

9

Udito: Fisiologia e Psicoacustica



9

Hearing: Physiology and Psychoacoustics

- La funzione dell'udito
- Cosa è il suono?
- Strutture basilari del sistema acustico dei mammiferi
- Caratteristiche operative di base del sistema acustico
- Intensità (Intensity: dimensione fisica) e Volume (Loudness: dimensione psicologica)
- Perdita dell'udito

9

The Function of Hearing

- Le basi:
 - La natura del suono
 - Anatomia e fisiologia del sistema acustico
 - Come percepiamo il volume (loudness) e l'altezza (pitch) dei suoni
 - Deficit dell'udito

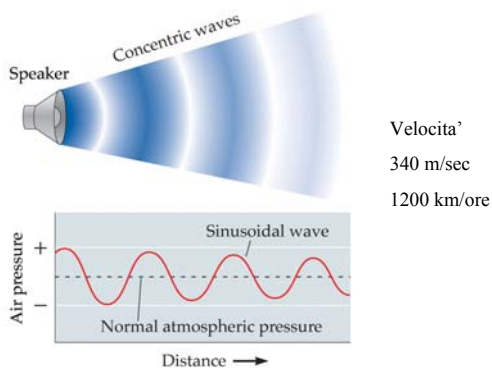
9

What Is Sound?

- I suoni sono creati dalle vibrazioni degli oggetti
 - Le vibrazioni di oggetti producono vibrazioni nelle molecole in prossimità degli oggetti stessi che anche loro si mettono a vibrare. Questo causa differenze di pressione nell'aria che si propagano in ogni direzione (Es. sasso nello stagno)

9

Sound Wave and Air Pressure



9

What Is Sound? (cont'd)

- Le onde sonore viaggiano con una certa velocità di propagazione
 - Questa dipende dal mezzo di trasmissione.
 - Esempio: La velocità del suono attraverso l'aria è di circa 340 metri al secondo, ma se per medium prendiamo l'acqua essa cresce sino a 1500 metri al secondo

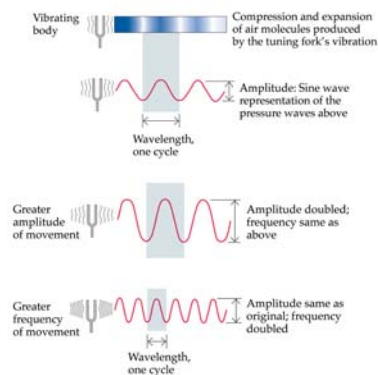
9

What Is Sound? (cont'd)

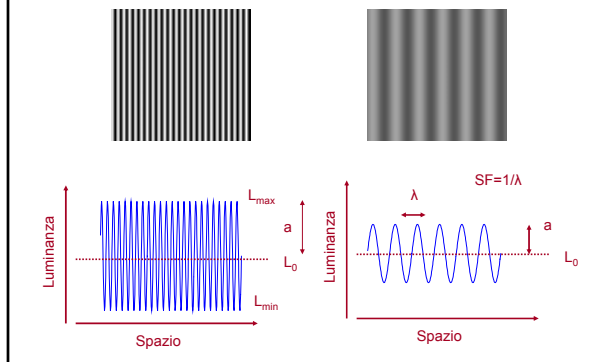
- Caratteristiche fondamentali delle onde sonore
 - **Ampiezza:** Grandezza del profilo di variazione di pressione dell'onda sonora
 - **Intensità:** Quantità di energia di un suono che cade su una unità di area
 - **Frequenza:** Per i suoni è il numero di cicli (in termini di variazione di pressione)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

9

Frequency and Amplitude



9



9

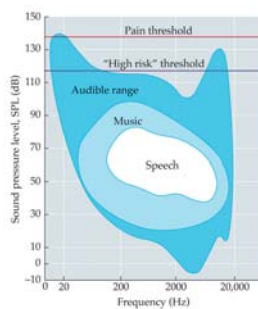
What Is Sound? (cont'd)

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

9

What Is Sound? (cont'd)

- L'udito degli umani è sensibile ad un ampio range di frequenze: da circa 20 a 20,000 Hz



9

What Is Sound? (cont'd)

- 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 differenze in ampiezza, i livelli del suono sono misurati su una scala logaritmica le cui unità sono i decibels (dB)
 - Cambiamenti relativamente piccoli in decibels possono corrispondere a cambiamenti fisici molto consistenti (per un incremento di 6 decibels corrisponde circa ad un raddoppio della pressione del suono)

