



Localizzazione e Organizzazione acustica

Questo capitolo affronta il modo in cui percepiamo i suoni nell'ambiente. Ci porta al di là dei meccanismi responsabili per la percezione del campo o il volume dei puri e complessi suoni da chiederci cosa normalmente succede in un ambiente in cui siamo esposti a suoni provenienti da un numero di sorgenti differenti, spesso in contemporanea, e anche sequenze di suoni che creano dei modelli nel tempo. Considera, per esempio, un uomo che parla con una donna in un bar (**figura 12.1**). Lui la sente parlare dall'altra parte del tavolo e può dire che la musica sta provenendo dalle casse che si trovano dietro di lui. Succedono 4 cose che dobbiamo spiegare: come fa a dire da dove la voce della donna e la musica provengono? Questo è il *problema della localizzazione sonora*. Come fa a sentire in modo chiaro la musica, senza eco, nonostante parte del suono proveniente dalle casse stia rimbalzando sui muri e stia arrivando alle sue orecchie con un leggero ritardo? Questo è il *problema del suono riflesso*. Come fa a percepire la voce della donna separata dalla musica e da tutti gli altri suoni della stanza? Questo è un problema riguardante l'organizzazione percettiva chiamato il *problema di analisi della scena sonora*. Come fa a sentire i suoni musicali così percettivamente organizzati nel tempo, con un ritmo regolare? Percepire lo schema ritmico è il *problema della struttura metrica*.



figura 12.1. Scena del bar, che contiene multiple sorgenti sonore. La sorgente sonora più immediata per l'uomo al centro è la voce della donna dall'altra parte del tavolo che sta parlando con lui. Altre sorgenti riguardano le casse sul muro dietro di lui, che stanno diffondendo la musica, e le altre persone che stanno parlando nella stanza. I quattro problemi che considereremo in questo capitolo- (1) localizzazione sonora, (2) suono riflesso, (3) analisi della scena dentro separate sorgenti sonore, e (4) schemi musicali che sono organizzati nel tempo – sono indicati in questa figura.

Considereremo ognuno di questi 4 problemi in questo capitolo. Iniziamo affrontando la localizzazione.

LOCALIZZAZIONE SONORA

Dopo aver letto questa frase, chiudi gli occhi per un momento, ascolta, e presta attenzione a quali suoni senti e da dove provengono. Quando faccio questo proprio ora, seduto in un bar, sento il ritmo e la parte vocale di una canzone proveniente da una cassa sopra la mia testa e leggermente dietro di me, sento parlare una donna da qualche parte davanti a me, e il suono frizzante di una macchina del caffè proveniente dalla sinistra. Ci sono sicuramente altri suoni, perché stanno parlando molte persone, ma per ora presta attenzione su questi 3. Ogni suono- la musica, il dialogo, e il frizzante suono meccanico, sono sentiti come provenienti da diverse posizioni nello spazio. Questi suoni nelle diverse posizioni creano uno **spazio sonoro**, che esiste tutto intorno, dovunque ci

sia rumore. Questa localizzazione delle sorgenti del suono nello spazio sonoro è chiamata **localizzazione sonora**. Possiamo apprezzare il problema che il sistema uditivo incontra nel determinare queste posizioni comparando le informazioni per posizione visione e percezione. Per fare questo, sostituiamo un uccellino su un albero e un gatto sul suolo in **figura 12.2** con i suoni nel bar. L'informazione visuale per le varie posizioni del volatile e del gatto è contenuta nelle immagini degli stessi sulla superficie della retina. L'orecchio tuttavia è diverso. Il verso del volatile e del gatto stimolano la coclea basata sulle frequenze dei loro suoni, e come abbiamo visto nel capitolo 11, queste frequenze causano schemi di accensione di nervi che risultano nella nostra percezione come il campo e timbro di un tono. Ma l'attivazione delle fibre di nervi nella coclea si basa sulle componenti di frequenza dei toni e non sulla provenienza spaziale dei toni. Questo significa che 2 toni con la stessa frequenza che provengono da diversi luoghi attiveranno le stesse cellule ciliate e fibre di nervi nella coclea. Il sistema uditivo deve pertanto usare altre informazioni per determinare la posizione. L'informazione che usa implica dei **segnali di riferimento** che sono creati dal modo in cui il suono interagisce con la testa e le orecchie dell'ascoltatore.

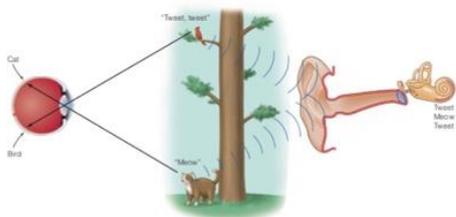


Figura 12.2 comparazione di informazioni di localizzazione sonore e visive. *Visivi*: l'uccello e il gatto, che sono posizionati in posti diversi, sono immaginati in diversi posti della retina. *Sonori*: le frequenze dei suoni dell'uccello e del gatto sono distribuite sulla coclea, senza riguardo alla posizione degli animali.

Ci sono 2 tipi di segnali di riferimento: *segnali binaurali*, che dipendono da entrambe le orecchie, e *segnali monofonici*, che

dipendono da un orecchio solo. Studi di ricerca su questi segnali hanno determinato come le persone sane possono localizzare i suoni in 3 dimensioni: l'**azimut**, che si estende da sinistra verso destra (**figura 12.3**); **elevazione**, che si estende sopra e sotto; e la **distanza** della sorgente sonora dall'ascoltatore. In questo capitolo, ci concentreremo sull'azimut e l'elevazione.

