

SENSI NATURALI E ARTIFICIALI

UDITO

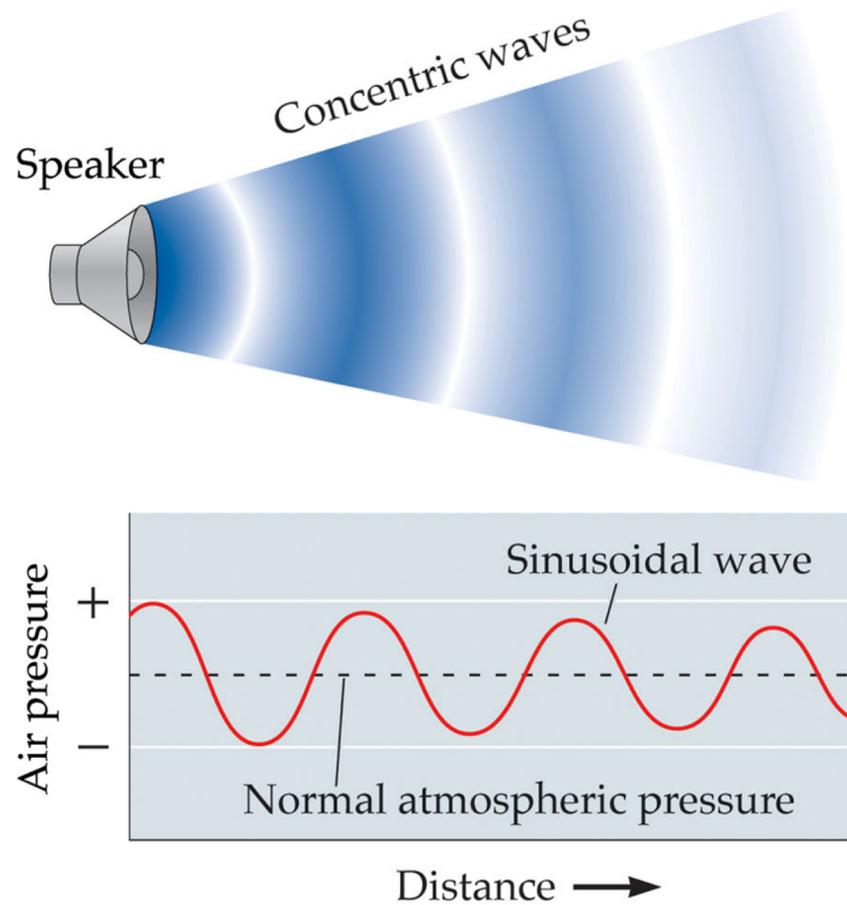
Obbiettivi

- Capire cosa e come si genera il suono
- Studiare le strutture basilari del sistema acustico
 - Anatomia e fisiologia del sistema acustico
- Caratteristiche operative di base del sistema acustico
- Come percepiamo il suono:
 - Intensità e Volume

Come si genera il suono

- I suoni sono creati dalle vibrazioni degli oggetti
- Le vibrazioni di oggetti producono vibrazioni nelle molecole presenti nel mezzo che circonda l'oggetto
 - Udito dell'uomo, l'atmosfera
- Questo causa differenze di pressione nell'aria che si propagano in ogni direzione

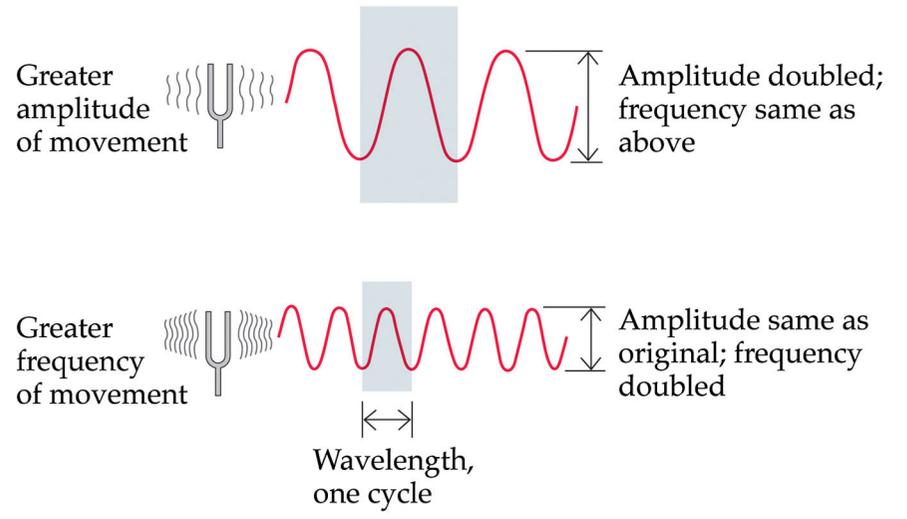
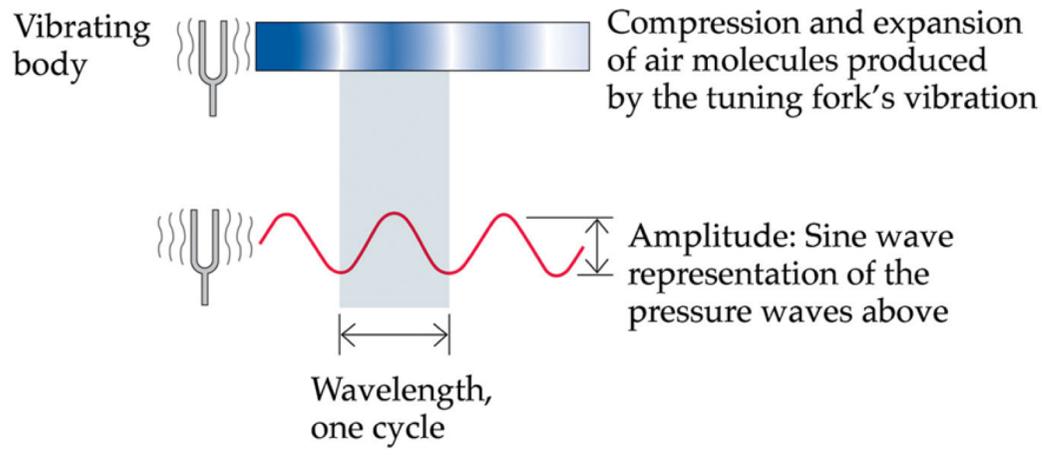
Come si genera il suono



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.1 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

- Le onde sonore viaggiano con una certa velocità di propagazione
 - Funzione del mezzo di trasmissione
- Esempio: La velocità del suono attraverso l'aria è di circa 340 m/s, ma consideriamo come mezzo l'acqua la velocità cresce sino a 1500 m/s

- **Caratteristiche fondamentali delle onde sonore**
 - **Ampiezza:** Grandezza del profilo di variazione di pressione dell'onda sonora
 - **Intensità:** Quantità di energia sonora che cade su una unità di area
 - **Frequenza:** Per i suoni è il numero di cicli (in termini di variazione di pressione) che si ripetono in un secondo
 - **Volume:** L'aspetto psicologico del suono relativo alla intensità percepita



- Ampiezza e lunghezza d'onda della luce corrispondono a qualità visive
 - Luminosità e colore
- Ampiezza e frequenza dell'onda sonora sono correlate alle caratteristiche uditive
 - Ampiezza del suono: associato al volume percepito
 - Frequenza dell'onda sonora: Altezza del suono