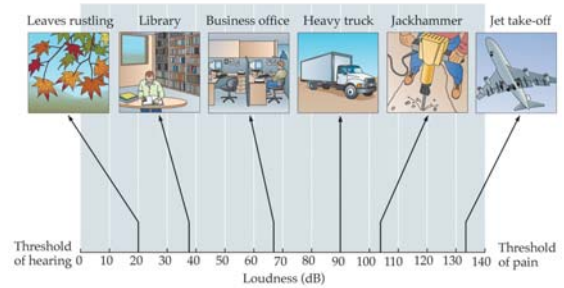
9

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

$$\text{Per } p = p_0, \text{ dB} = 0$$

9

Intensity of Environmental Sounds



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 8.4 © 2008 Sinauer Associates, Inc.

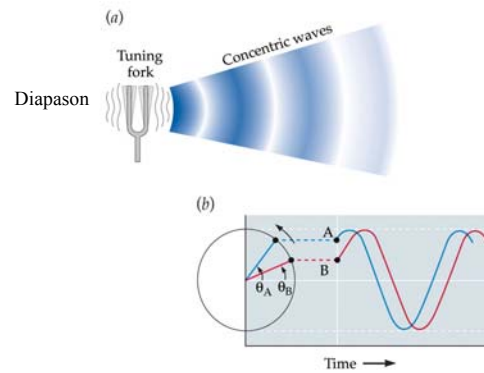
9

What Is Sound? (cont'd)

- Uno dei più semplici tipi di suoni: Onde sinusoidali, o toni puri
 - Onde sinusoidali: 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

9

A Sine Wave



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 8.5 © 2008 Sinauer Associates, Inc.

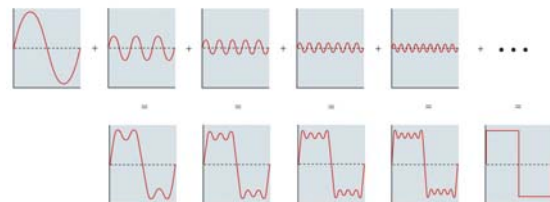
9

What Is Sound? (cont'd)

- Onde sinusoidali: Non sono molto comuni fra i suoni che sentiamo tutti i giorni perché poche vibrazioni sono così pure
 - I suoni più comuni nel mondo sono suoni complessi (e.g., voci umane, di uccelli, suoni di macchine etc.)
 - Però tutti i suoni complessi possono essere descritti come combinazioni di onde sinusoidali (**teorema di Fourier**).

9

Complex Sound Waves



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 8.6 © 2008 Sinauer Associates, Inc.

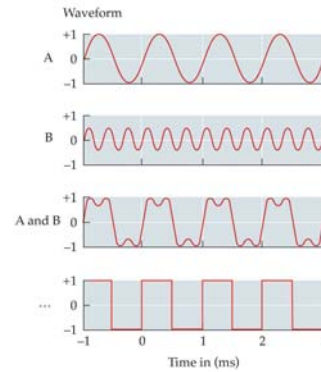
9

What Is Sound? (cont'd)

- Un suono complesso può essere descritto attraverso l'analisi di Fourier
 - Questa è un teorema matematico attraverso il quale si può suddividere qualunque suono in un insieme di onde sinusoidali. La combinazione di questi elementi primi riproduce il suono originale
 - I risultati possono essere riassunti come uno spettro (di frequenze)

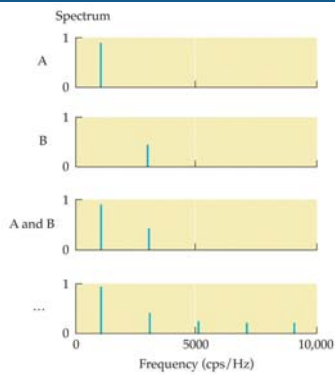
9

Wave Form and Spectrum (Part 1)



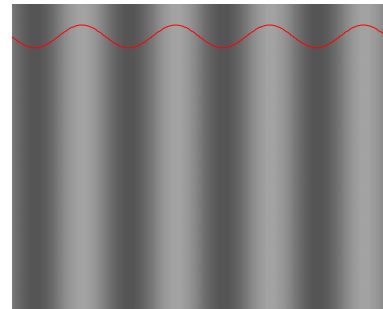
9

Wave Form and Spectrum (Part 1)