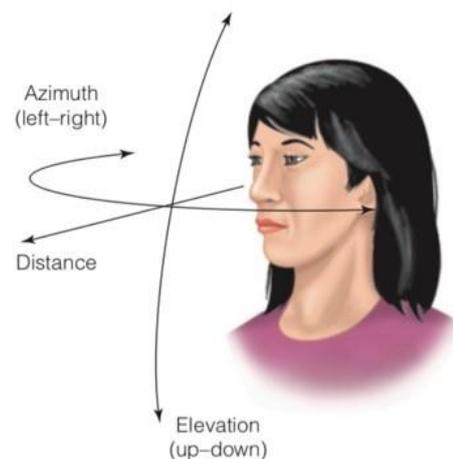


figura 12.3 le tre direzioni utilizzate per studiare la posizione dei suoni: azimut (sinistra-destra), elevazione (sopra-sotto), e distanza.

SEGNALI BINAURALI PER LA LOCALIZZAZIONE DEL SUONO

I **segnali binaurali** usano l'informazione che raggiunge entrambe le orecchie per determinare l'azimut (posizione sinistra-destra) dei suoni. I due segnali binaurali sono la *differenza di tempo interaurale* e la *differenza di livello interaurale*. Entrambi si basano sulla comparazione tra i segnali del suono che raggiungono l'orecchio destro e quelli che raggiungono l'orecchio sinistro. I suoni che sono posizionati di lato raggiungono prima un orecchio dell'altro e sono più forti su un orecchio che sull'altro.

Differenza di tempo interaurale

La **differenza di tempo interaurale (itd)** è la differenza tra quando un suono raggiunge l'orecchio sinistro e quando raggiunge l'orecchio destro (**figura 12.4**). Se la sorgente è posizionata perfettamente di fronte all'ascoltatore, sulla A, la distanza da entrambe le orecchie è uguale; il suono raggiunge simultaneamente l'orecchio destro e quello sinistro, così l'ITD è nulla. Tuttavia, se la sorgente si trova di lato, a B, il suono raggiunge prima l'orecchio destro di quello sinistro. Poiché l'ITD diventa tanto più grande quanto più le sorgenti del suono sono posizionate di lato, l'entità dell'ITD può essere utilizzata come un segnale per determinare la provenienza di un suono. Una ricerca comportamentale, nella quale gli ascoltatori giudicano il variare delle posizioni del suono con il variare dell'ITD, indica che l'ITD è un segnale efficace per la localizzazione di suoni a bassa frequenza (Wightman & Kistler, 1997,1998).

Differenza di livello interaurale l'altro segnale binaurale, **differenza di livello interaurale (ILD)** è basato sulla differenza nella pressione del livello del suono (o solo "livello") ricevuto dalle due orecchie (**figura 12.4**). Una differenza nel livello tra le due orecchie avviene poiché la testa è una barriera che crea un'ombra acustica, riducendo l'intensità dei suoni che raggiungono l'orecchio lontano. Questa riduzione di intensità sull'orecchio lontano avviene per suoni ad alta frequenza, come mostrato in **figura 12.5a**, ma non per i suoni a bassa frequenza, come mostrato in **figura 12.5b**.

Possiamo capire perché un ILD avviene per alte frequenze ma non per basse frequenze disegnando un'analogia tra le onde sonore e le onde dell'acqua. Consideriamo, per esempio, una situazione nella quale piccole onde nell'acqua si incontrano con una barca in **figura 12.5c**. siccome le onde sono piccole rispetto alla barca, rimbalzano sul fianco della barca e non vanno oltre. Ora immagina le stesse onde scontrarsi con le piante in **figura 12.5d**. Poiché la distanza tra le onde è

grande comparata con le piante, le onde sono difficilmente disturbate e continuano per la loro direzione. Questi due esempi illustrano che un oggetto ha un grande effetto sulle onde se è più grande della distanza tra le onde, ma ha un piccolo effetto se è più piccolo della distanza tra le onde. Quando applichiamo questo principio con le onde sonore che interagiscono con la testa di un ascoltatore, possiamo capire perché le onde sonore ad alta frequenza (che sono piccole comparate alla dimensione della testa) sono disturbate dalla testa e creano l'ombra acustica mostrata in **figura 12.5a**, ma quelle a bassa frequenza no.

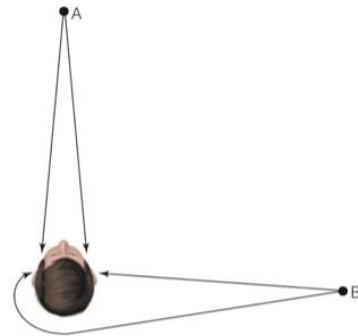


figura 12.4 il principio che sta dietro alla differenza di tempo interaurale (ITD). Il suono proprio di fronte all'ascoltatore, su A, raggiunge l'orecchio sinistro e destro allo stesso tempo. Tuttavia, quando il suono proviene da di lato, su B, raggiunge prima l'orecchio destro dell'ascoltatore che quello sinistro.