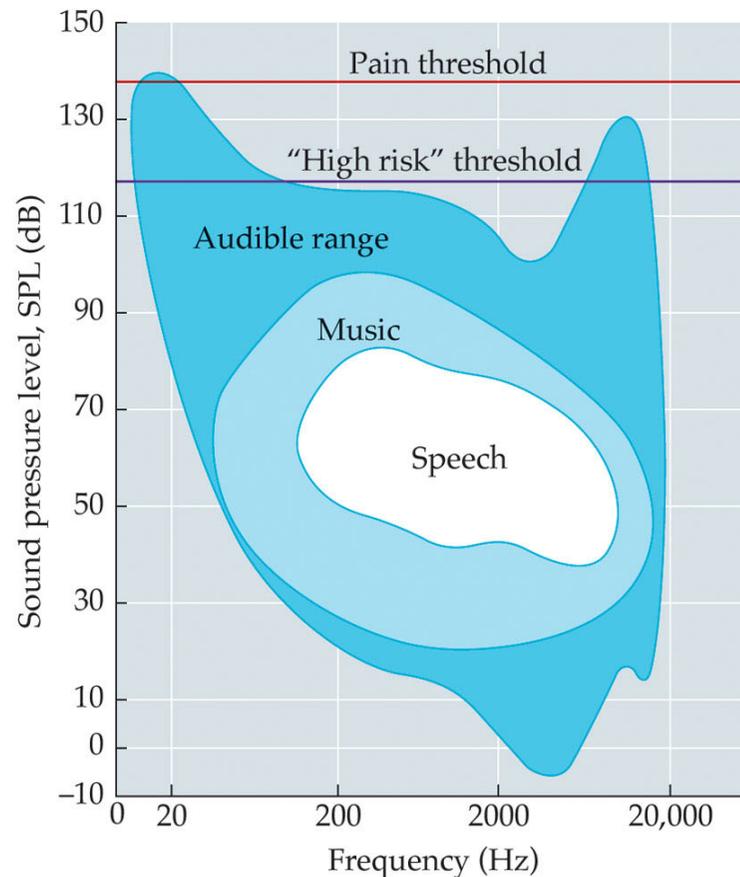
- La frequenza è associata con l'altezza di un suono
 - Suoni a basse frequenze corrispondono a suoni con altezze basse (e.g., toni bassi suonati da una tuba)
 - Suoni ad alte frequenze corrispondono a suoni con altezze alti (e.g., suoni alti suonati da un violoncello)

Capacità recettive dell'uomo

- Come per la capacità visiva
 - Spettro dell'onda elettromagnetica nel campo del visibile
- Capacità dell'udito nell'uomo
 - Gamma limitata delle frequenze presenti nell'ambiente
 - Range frequenziale compreso [20 -20K] Hz

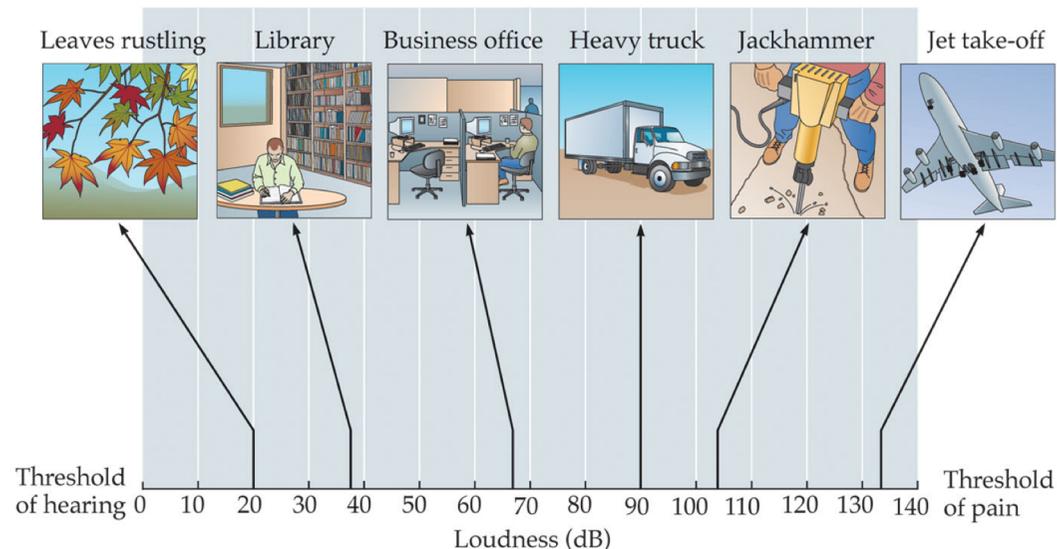
Capacità recettive dell'uomo

- Range Frequenza – Ampiezza per l'uomo



- L'udito degli umani è sensibile anche ad un ampio range di intensità
 - Il rapporto fra il volume più basso e quello più alto di un suono che risulta percepibile è quasi di uno su un milione!
- Al fine di descrivere le differenze in ampiezza in una gamma così ampia si usa una scala logaritmica
 - Livelli di sonorità misurata usando i decibel (dB)
- Decibel: unità di misura dell'intensità del suono
 - $\text{dB} = 20 \log(p/p_0)$
 - Differenza tra 2 suoni in termini di rapporto tra le due onde sonore corrispondenti

- Cambiamenti relativamente piccoli in decibels possono corrispondere a cambiamenti fisici molto consistenti
 - (pe. un incremento di 6 decibels corrisponde circa ad un raddoppio della pressione del suono)

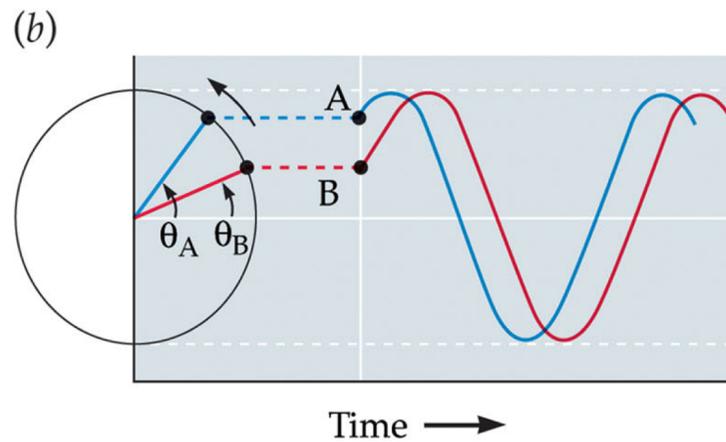
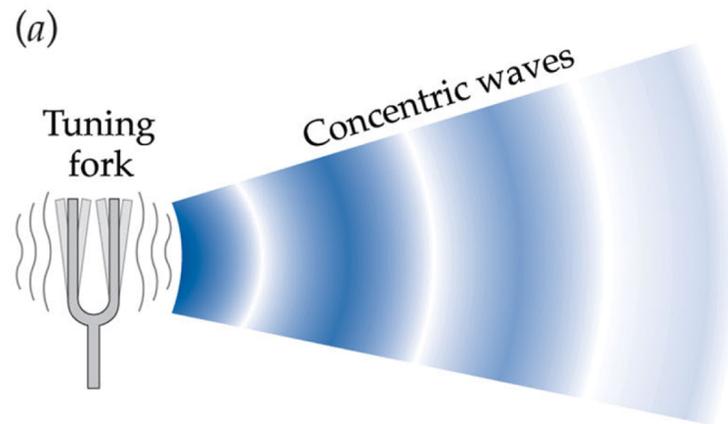


SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.4 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

- Decibel: unità di misura dell'intensità del suono
 - $\text{dB} = 20 \log(p/p_0)$
- P_0 è una pressione di riferimento
 - Livello più vicino alla pressione più bassa rilevabile per le frequenze a cui siamo più sensibili
 - $0,0002 \text{ dyne/cm}^2$
- I diversi livelli ottenuti sono definiti come
 - dB LPS= decibel del livello di pressione sonora

