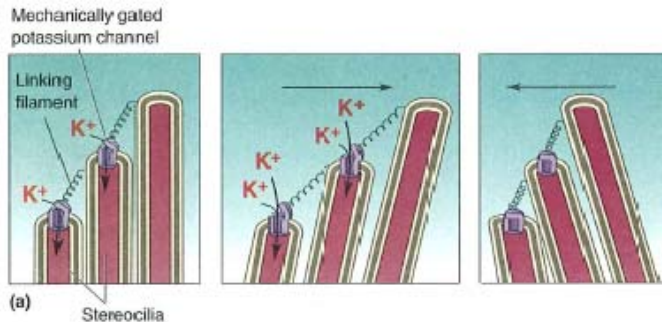
- Il *grado di piegamento* delle ciglia determina variazioni nel segnale nervoso che i recettori inviano alla corteccia.

Dal suono al segnale nervoso (i)



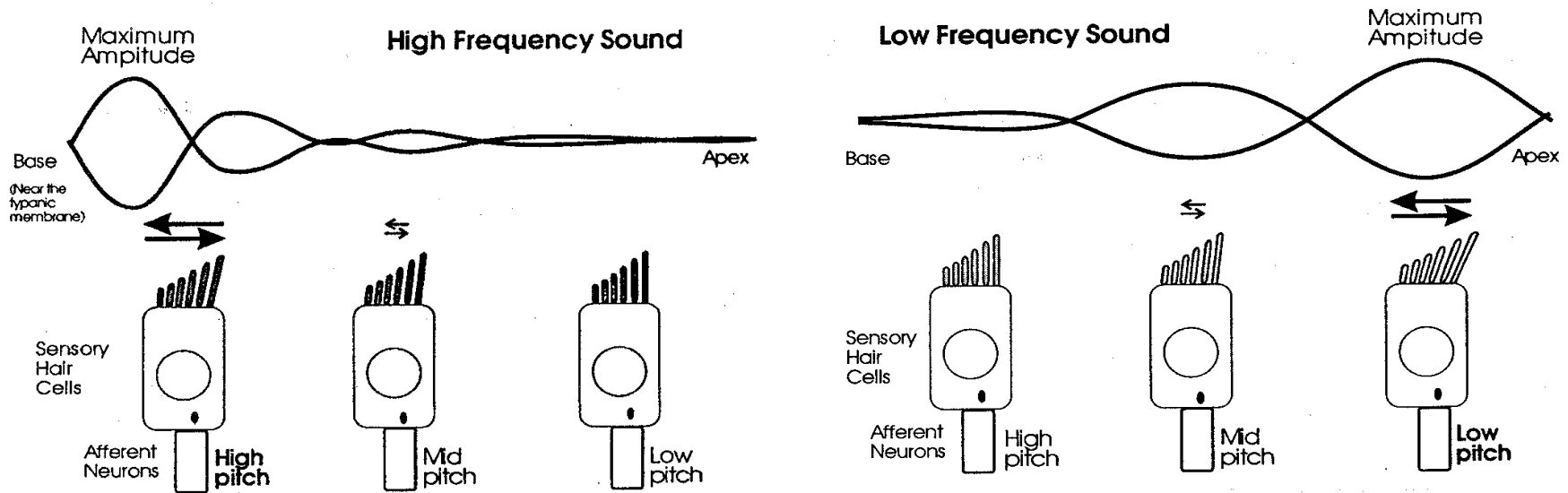
- Il potenziale delle cellule cigliate è direttamente influenzato dalla direzione di piegamento delle stereociglia.
- Se il piegamento in una direzione causa una *iperpolarizzazione* della cellula, il piegamento opposto causa una *depolarizzazione*.

Dal suono al segnale nervoso (ii)



- La cellula depolarizzata libera una certa quantità di neurotrasmettitore che “segnala” agli altri neuroni l’avvenuta stimolazione acustica.
- L’attivazione delle cellule cigliate viene trasmessa a dei neuroni bipolari detti *cellule gangliari* dei gangli a spirale di Corti.

Dal suono al segnale nervoso (iii)



La modulazione di flessibilità e larghezza della membrana basilare, assieme alla modulazione di flessibilità e lunghezza delle stereociglia determinano la rappresentazione tonotopica delle frequenze delle onde sonore nella coclea.³³