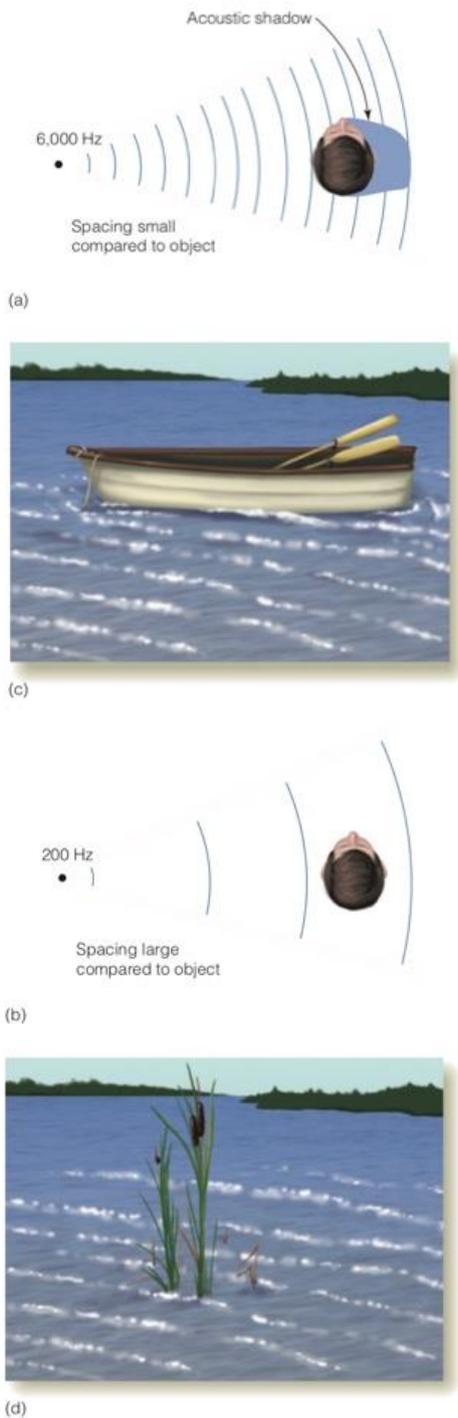


Figura 12.5 perché la differenza di livello interaurale (ILD) si verifica per alte frequenze ma non per basse frequenze. (a) persona che sta ascoltando un suono ad alta frequenza; (b) persona che sta ascoltando un suono a bassa frequenza. (c) quando lo spazio tra le onde è più piccolo dell'oggetto, mostrato qui dalle increspature dell'acqua che sono più piccole della barca, le onde sono fermate dall'oggetto. Questo accade per le onde sonore ad alta frequenza in (a) e causa che l'intensità del suono sia più bassa nel lato lontano della testa dell'ascoltatore. (d) quando lo spazio tra le onde è più largo dell'oggetto, come accade per le increspature dell'acqua e gli stretti gambi delle piante, l'oggetto non interferisce con le onde. Questo accade

pe le onde sonore a bassa frequenza in (b), e l'intensità del suono sul lato più lontano non è influenzata.

La **Figura 12.6** mostra la differenza tra ILD per alte e basse frequenze. Le ILD erano misurate attraverso l'uso di piccoli microfoni per registrare la differenza nell'intensità del suono che raggiungeva entrambe le orecchie per frequenze che variano dai 100 ai 5000 hz. ILD è complozzato contro frequenze per sorgenti sonore posizionate in tre differenti posizioni relative alla testa. Notiamo che ad alte frequenze, c'è una grande differenza tra le ILD per i suoni posizionati a 10 gradi (curva verde) e 90 gradi (curva blu). A frequenze più basse, tuttavia, c'è una differenza più piccola tra le ILD per i suoni provenienti da queste 2 posizioni fino a che, ad una frequenza molto bassa, la ILD è un indicatore molto povero di localizzazione sonora.

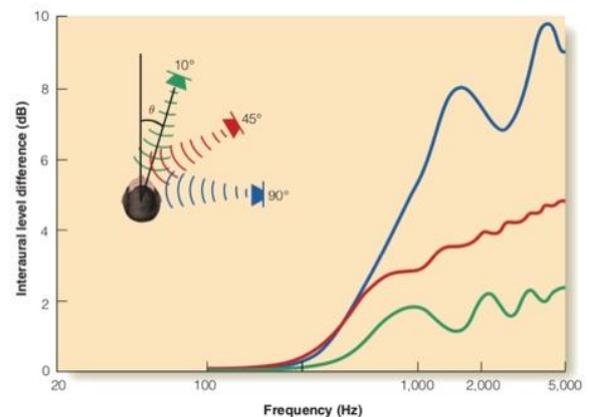


Figura 12.6 le tre curve indicano la differenza di livello interaurale (ILD) come una funzione della frequenza di tre diverse posizioni delle sorgenti sonore. Notiamo che la differenza in ILD per le diverse posizioni è più grande per le alte frequenze.

Il cono di confusione

Quando consideriamo assieme la differenza di spazio interaurale (ITD) e la differenza di livello interaurale (ILD), vediamo che si completano a vicenda. L' ITD fornisce l'informazione riguardo la posizione dei suoni a bassa frequenza, mentre l'ILD fornisce l'informazione della posizione dei suoni ad alta frequenza. Tuttavia, mentre le differenze di tempo e di livello forniscono informazioni

che non permettono alle persone di localizzare lungo le coordinate dell'azimut, forniscono informazioni ambigue riguardo l'altezza di una sorgente sonora. Puoi capire perché è così immaginando te stesso che stendi la mano proprio di fronte a te alla lunghezza del braccio e stai portando una sorgente sonora. Poiché la sorgente sarebbe equidistante dal tuo orecchio destro e sinistro, le differenze di tempo e di livello sarebbero nulle. Se ora immaginassi di muovere la tua mano verso l'alto, aumentando così l'altezza della sorgente sonora, la sorgente sarebbe ancora equidistante dalle due orecchie, così entrambe le differenze di tempo e livello sarebbero nulle.