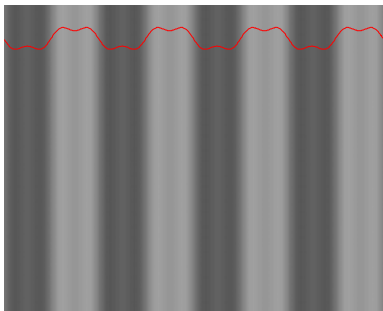
9

Fondamentale (f)



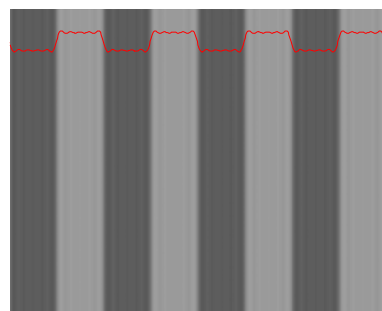
9

3+3f



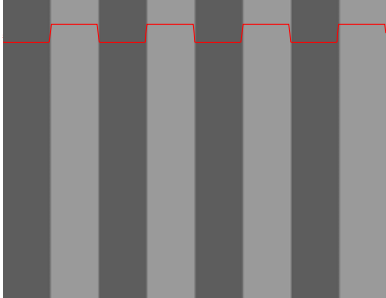
9

f+3f+5f+7f+9f



9

$$L = L_0 + \sum_{i=1}^{w/2} \sin(2\pi i \omega x) / i$$



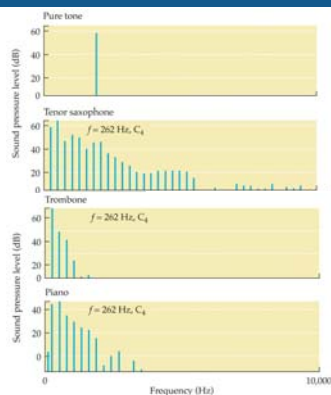
9

What Is Sound? (cont'd)

- Spettro di armoniche: Tipicamente causato da una semplice fonte di vibrazioni (pe. 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 si può giudicare come diversi suoni che hanno lo stesso volume e la stessa altezza (considerato il corrispettivo del colore per gli stimoli visivi)

9

Harmonic Sounds with the Same Fundamental



9

Basic Structure of the Mammalian Auditory System

- Come sono percepiti e riconosciuti i suoni dal sistema percettivo acustico?
 - L'udito si è evoluto per milioni di anni

9

Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Orecchio esterno:
 - I suoni sono per prima cosa raccolti dall'ambiente esterno attraverso la pinna
 - Le onde sonore sono incanalate dalla pinna dentro il canale uditivo
 - La lunghezza e la forma del canale uditivo intensificano le frequenze del suono
 - Il fine principale del canale uditivo è quello di isolare la struttura al suo fondo: la membrana timpanica

9

Mammalian Pinnae



SENSATION AND PERCEPTION, Figure 9.9 © 2010 Pearson Education, Inc.

9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- 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

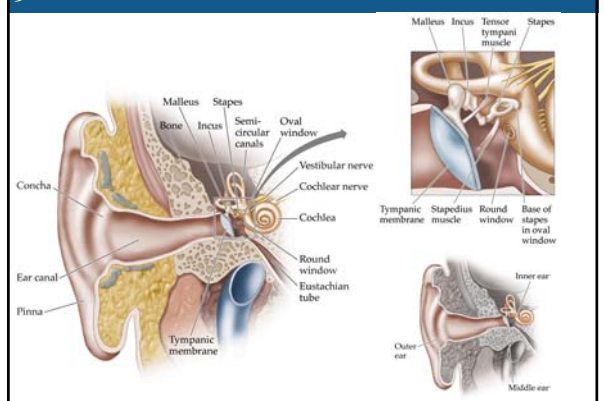
9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Orecchio medio:
 - La pinna 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.