Toni puri

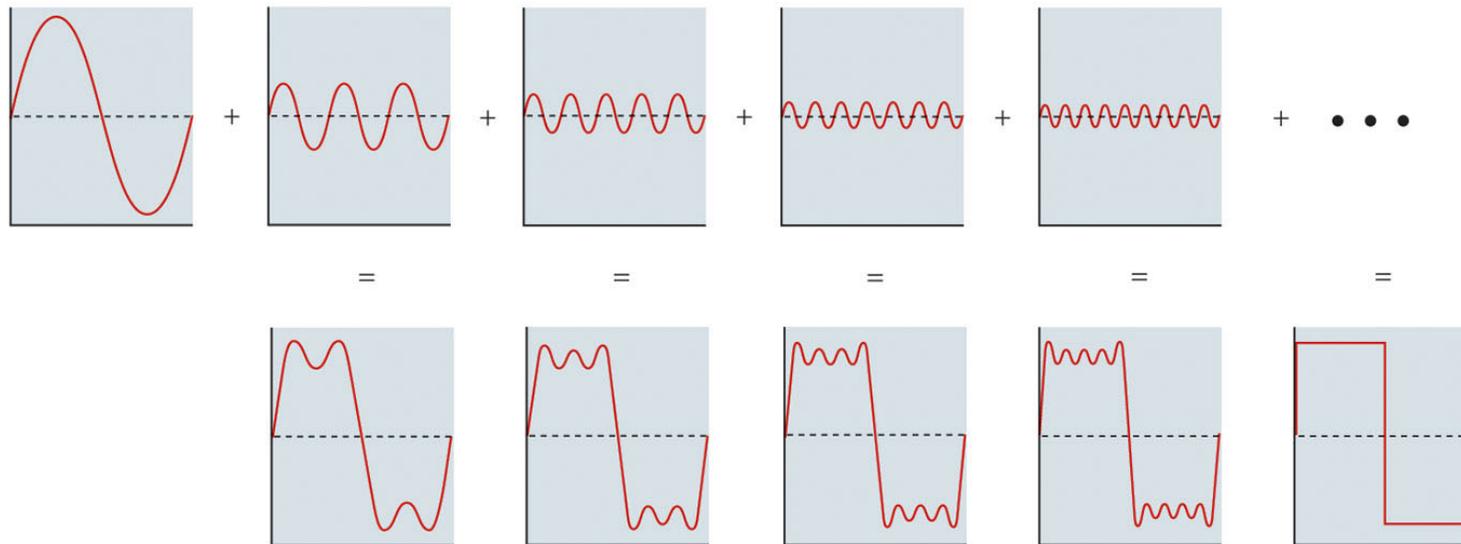
- Uno dei più semplici tipi di suoni
 - Onde sinusoidali o toni puri
- Toni puri: Onde per cui le variazioni in funzione del tempo sono descritte da una onda sinusoidale
- Il tempo per un ciclo completo dell'onda sinusoidale è definito Periodo
 - Ci sono 360 gradi di fase in un intero periodo



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.5 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

- Nella vita di tutti i giorni non ci sono toni puri o onde sinusoidali
 - poche vibrazioni sono così pure
- I suoni più comuni nel mondo sono suoni complessi (e.g., voci umane, di uccelli, suoni di macchine etc.)
- Viste le caratteristiche delle onde sonore, ovvero di essere onde pressorie con andamento periodico riconducibili a sinusoidi
 - Teorema di Fourier: tutti i suoni complessi possono essere descritti come combinazioni di onde sinusoidali

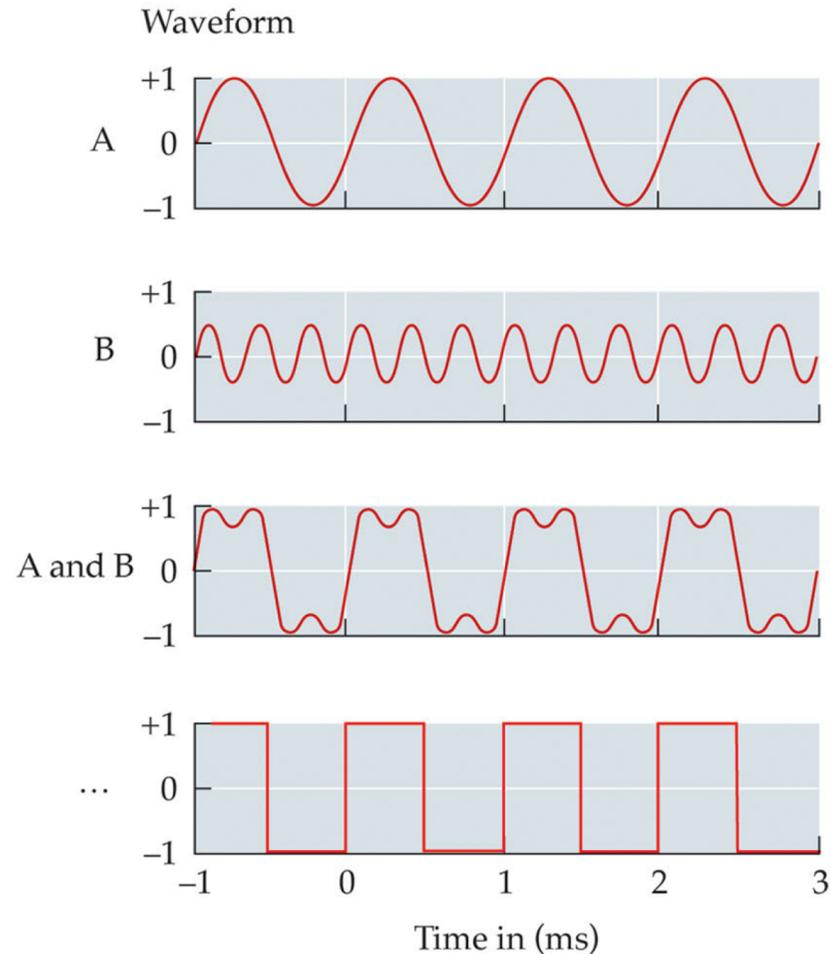
Toni puri e complessi



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.6 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

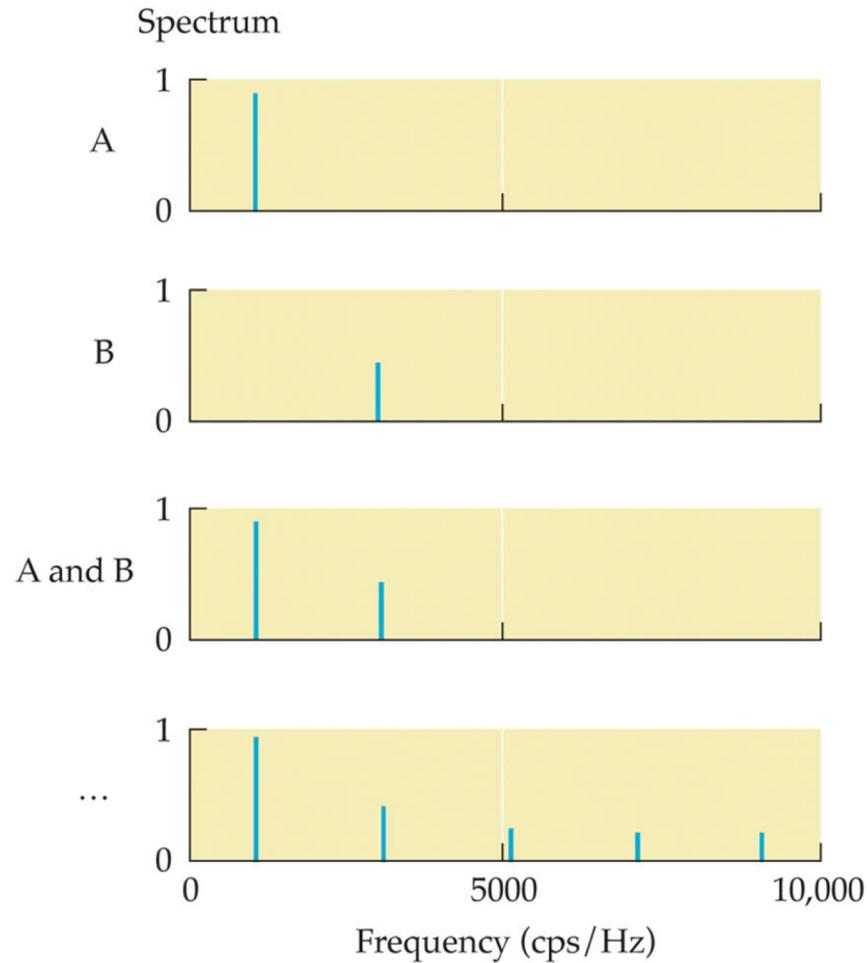
- Un suono complesso può essere descritto attraverso l'analisi di Fourier
- Teorema matematico attraverso il quale si può suddividere un qualunque suono in un insieme di onde sinusoidali.
- La combinazione di questi elementi primi riproduce il suono originale
- Come posso rappresentare i risultati ottenuti?
 - Spettro di frequenze