Poiché le differenze di tempo e di livello possono essere uguali ad un numero di altezze diverse, non possono indicare in modo affidabile l'altezza della sorgente sonora. Informazioni ambigue simili sono riportate quando la sorgente sonora è di lato. Questi posti di ambiguità sono illustrati dal [cono di confusione](#) mostrato in **figura 12.7**. tutti i punti su questo cono hanno la stessa ILD e ITD. Per esempio, i punti A e B risulterebbero nella stessa ILD e ITD poiché la distanza da A all'orecchio destro e sinistro è la stessa di quella da B alle due orecchie. Una situazione simile si presenta per gli altri punti sul cono e ci sono anche altri coni più piccoli e più grandi. In altre parole, ci sono diverse posizioni nello spazio dove due suoni potrebbero risultare nella stessa ILD e ITD.

Segnale Monofonico per localizzare

La natura ambigua delle informazioni fornite da ITD e ILD a diversi livelli che indicano un'altra fonte di informazione è necessaria per individuare i suoni lungo la coordinata elevativa. Questa informazione è fornita da un [segnale monofonico](#) - un segnale che dipende dalle informazioni di un solo orecchio.

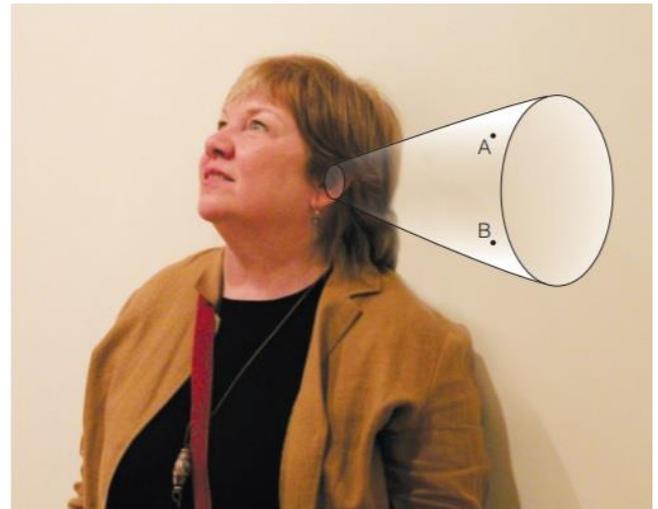


Figura 12.7 Il "cono di confusione". Ci sono molte coppie di punti su questo cono che hanno la stessa distanza dall'orecchio sinistro e dall'orecchio destro e quindi risultano nello stesso ILD e ITD. Ci sono anche altri coni in aggiunta a questo.

Il segnale monofonico per la localizzazione è chiamata a [segnale spettrale](#), perché l'informazione per la localizzazione è contenuta nelle differenze della distribuzione (o spettro) di frequenze che raggiungono ogni orecchio da posizioni diverse. Queste differenze sono causate dal fatto che prima che lo stimolo sonoro entri nel canale uditivo, esso viene riflesso dalla testa e all'interno delle varie pieghe dei padiglioni (**Figura 12.8a**). L'effetto di questa interazione con la testa e i padiglioni è stato misurato posizionando piccoli microfoni all'interno delle orecchie di un ascoltatore e confrontando le frequenze di suoni provenienti da direzioni diverse.

Questo effetto è illustrato nella **Figura 12.8b**, che mostra le frequenze rilevate dal microfono quando una banda larga sonora (uno contenente molte frequenze) si presenta ad altezze di 15 gradi sopra la testa e 15 gradi sotto la testa. I suoni provenienti da queste due posizioni risulterebbero nello stesso ITD e ILD perché sono ad uguale distanza dalle orecchie sinistra e destra, ma le differenze nel modo in cui i suoni rimbalzano all'interno del padiglione creano diversi modelli di frequenze per le due posizioni (King et al., 2001). L'importanza del padiglione auricolare per la determinazione elevativa è stata dimostrata

con il livellamento degli angoli e delle fessure dei padiglioni con del composto di stampa rendono difficile localizzare i suoni lungo la coordinata elevativa (Gardner & Gardner, 1973).

L'idea che la localizzazione può essere influenzata dall'uso dello stampo per cambiare i contorni interni dei padiglioni fu anche dimostrato da Paul Hofman e collaboratori (1998). Essi determinarono come cambia la localizzazione quando lo stampo veniva indossato per diverse settimane, e poi cosa succede quando lo stampo viene rimosso. I risultati per la performance di un ascoltatore misurati prima che lo stampo fosse inserito sono mostrati nella **Figura 12.9a**. I suoni sono stati presentati in posizioni indicate dalle intersezioni della griglia nera. Le performance di localizzazione medie sono indicate dalla griglia blu. La sovrapposizione tra le due griglie indica che la localizzazione era abbastanza accurata.

Dopo aver misurato le prestazioni iniziali, Hofman ha messo lo stampo ai suoi ascoltatori alterando la forma dei padiglioni e quindi modificato il segnale spettrale.

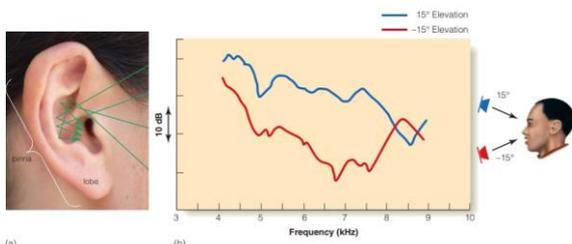


Figura 12.8 (a) Il padiglione mostra il suono che rimbalza in angoli e fessure. **(b)** Spettro di frequenza registrato da un piccolo microfono all'interno dell'orecchio destro dell'ascoltatore per la stessa banda larga sonora proveniente da due luoghi diversi. La differenza nel modello quando il suono è 15 gradi sopra la testa (curva blu) e 15 gradi sotto la testa (curva rossa) è causata dal modo in cui frequenze diverse rimbalzano all'interno del padiglione auricolare quando si immettono da diverse angolazioni.