9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- 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 un'altra membrana che rappresenta il confine fra orecchio medio e orecchio interno

9 Structure of the Human Ear (Part 1)



9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- L'amplificazione della pressione provvista dagli ossicini è essenziale per la capacità di sentire suoni deboli
 - Gli ossicini sono comunque importanti anche per i suoni molto forti
 - L'orecchio interno è formato da una camera piena di liquido

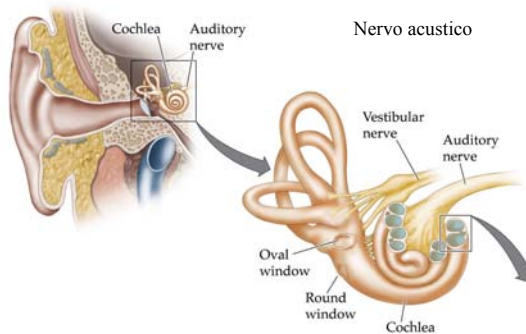
9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Orecchio medio: Two muscles-tensor tympani and stapedius
 - **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 come lo sparo di una pistola

9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Orecchio interno: Cambiamenti fini nella pressione dei suoni vengono tradotti in segnali neurali
 - La sua funzione può essere assimilabile a quella della retina per la visione

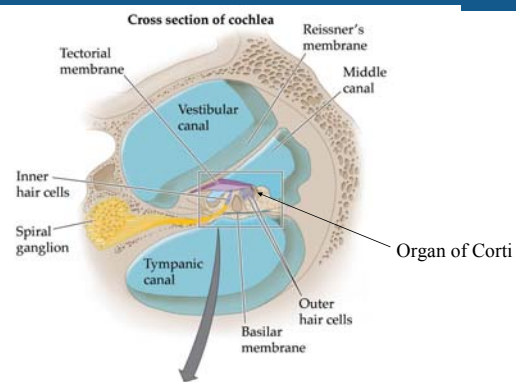
9 The Cochlea (Part 1)



9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Canali e membrane cocleari
 - Coclea: Struttura fatta a spirale dell'orecchio interno contenente l'organo di Corti
 - La coclea divisa in tre canali paralleli è riempita da un liquido acquoso

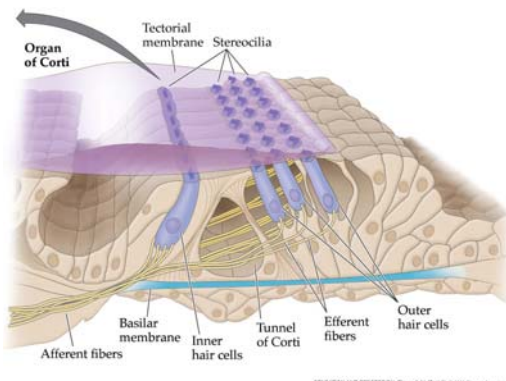
9 The Cochlea (Part 2)



9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

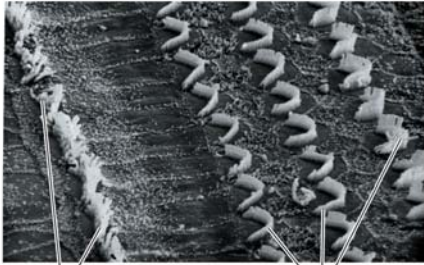
- I tre canali della coclea
 - Canale timpanico
 - Canale vestibolare
 - Canale di mezzo
 - I tre canali sono separati da membrane: la membrana di Reissner e quella basilare

9 The Cochlea (Part 3)



9

The Cochlea (Part 4)



Stereocilia of inner hair cells

Stereocilia of outer hair cells

9

Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- 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
 - La qualsiasi pressione rimanente è trasmessa attraverso l' helicotrema indietro alla base cocleare attraverso il canale timpanico dove viene assorbita da un'altra membrana: la finestra rotonda

9

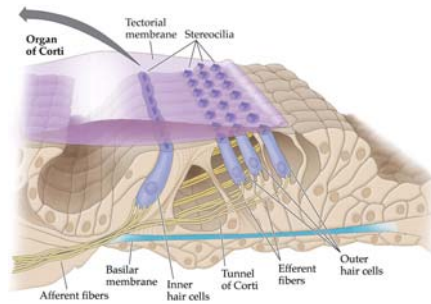
Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- L'organo di Corti
 - I movimenti degli strati della coclea sono tradotti in segnali neurali dalle strutture nell' organo di 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