Esempio di diverse forme d'onda



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.7 (Part 1) © 2006 Sinauer Associates, Inc.

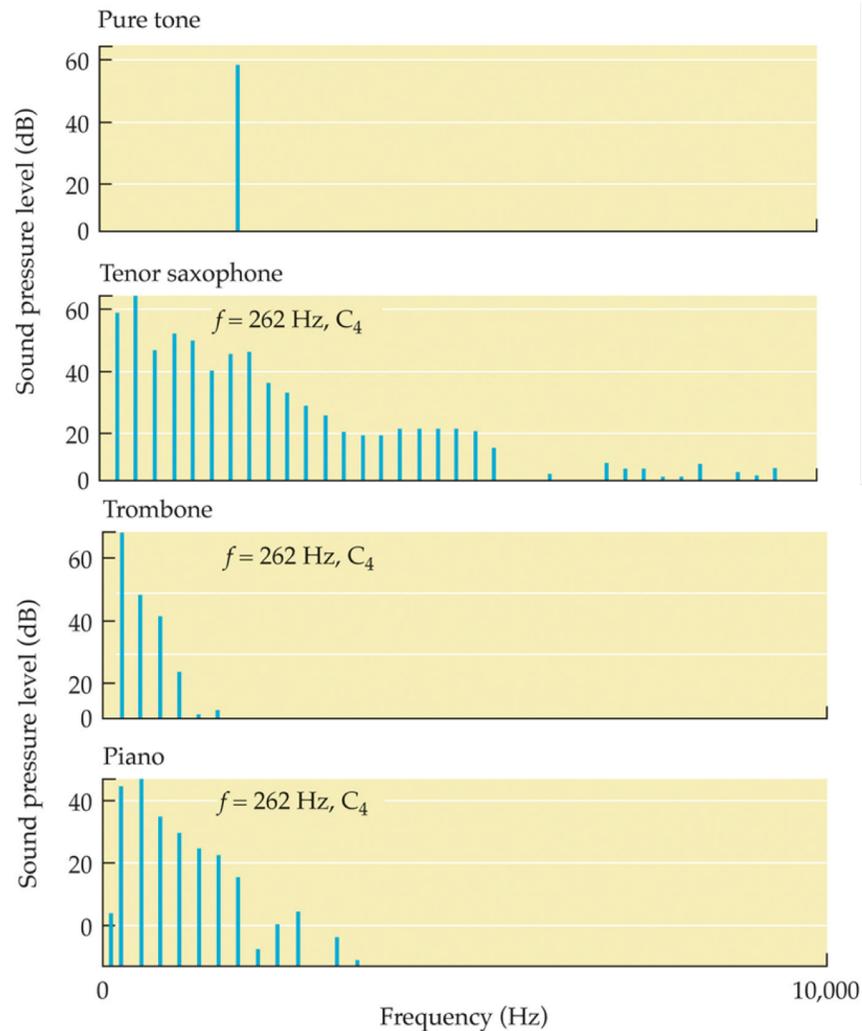
Analisi spettrale



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.7 (Part 2) © 2006 Sinauer Associates, Inc.

- Spettro di armoniche
 - Tipicamente causato da una semplice fonte di vibrazioni
 - corda di chitarra o canna di un sassofono
- Prima armonica: La componente fondamentale più bassa del suono
- Timbro: Sensazione psicologica dell'ascoltatore con la quale
 - Permette di giudicare suoni diversi

Spettro di Frequenze



Lo sviluppo del sistema uditivo

- Come sono percepiti e riconosciuti i suoni dal sistema percettivo acustico?
 - L'udito si è evoluto per milioni di anni per rispondere alle sollecitazioni dell'ambiente esterno

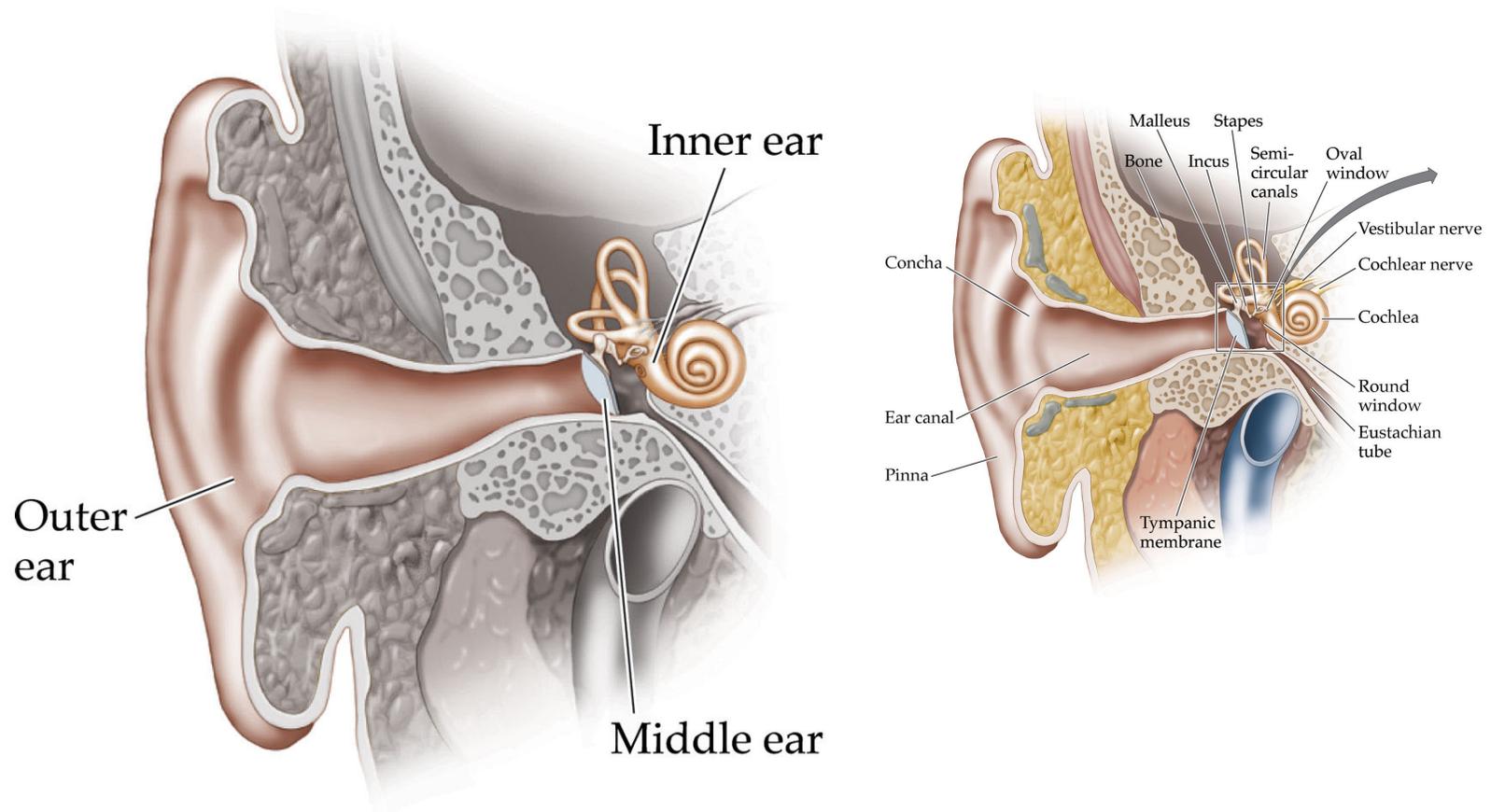


SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.9 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Il sistema uditivo