La Figura 12.9b mostra che le performance di localizzazione sono scarse per la coordinata elevativa immediatamente dopo l'inserimento dello stampo, ma le posizioni possono ancora essere giudicate in punti lungo la coordinata di azimuth. Questo è esattamente ciò che ci

aspetteremmo se i segnali binaurali siano utilizzati per giudicare la posizione dell'azimut e che i responsabili spettrali siano responsabili per giudicare le posizioni di elevazione.

Hofman ha continuato il suo esperimento riprovando a testare la localizzazione mentre i suoi ascoltatori continuavano ad indossare gli stampi. Si può vedere dalla **Figura 12.9c-d** che le prestazioni di localizzazione sono migliorate, fino a che dopo 19 giorni la localizzazione è diventata ragionevolmente accurata. Apparentemente, la persona aveva imparato, in un periodo di settimane, ad associare nuovi segnali spettrali a direzioni diverse nello spazio.

Cosa pensi che sia successo quando gli stampi sono stati rimossi? Sarebbe logico aspettarsi che, una volta adattato al nuovo insieme di segnali spettrali creati dagli stampi, le prestazioni di localizzazione ne avrebbero risentito quando gli stampi sarebbero stati rimossi.

Tuttavia, come mostrato nella **Figura 12.9e**, la localizzazione è rimasta eccellente immediatamente dopo la rimozione degli stampi auricolari. Apparentemente, l'addestramento con gli stampi ha creato una nuova serie di correlazioni tra segnali spettrali e posizione, ma la vecchia correlazione era ancora lì.

Un modo in cui ciò potrebbe accadere è se diversi gruppi di neuroni fossero coinvolti nel rispondere a ogni serie di segnali spettrali, così come aree cerebrali separate sono coinvolte nell'elaborare

linguaggi diversi in persone che parlano più di una lingua (King et al., 2001; Wightman &

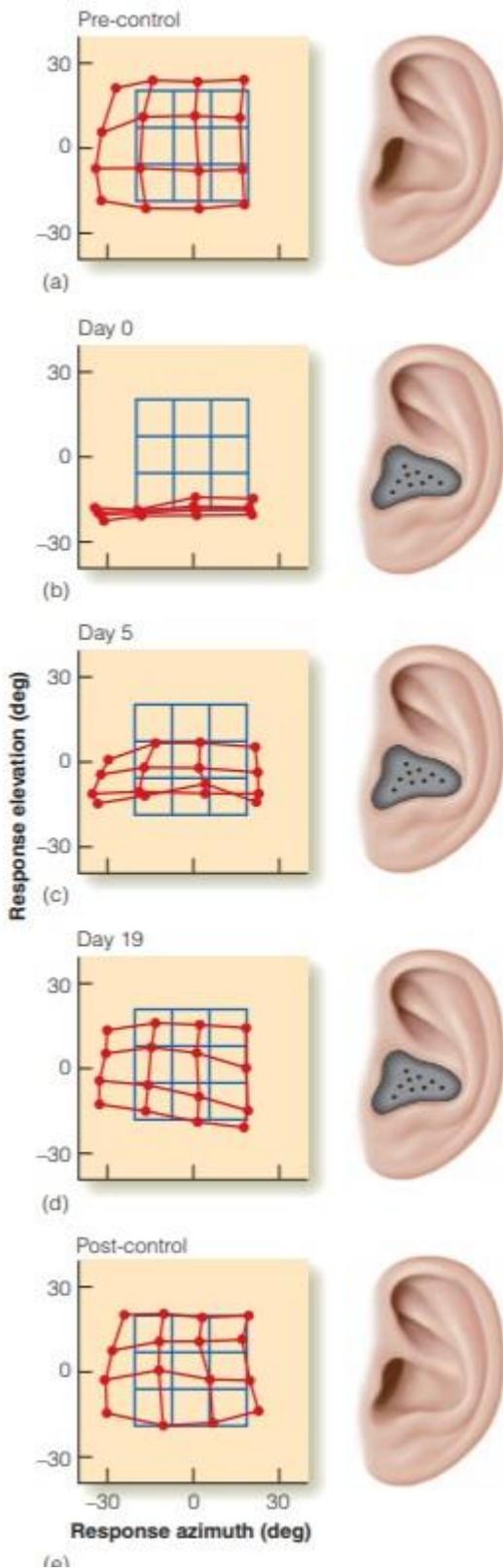


Figura 12.9 Come la localizzazione cambia quando viene posizionato uno stampo nell' orecchio. Vedi il testo per la spiegazione.

Kistler, 1998, vedi anche Van Wanrooij & Opstal, 2005).

Abbiamo visto che ogni tipo di segnale funziona meglio per diverse frequenze e diverse coordinate. ITD e ILD lavorano per giudicare la posizione dell'azimuth, con ITD migliore per le basse frequenze e ILD per le alte frequenze. I segnali spettrali funzionano meglio per giudicare l'elevazione, specialmente alle frequenze più alte.

Questi segnali collaborano per aiutarci a localizzare i suoni. Nell'ascolto del mondo reale, spostiamo anche le nostre teste, fornendoci informazioni aggiuntive su ITD, ILD e segnali spettrali che aiutano a minimizzare l'effetto del cono di confusione e aiutano a localizzare i suoni continui.

La visione ha anche un ruolo nella localizzazione del suono, come quando si sente parlare e si vede una persona che fa gesti e movimenti delle labbra che corrispondono a ciò che si sente. Quindi, la ricchezza dell'ambiente e la nostra capacità di cercare attivamente le informazioni ci aiutano a zero sulla localizzazione di un suono.