9

Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

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



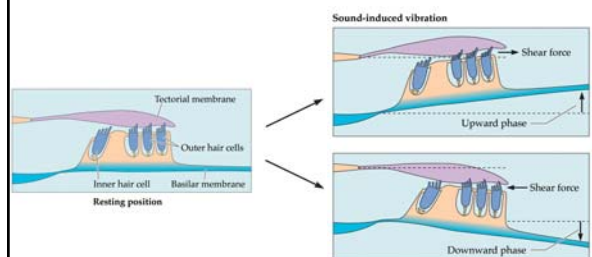
9

Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Membrana tectoria: Si estende sopra l'organo di Corti ed è una struttura gelatinosa

9

Vibration and the Tectorial Membrane



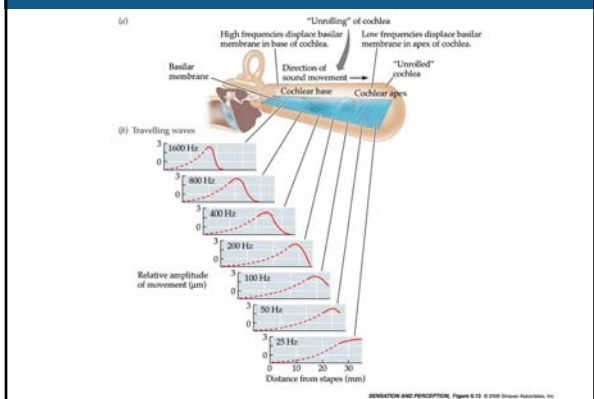
9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Le scariche dei neuroni che formano il nervo acustico in attività neurale completano il processo di trasduzione dei segnali da onde sonore a segnali neurali

9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Codificare l'ampiezza e la frequenza dei suoni nella coclea
 - Codifica tonotopica: Parti diverse della coclea sono sensibili a frequenze diverse cioè ogni particolare zona della coclea risponde in maniera più robusta ad una determinata frequenza e meno ad altre

9 The Cochlea is Tuned to Different Frequencies



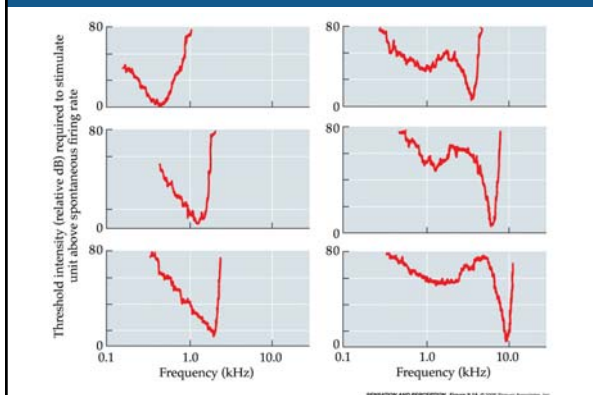
9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Cellule ciliari interne ed esterne
 - Cellule ciliari interne: Convogliono quasi tutta l'informazione sui suoni al cervello
 - Cellule ciliari esterne: Convogliono le informazioni dal cervello (uso di fibre efferenti). Queste sono coinvolte in processi di feedback molto elaborati

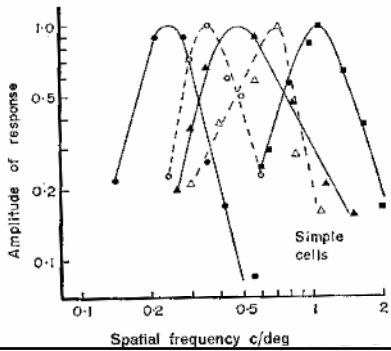
9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Il nervo acustico
 - Le risposte di ognuna fibra del nervo acustico sono relate al loro posizionamento lungo la coclea
 - Selettività alle frequenze: E' più chiara quando i suoni sono molto deboli
 - Mappa della selettività alle frequenze: Mappa riportante le soglie di un neurone o una fibra in risposta a una onda sinusoidale che varia in frequenza alla più bassa intensità da essi percepibile (come sensitività al contrasto visivo)

9 Threshold Tuning Curves



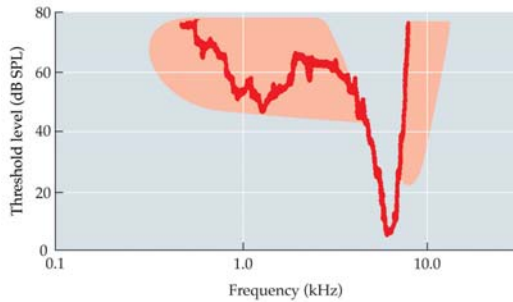
Selettività delle cellule visive alle frequenze spaziali