- L'orecchio dell'uomo
 - Distinguiamo 3 zone specifiche
 - Orecchio esterno: convoglia le onde sonore
 - Orecchio medio: amplifica e adatta il livello sonoro per la trasduzione
 - Orecchio interno: zona specifica per la trasduzione e la generazione del segnale neurale

Struttura dell'orecchio



Il sistema uditivo

- Orecchio esterno:
- I suoni sono per prima cosa raccolti dall'ambiente esterno attraverso il padiglione
 - Le onde sonore sono incanalate dal padiglione dentro il canale uditivo
 - La lunghezza e la forma del canale uditivo intensificano le frequenze del suono
 - Lunghezza circa 25mm
 - Accresce maggiormente le frequenze sonore tra i 2-6KHz
- Il fine principale del canale uditivo è quello di stimolare correttamente la membrana timpanica
 - Protezione dall'ambiente esterno

Membrana timpanica

- Il timpano è un sottile strato di pelle alla fine del canale uditivo esterno che vibra in risposta ai suoni
- Mito comune: Bucare il timpano rende sordi
 - In molti casi il timpano è capace di ripararsi da solo
 - E' comunque possibile danneggiarlo in maniera irreparabile

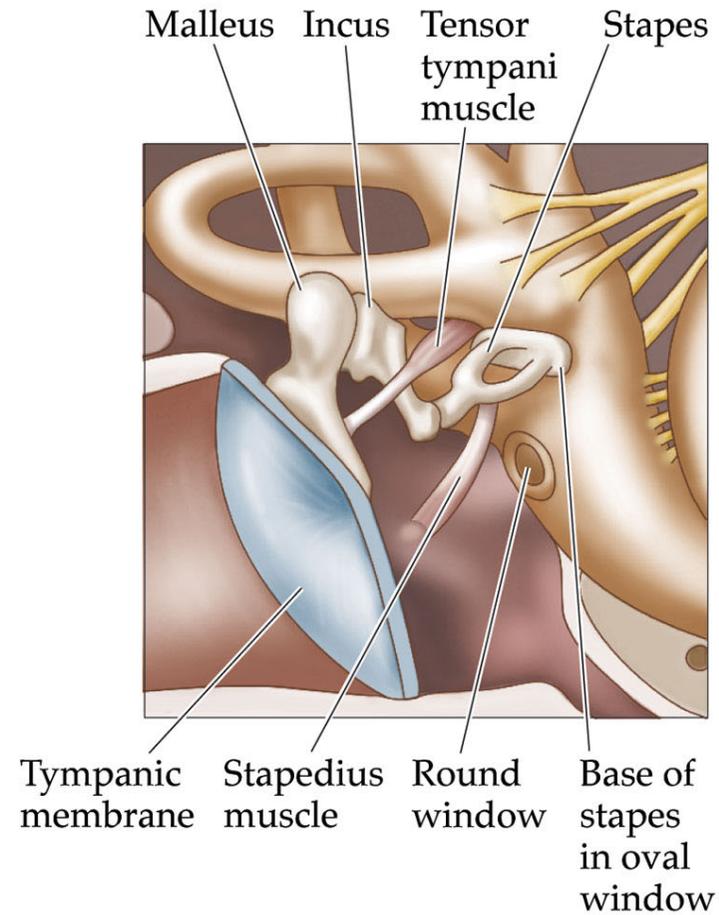
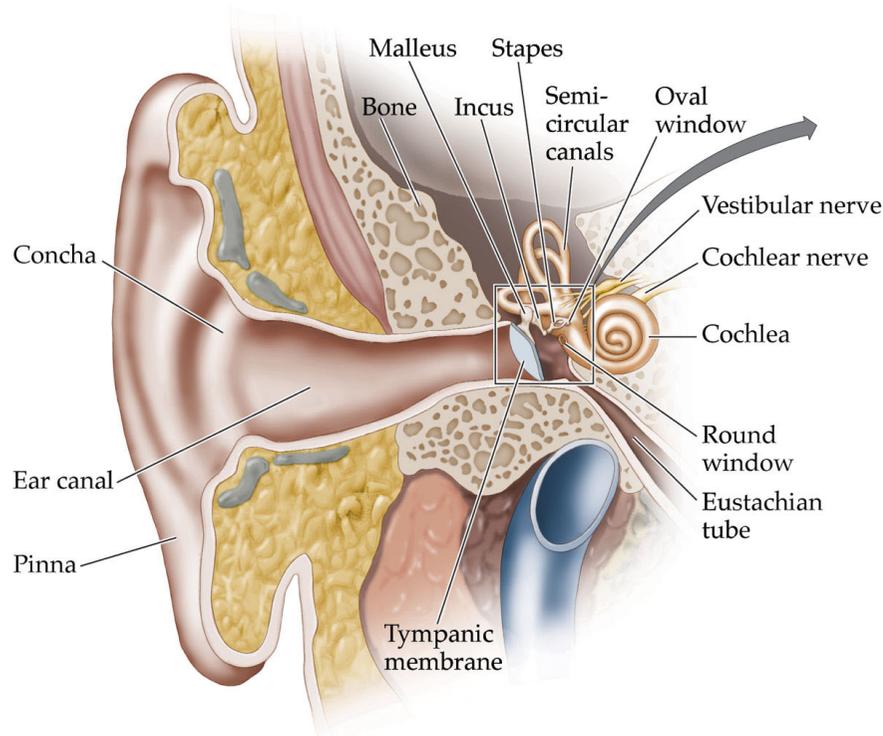
Orecchio Medio

- Il padiglione e il canale uditivo formano l'orecchio esterno
- La membrana timpanica è il confine fra l'orecchio esterno e quello medio
- Questo consiste di tre ossicini che amplificano la pressione dei suoni per bilanciare le impedenze diverse fra l'aria e l'acqua
 - Martello, Incudine e Staffa

Orecchio Medio

- Ossicini: Martello, Incudine e Staffa
- Questi sono gli ossi più piccoli di tutto il corpo
 - La staffa trasmette le vibrazioni delle onde sonore alla finestra ovale
 - finestra ovale: un'altra membrana che rappresenta il confine fra orecchio medio e orecchio interno

Struttura dell'orecchio



Orecchio Medio

- L'amplificazione della pressione provvista dagli ossicini è essenziale per la capacità di sentire suoni deboli
 - Superficie più grande, Timpano, messo in contatto con superficie più piccola, Martello
 - Il rapporto è pari a 18 volte, permette un aumento/amplificazione della variazione di pressione dell'onda sonora
 - Fattore molto importante perché l'orecchio interno è formato da una camera piena di liquido
 - maggiore energia richiesta rispetto all'aria