La Fisiologia della Localizzazione Uditiva

Avendo identificato i segnali associati alla provenienza del suono, chiediamo ora come le informazioni di questi segnali sono rappresentate nel sistema nervoso. Ci sono neuroni nel sistema uditivo che segnalano ILD o ITD? Per iniziare a rispondere a questa domanda, descriveremo il percorso dalla coclea alla corteccia, perché è lungo questo percorso che i segnali dalle orecchie sinistra e destra si incontrano, per poi continuare fino alla corteccia uditiva.

Il Percorso Uditivo e la Corteccia

I segnali generati nelle cellule ciliate della coclea vengono trasmessi dalla coclea nelle fibre nervose del nervo uditivo (fare riferimento alla **Figura 11.16**). Il nervo uditivo trasporta i segnali generati dalle cellule ciliate interne lontano dalla coclea e verso l'area di ricezione uditiva nella corteccia. La **Figura 12.10** mostra la via che i segnali uditivi seguono dalla coclea alla corteccia uditiva. I nervi uditivi dalla sinapsi della coclea in una sequenza di **strutture subcorticali** - strutture al di sotto della corteccia cerebrale. Questa sequenza inizia con il **nucleo cocleare** e continua al **nucleo olivare superiore** nel tronco cerebrale, il **collicolo inferiore** nel mesencefalo e il **nucleo genicolato mediale** nel talamo. Dal nucleo del genicolato mediale, le fibre continuano alla **corteccia uditiva primaria** (o **area di ricezione uditiva, A1**), nel lobo temporale della corteccia.

Se hai difficoltà a ricordare questa sequenza di strutture, ricorda l'acronimo SONIC MG (una macchina sportiva molto veloce), che rappresenta le tre strutture tra il nucleo cocleare e la corteccia uditiva, come segue: SON = superior olivary nucleus; IC = collicolo inferiore; MG = nucleo genicolato mediale.

Una grande quantità di elaborazione avviene mentre i segnali viaggiano attraverso le strutture subcorticali lungo il percorso dalla coclea alla corteccia. L'elaborazione nel

nucleo olivare superiore è importante per la localizzazione binaurale perché è qui che le strutture subcorticali lungo il percorso dalla coclea alla corteccia. L'elaborazione nel nucleo olivare superiore è importante per la localizzazione binaurale perché è qui che i segnali dell'orecchio sinistro e destro si incontrano (indicato dalla presenza di entrambe le frecce rosse e blu nella **Figura 12.10**). Più lontano l'elaborazione binaurale si verifica anche nel collicolo inferiore (King et al., 2001).

I segnali uditivi arrivano all'area di ricezione uditiva primaria (A1) nel lobo temporale e quindi viaggiano verso altre aree uditive corticali: (1) l'area **centrale**, che include la corteccia uditiva primaria (A1) e alcune aree vicine; (2) l'area della **cintura**, che circonda il nucleo, e (3) l'area della **para-cintura** (Kaas et al., 1999; Rauschecker, 1997, 1998) (**Figura 12.11**). Più avanti nel capitolo, vedremo che il nucleo e l'area della cintura sono entrambe importanti per la localizzazione uditiva e per l'identificazione dei suoni.

Il Modello Jeffress di corrispondenza Neuronale

Incominciamo a descrivere la fisiologia della localizzazione descrivendo il circuito neuronale che propose nel 1948 Lloyd Jeffress, al fine di mostrare come segnali provenienti dall'orecchio destro e sinistro possono essere combinati per determinare l'ITD. Il **Modello di Jeffress** della localizzazione uditiva propose che i neuroni siano cablati e dunque ricevano tutti i segnali provenienti dalle due orecchie, come mostrato in **Figura 12.12**. I segnali provenienti dall'orecchio arrivano lungo l'assone blu ed i segnali provenienti dall'orecchio destro arrivano lungo l'assone rosso.

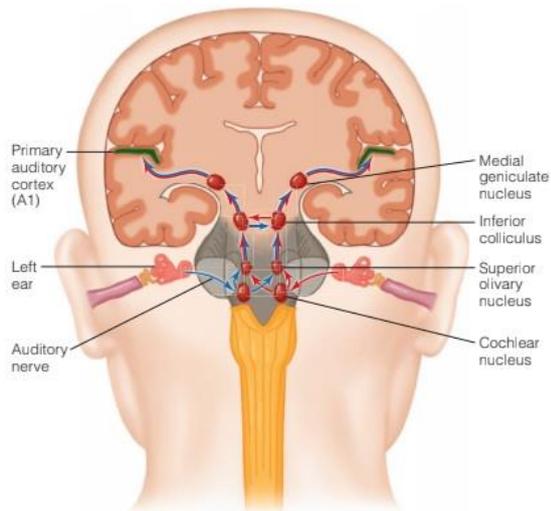


Figura 12.10 Il diagramma dei percorsi uditivi. Questo diagramma è ampiamente semplificato, infatti numerose connessioni tra le strutture non sono mostrate. Nota che le strutture auditive sono bilaterali - esistono in entrambe le parti del corpo, sia destra sia sinistra - e questi messaggi possono attraversare entrambe le parti.