9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Soppressione a due toni: Un decremento nel tasso di scarica di una fibra acustica dovuto alla rpresentazione di un tono quando un secondo tono è presente allo stesso tempo

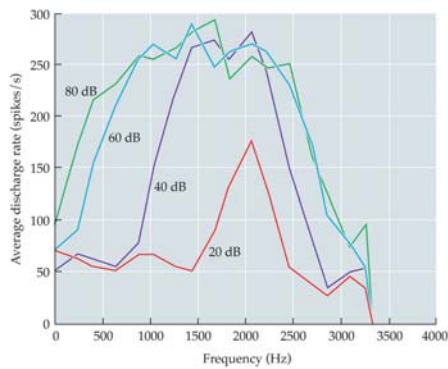
9 Two-Tone Suppression



9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

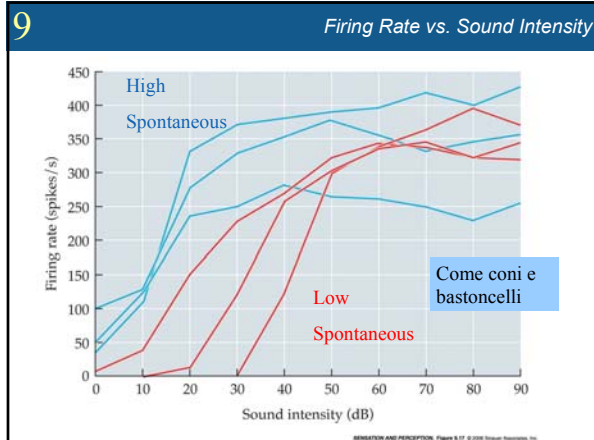
- Saturazione di scarica
 - Le fibre del nervo acustico sono selettive per ben determinate frequenze (come accade per suoni molto deboli) anche quando i suoni sono molto sopra soglia?
 - Guardate le curve di isointensità. Queste indicano il profilo del tasso di scarica delle fibre del nervo acustico per un ampia gamma di frequenze tutte presentate ad una certa intensità
 - Saturazione di scarica: Punto in cui una fibra del nervo acustico scarica al massimo della sua possibilità ed un ulteriore aumento della intensità di stimolazione non comporta alcun incremento nel tasso di scarica

9 Isointensity Functions

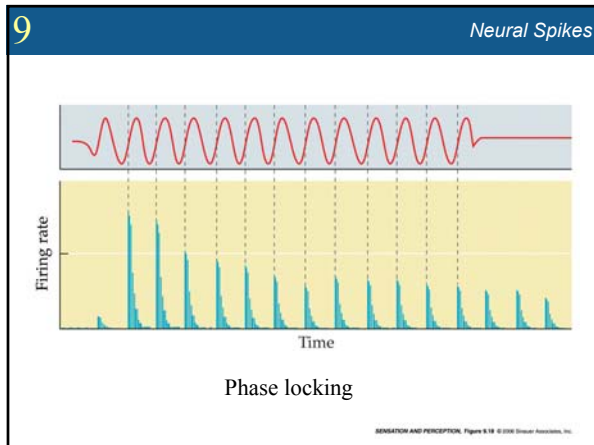


9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Funzione di intensità di scarica: Una mappa del tasso di scarica di una fibra del nervo acustico in risposta ad un suono di frequenza costante ma di intensità crescente

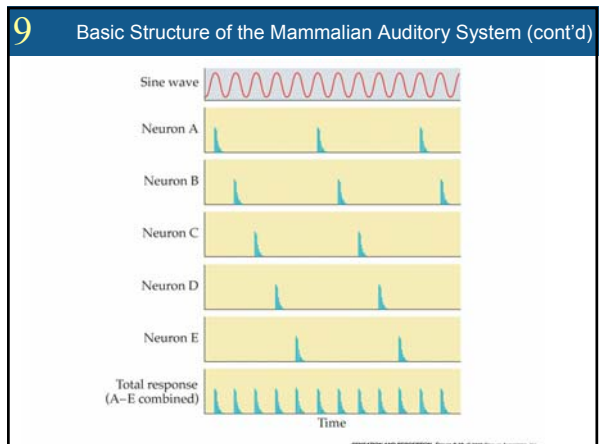


- 9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)
- Codice temporale per le frequenze dei suoni
 - Il sistema acustico utilizza un secondo sistema per codificare le varie frequenze oltre alla codifica tonotopica della coclea
 - Aggancio di fase: La scarica di un singolo neurone ad un determinato punto del periodo di un suono ad una certa frequenza
 - Esistenza dell'aggancio di fase: Pattern di scarica di fibre del nervo acustico creano un **codice temporale**