Orecchio Medio

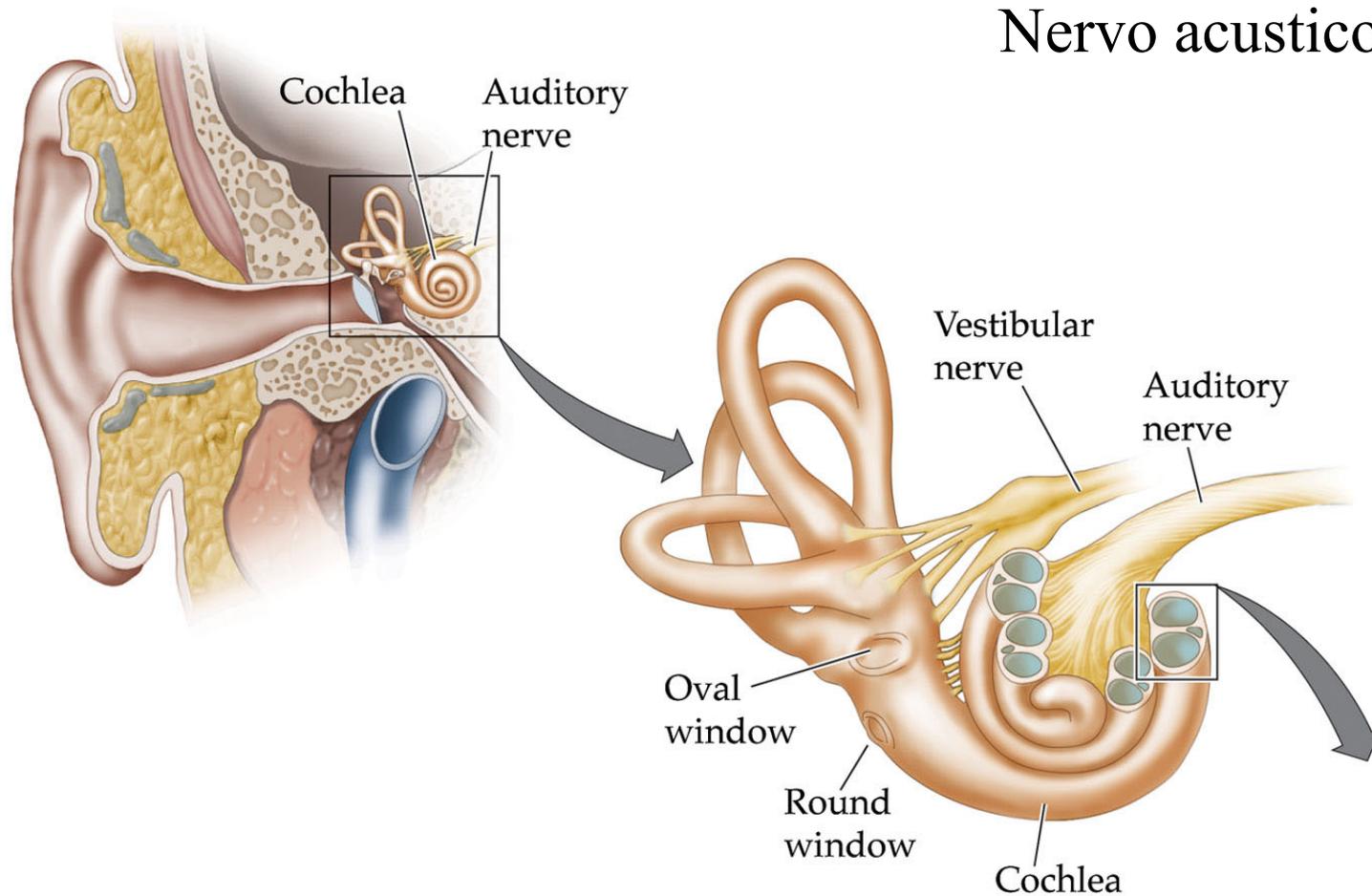
- Gli ossicini sono comunque importanti anche per i suoni molto forti, attraverso l'uso di 2 muscoli specifici
 - Tensore del Timpano
 - Fissato al Martello
 - Stapedio
 - Fissato alla Staffa
- **Riflesso acustico:** Mettersi in tensione quando i suoni sono molto forti smorzando i cambiamenti di pressione (anche quando parliamo).
 - Comunque, i riflessi acustici seguono l'inizio dei suoni forti di circa un quinto di secondo quindi non si può avere protezione contro suoni bruschi
 - Esempio di suoni improvvisi e forti: boati o sparo di una pistola

Orecchio interno

- Struttura preposta alla trasduzione del segnale sonoro
- Cambiamenti fini nella pressione dei suoni vengono tradotti in segnali neurali
- Come per il sistema visivo:
 - La struttura retinica, quella più interna, svolge il ruolo della trasduzione del segnale

Orecchio interno

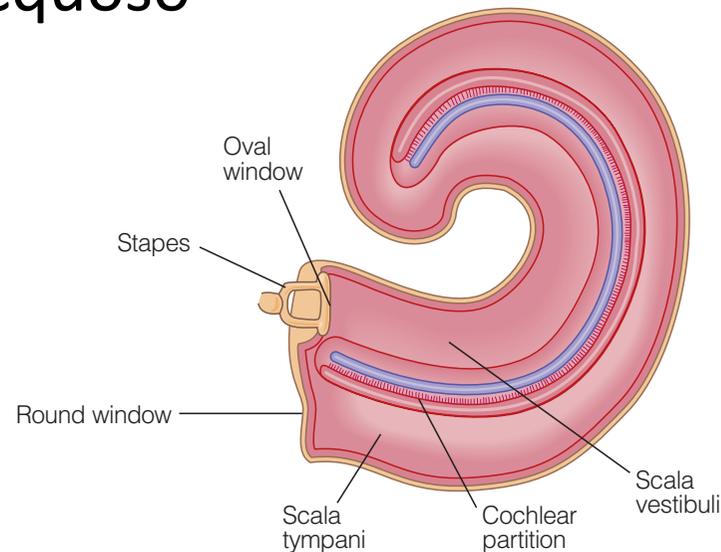
Nervo acustico



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.11 (Part 1) © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Orecchio interno