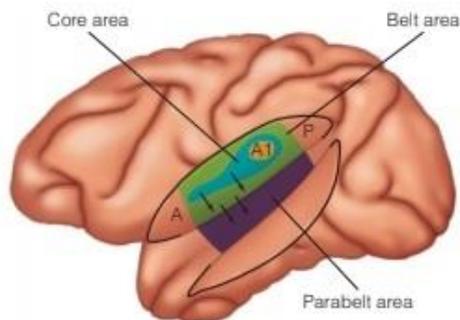


Figura 12.11 Le tre aree uditive principali nella corteccia di una scimmia: l'area del nucleo, essa contiene l'area primaria di ricezione uditiva (A1); l'area della cintura; e l'area della para-cintura. La P indica la zona finale, posteriore dell'area della cintura, la A indica la zona finale dell'area anteriore dell'area della cintura. I segnali, indicati dalle frecce, viaggiano dal nucleo alla cintura alla para-cintura. Le linee nere indicano dove il lobo temporale veniva spinto indietro per rendere visibili le aree che altrimenti non sarebbero visibili dalla superficie.

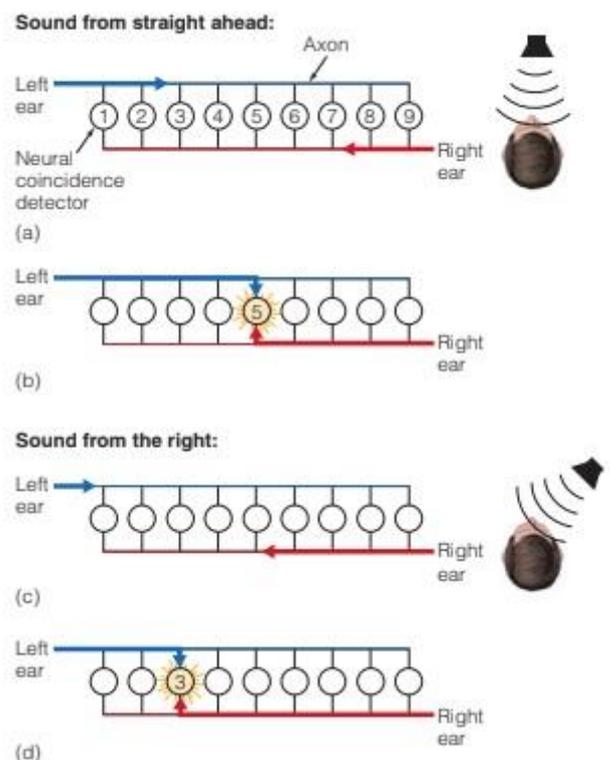


Figura 12.12 Ecco come il circuito proposto da Jeffress opera. Gli Assoni trasmettono i segnali dall'orecchio sinistro (blu) e l'orecchio destro (rosso) ai neuroni, indicati dai cerchi. (a) Suono frontale. I segnali partono dal canale sinistro e destro simultaneamente. (b) I segnali si incontrano nei neuroni 5, causandone

l'accensione. (c) Suono di destra. Il segnale parte prima da canale destro. (d) I segnali si incontrano nel neurone 3, causandone l'accensione.

Se la sorgente del suono è direttamente di fronte all'ascoltatore, il suono viene ricevuto simultaneamente dall'orecchio sinistro e destro, inoltre i segnali provenienti dall'orecchio sinistro e destro escono insieme, come mostrato in **Figura 12.12a**. Poiché ogni segnale viaggia lungo il suo assone, stimola a turno ciascun neurone lungo l'assone. All'inizio del viaggio, i neuroni ricevono segnali solo dall'orecchio sinistro (neuroni 1, 2, 3) o dall'orecchio destro (neuroni 9, 8, 7), ma non da entrambi, e non si attivano. Ma quando entrambi i segnali raggiungono insieme il neurone 5, i neuroni si attivano (**Figura 12.12b**). Questo neurone e gli altri in questo circuito sono chiamati **rivelatori di corrispondenza**, perché si attivano solo quando entrambi i segnali coincidono arrivando al neurone simultaneamente. La durata del neurone 5 indica che $ITD = 0$. Se il suono proviene da destra, si verificano eventi simili, ma il segnale dall'orecchio destro ha un vantaggio, come mostrato nella **Figura 12.12c**, ed entrambi i segnali raggiungono il neurone 3 simultaneamente (**Figura 12.12d**), quindi questo neurone si attiva. Questo neurone, quindi, rileva gli ITD che si verificano quando il suono sta arrivando da una posizione specifica a destra. Gli altri neuroni nel circuito si spostano in posizioni corrispondenti ad altri ITD.

Il modello di Jeffress propone quindi un circuito che coinvolge "rivelatori ITD" e propone anche che ci siano una serie di questi rivelatori, ognuno sintonizzato per rispondere meglio ad un ITD specifico. Secondo questa idea, l'ITD sarà indicato da quale neurone ITD sta si sta attivando. Questo è stato definito un "codice posto" perché ITD è indicato dal luogo (quale neurone) in cui si verifica l'attività.

Un modo per descrivere le proprietà dei neuroni ITD è misurare le **curve di sintonizzazione ITD**, che tracciano la frequenza di attivazione del neurone contro

l'ITD. La registrazione dei neuroni nel tronco cerebrale del barbagianni, che ha eccellenti capacità di localizzazione uditiva, ha rivelato curve di sintonizzazione stretta che rispondono meglio a ITD specifici, come quelli nella **Figura 12.13** (Carr & Konishi, 1990; McAlpine, 2005). I neuroni associati alle curve dell'attivazione a sinistra (blu) quando il suono raggiunge prima l'orecchio sinistro e quelli a destra (rosso) quando il suono raggiunge prima l'orecchio destro. Queste sono le curve di sintonizzazione previste dal modello Jeffress, poiché ogni neurone risponde meglio a un ITD specifico e la risposta diminuisce rapidamente per altri ITD. Tuttavia, la situazione è diversa per i mammiferi.