- 9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)
- **Codice temporale:** Sintonizzazione di parti diverse della coclea su diverse frequenze per le quali l'informazione circa la frequenza di un suono in entrata è codificata dal profilo temporale di scarica dei neuroni poiché questo è dipendente dal periodo del suono

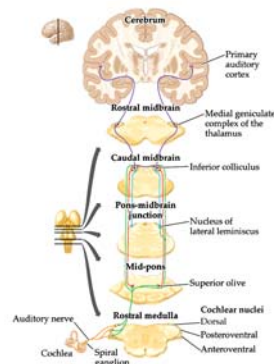
- 9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)
- **Il principio di scarica (volley principle):** Questa teoria propone che una popolazione di neuroni possano creare un codice temporale se ogni neurone scarica in un determinato punto del periodo del suono ma non scarica per tutti i periodi.



9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Strutture della corteccia acustica
 - Nervo acustico (VIII nervo cranico) trasporta segnali della coclea al tronco encefalico
 - Qui tutte le fibre del nervo acustico fanno sinapsi con il nucleo cocleare

9 Auditory System Pathways



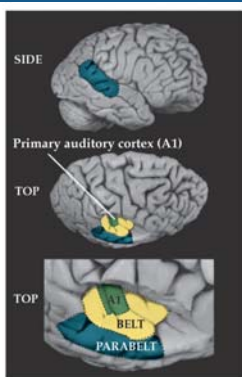
9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Oliva superiore, collicolo inferiore e nucle genicolato mediale giocano tutti un ruolo nella percezione acustica

9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

- Organizzazione tonotopica: Un dispiegamento per cui neuroni che rispondono a frequenze diverse sono organizzati anatomicamente ordinati per frequenza
 - Questa organizzazione è mantenuta nella corteccia Acustica primaria (A1)
 - I neuroni di A1 sono connessi e passano l'informazione all'aria belt e questa poi all'area parabelt

9 The First Stages of Auditory Processing



9 Basic Structure of the Mammalian Auditory System (cont'd)

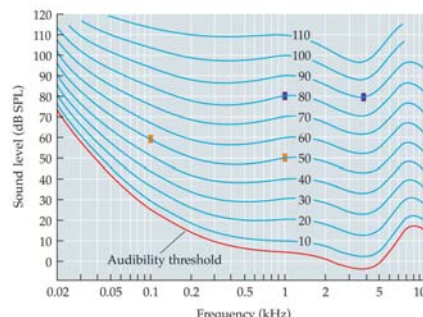
- Un confronto fra il sistema visivo e quello acustico
 - Sistema acustico : La gran parte delle elaborazioni è fatta prima di A1 (tranne linguaggio)
 - Sistema visivo: La gran parte delle elaborazioni è fatta dopo V1
 - Queste differenze potrebbero essere dovute a ragioni evolvuzionistiche

9 Basic Operating Characteristics of the Auditory System

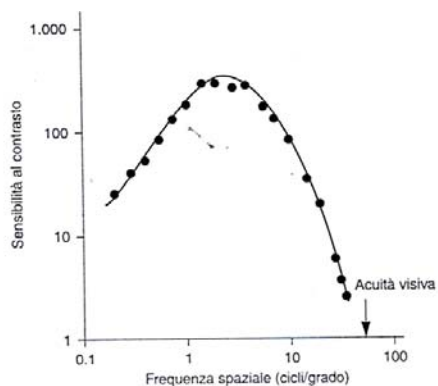
- Psicoacustica: Lo studio dei correlati psicologici alla dimensione fisica degli stimoli acustici. Questa è una branca della psicofisica

9 Intensity and Loudness

- Soglie acustiche: Una mappa dei suoni appena percepibili per varie frequenze



Sensibilità al contrasto visivo



9 Intensity and Loudness (cont'd)

- Integrazione temporale : Il processo per cui un lungo suono ad intensità costante è percepito essere più basso di un identico suono che dura meno. Il periodo di integrazione è circa 100-200 ms.