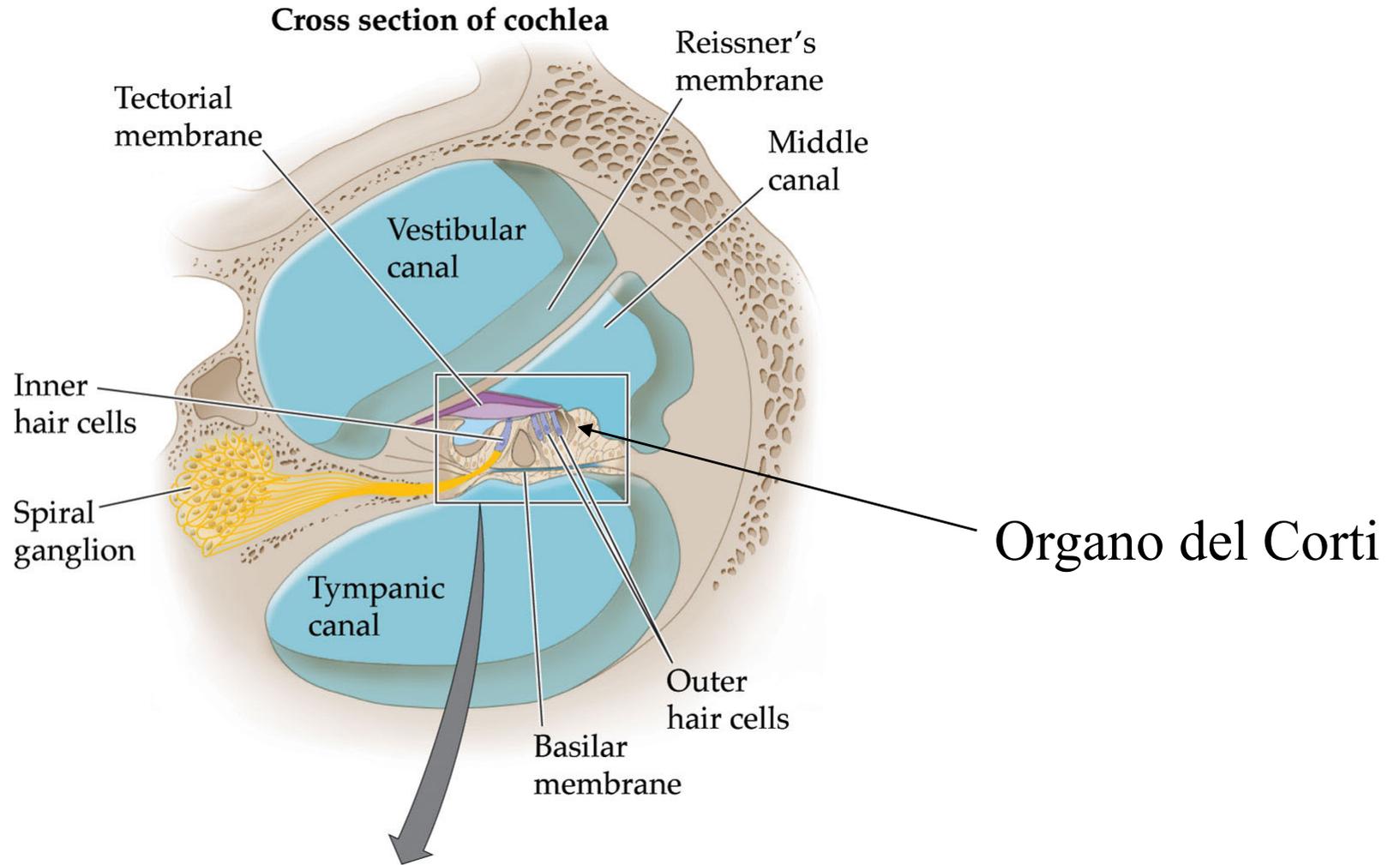
- Canali e membrane cocleari
 - Coclea: piccola struttura a spirale dell'orecchio interno
 - Diametro di circa 4mm e lunghezza totale di 35mm
 - La coclea divisa in tre canali paralleli è riempita da un liquido acquoso



Orecchio interno

- I tre canali della coclea
 - Scala timpanica
 - Scala vestibolare
 - Scala media
 - I tre canali sono separati da delle membrane:
 - la membrana di Reissner (fra canale Vestibolare e canale di Mezzo)
 - quella basilare (fra canale timpanico e canale di mezzo)
 - Su questa membrana è collocato l'organo del Corti (sede dei recettori uditivi) sovrastato dalla membrana tettoria

Orecchio interno

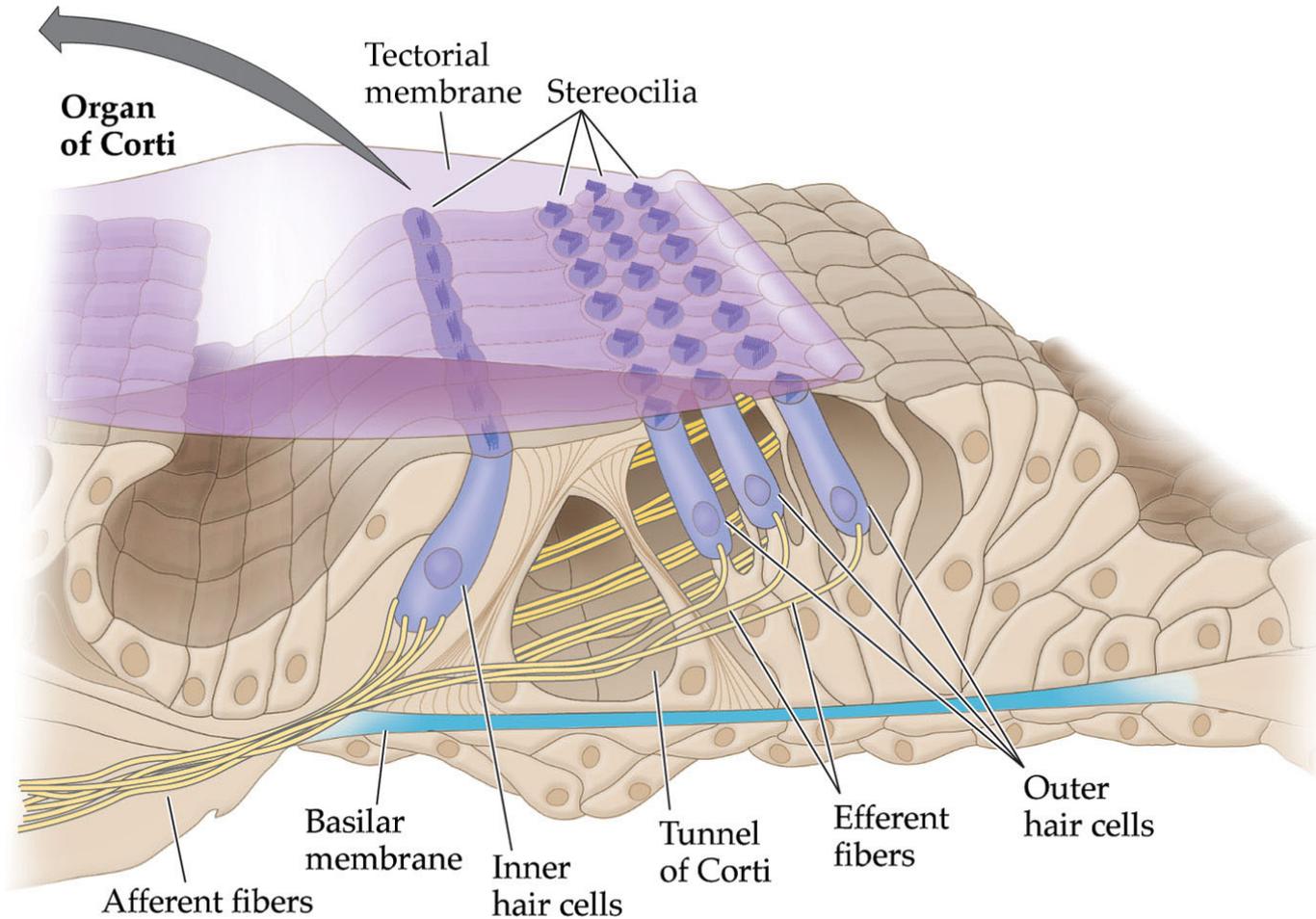


SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.11 (Part 2) © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Funzionamento Orecchio Interno

- Le vibrazioni trasmesse attraverso le membrane timpaniche e gli ossicini dell'orecchio medio fanno in modo che la staffa faccia oscillare la finestra ovale fuori e dentro il canale vestibolare alla base della coclea
 - Qualsiasi pressione rimanente (formata per esempio da suoni molto intensi) è trasmessa attraverso l'elicotrema (congiunzione fra canale vestibolare e timpanico) indietro alla base cocleare attraverso il canale timpanico dove viene assorbita da un'altra membrana: la finestra rotonda