9 Intensity and Loudness (cont'd)

- L'organizzazione tonotopica del sistema acustica suggerisce che la composizione delle frequenze rivesta un ruolo fondamentale su come noi sentiamo i suoni

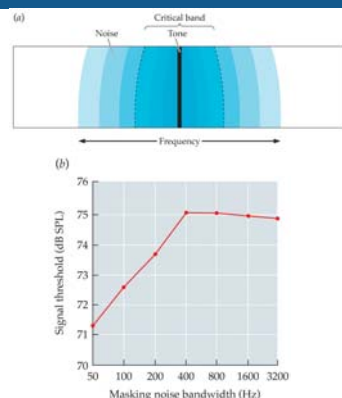
9 Intensity and Loudness (cont'd)

- I ricercatori di psicoacustica: Studiano come le persone percepiscono i suoni
 - Ricerche condotte su toni pure suggeriscono come gli umani siano bravi a discriminare anche piccole differenze frequenze
 - **Masking**: Usare un secondo suono, un rumore in frequenza, per rendere la percezione di un suono target più difficile. Questa metodologia è usata per investigare la selettività sulla banda delle frequenze

9 Intensity and Loudness (cont'd)

- Psicoacustica:
 - **Rumore bianco:** Un suono in cui tutte le frequenze sono presenti nella stessa quantità. Il rumore bianco è molto usato nel *masking*
 - **Banda critica:** Gamma di frequenze che sono convogliate dentro un canale del sistema acustico

9 Critical Bandwidth and Masking



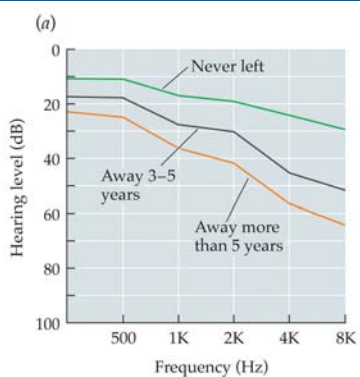
9 Hearing Loss

- L'udito può essere danneggiato da lesioni a qualunque struttura che partecipa al processo di analisi acustica
 - Ostruire il canale uditivo produce una temporanea perdita dell'udito (e.g., tappi per le orecchie)
 - Un'eccessiva presenza di cerume nel canale uditivo impedisce una normale percezione acustica
 - Perdita dell'udito per conduzione: Causata da problemi con gli ossicini dell'orecchio medio (e.g., infezioni dell'orecchio, otite)
 - Otosclerosi: E' un tipo più grave di perdita dell'udito per conduzione causata da una anormale crescita degli ossicini dell'orecchio medio. Si può contrastare con un intervento chirurgico

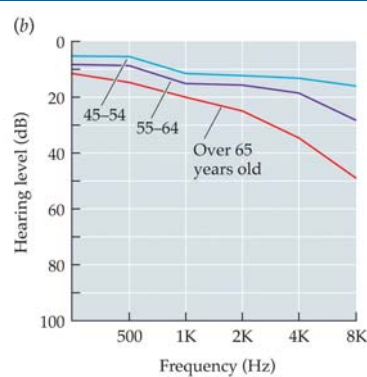
9 Hearing Loss (cont'd)

- Perdita dell'udito dovuta a causa neurali: Deficit dell'udito più comuni e più gravi. Sono dovuti a deficit alla coclea o al nervo acustico oppure a danneggiamenti alle cellule ciliari (e.g., risultati dall'assunzione di antibiotici o di farmaci antitumorali)
- Perdita dell'udito più comune: Danneggiamento alle cellule ciliari dovute ad esposizione prolungata a suoni di intensità eccessivi

9 Hearing Loss in Easter Islanders



9 Hearing Loss with Age



9

Hearing Loss (cont'd)

- Perdita dell'udito: Conseguenza naturale dell'invecchiamento
 - Giovani: Range 20–20,000 Hz
 - Venticinquenni: 20–15,000 Hz
 - Supporti di aiuto all'acustica: I supporti primordiali erano i corni, oggi strumentazioni elettroniche

9

Supporti di aiuto all'acustica



BY THE GRAPE VINE...

9