Orecchio interno



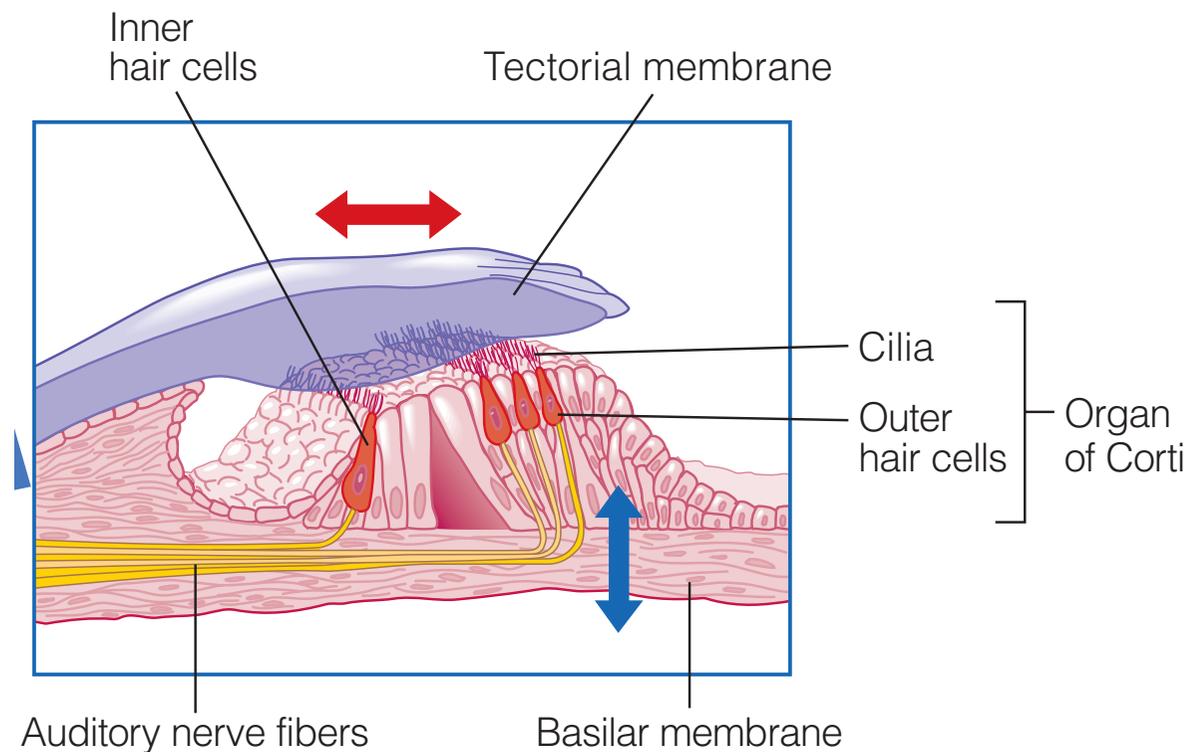
SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.11 (Part 3) © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Funzionamento Organo del Corti

- L'organo del Corti
 - I movimenti degli strati della coclea sono trasdotti in segnali neurali dalle strutture nell'organo del Corti che si estende sulla parete superiore della membrana basilare
 - Questa è fatta da neuroni specializzati chiamati cellule ciliari, da dendriti delle fibre del nervo uditivo che terminano alla base delle cellule ciliari e da una impalcatura di cellule di supporto

Struttura del Organo del Corti

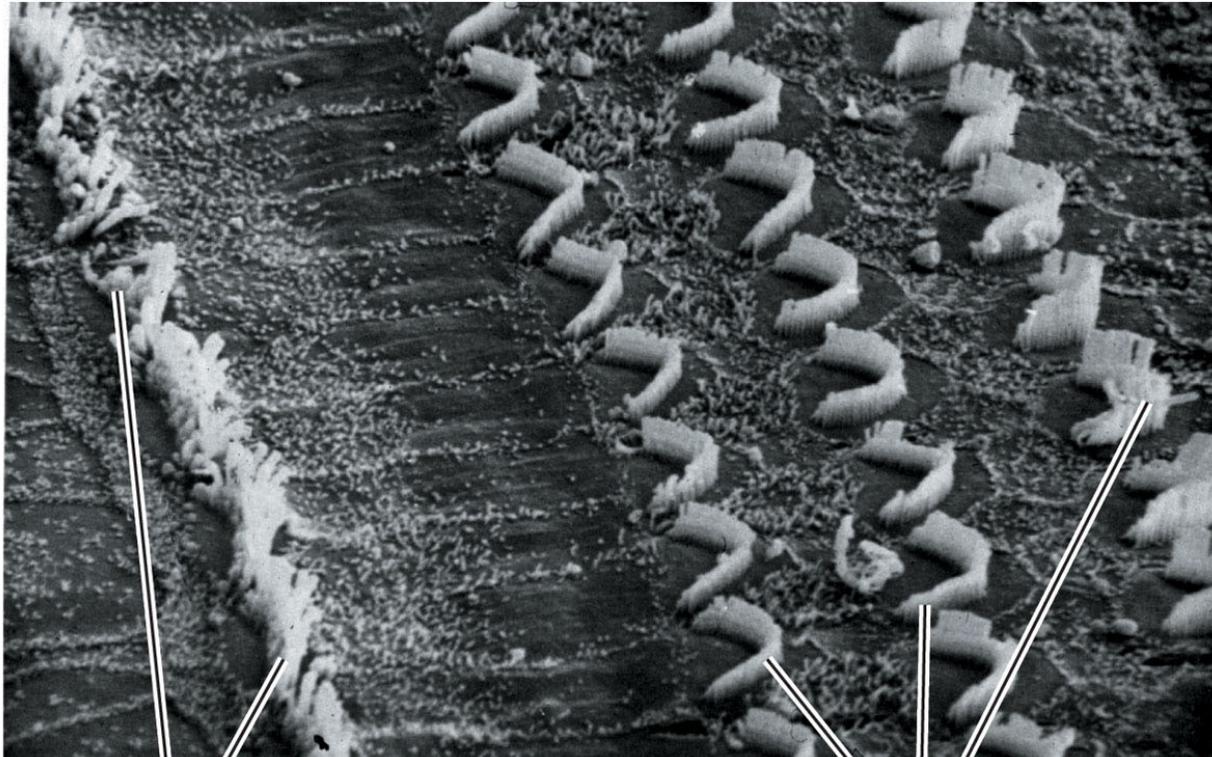
- Cellule ciliari nell'orecchio umano: disposte in 4 righe che corrono lungo la membrana basilare



Struttura del Organo del Corti

- le cellule recettive uditive sono nell'organo di Corti e prendono il nome di cellule ciliate
 - ogni cellula ciliata possiede circa 100 stereociglia sulla sua parte superiore (minuscole setole)
- Le cellule ciliate possono essere suddivise in:
 - ciliate interne (ca 3500)
 - Stereociglia disposte in diverse file parallele
 - ciliate esterne (ca 20000)
 - Stereociglia disposte a formare una V o W

Struttura del Organo del Corti



Stereocilia of
inner hair cells

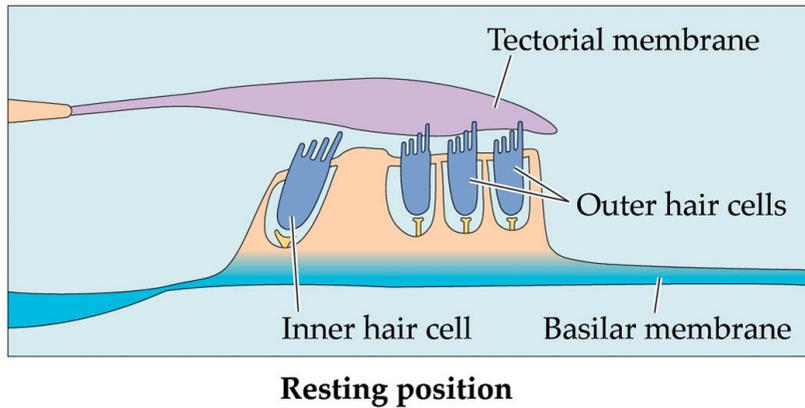
Stereocilia of
outer hair cells

SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.11 (Part 4) © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Struttura Organo del Corti

- Membrana tectoria
- Si estende sopra l'organo del Corti ed è una struttura gelatinosa
 - È fissata solamente da una parte, si distorce quando la partizione cocleare si muove in su o in giù
 - Attraverso il suo movimento instaura i processi che portano al rilascio di neurotrasmettitori

Funzionamento Organo Corti



Sound-induced vibration