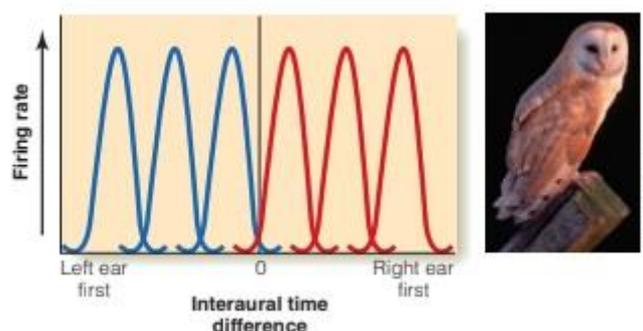


Figura 12.13 La messa a punto delle curve ITD per sei neuroni, i quali rispondono ad uno stretto range di ITDs. I neuroni sulla sinistra rispondono quando ricevono il suono prima dall'orecchio sinistro. Quelli sulla destra rispondono quando ricevono il suono prima dall'orecchio destro. Neuroni come questi sono stati registrati dalla civetta del fieno e da altri animali. Tutt'al più quando consideriamo i mammiferi emergono altre storie.

Ampiezza ITD Tuning Curves nei mammiferi.

I risultati di ricerca nei quali le ITD Tuning Curves sono registrate nei mammiferi possono supportare, a prima vista, il modello di Jeffress. Per esempio la figura 12.14a mostra l'ITD Tuning Curve di un neurone nel nucleo olivare superiore di un criceto (Pecka et al., 2008). Questa curva ha l'apice nel mezzo e cala da entrambi i lati. Tuttavia, se compariamo la curva del criceto con la curva del barbagianni comune (figura 12.14b), possiamo notare dalla scala ITD, che sull'asse orizzontale la curva del criceto è

molto più ampia di quella del barbagianni. Infatti, la curva del criceto è così ampia che si estende molto lontano dal range di ITD che è effettivamente coinvolto nella localizzazione del suono, indicato dalla barra luminosa (si veda Siveke et al., 2006). Questa ampiezza di risposta alle diverse posizioni, si verifica anche nella corteccia uditiva delle scimmie. La figura 12.15 mostra le risposte di un neurone nella corteccia uditiva sinistra della scimmia a suoni provenienti da differenti posizioni attorno alla testa dell'animale. Questo neurone risponde meglio ai suoni alla destra della scimmia ed è ampiamente sintonizzato, quindi anche se risponde meglio quando il suono proviene da circa 60 gradi (indicato dalla stella), risponde ottimamente anche da altre direzioni (Recanzone et al., 2011; Woods et al., 2006). A causa dell'ampiezza delle curve ITD nei mammiferi, è stato proposto che la codifica per la localizzazione sia basata su neuroni ampiamente sintonizzati come quelli mostrati in figura 12.16 (McAlpine, 2005; Grothe, 2010). Secondo quest'idea ci sono neuroni ampiamente sintonizzati nell'emisfero destro che rispondono quando il suono proviene da sinistra e neuroni ampiamente sintonizzati nell'emisfero sinistro che rispondono quando il suono proviene da destra. La posizione di un suono è indicata dalla proporzione tra le risposte di questi due tipi di neuroni ampiamente sintonizzati. Per esempio, un suono proveniente da sinistra provocherebbe lo schema di risposta osservato nella coppia di barre a sinistra nella Figura 12.16b; un suono proveniente da davanti si osserva nella coppia di barre in mezzo e un suono proveniente da destra nelle barre sulla destra. Questo tipo di codifica ricorda il "distributed coding" che abbiamo descritto nel Capitolo 3, in cui l'informazione nel sistema nervoso è basata su uno schema di risposte neurali. Ciò assomiglia infatti a come il sistema visivo segnala le diverse lunghezze d'onda della luce, come abbiamo visto quando abbiamo parlato della ricezione dei colori nel Capitolo 9, nella quale le lunghezze

d'onda sono indicate dagli schemi di risposta di tre differenti pigmenti a cono (Figura 9.11).

Per riassumere la ricerca sui meccanismi neurali di localizzazione binaurale, possiamo concludere che è basata su neuroni nettamente sintonizzati negli uccelli e su neuroni ampiamente sintonizzati nei mammiferi. Il codice per gli uccelli è un "place code" perché l'ITD è indicato dall'accensione di neuroni in un luogo specifico. Il codice per i mammiferi è un "distributed code" poiché l'ITD è determinato dall'accensione di molti neuroni ampiamente sintonizzati che lavorano insieme. Successivamente dobbiamo considerare un altro pezzo di storia dei mammiferi, che va al di là del considerare come l'ITD è codificato dai neuroni, ma va a considerare come è organizzata l'informazione riguardo al localizzazione nella corteccia.

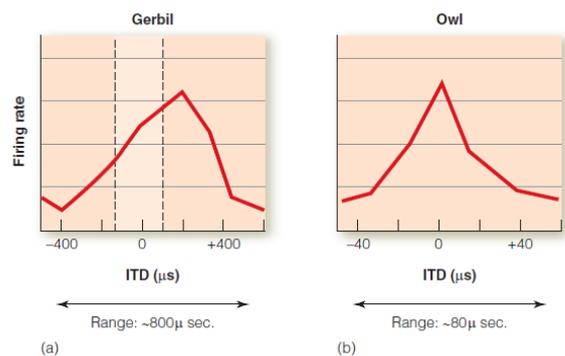


Figure 12.14 (a) L'ITD Tuning Curve per un neurone nel nucleo olivare superiore di un criceto. (b) L'ITD Tuning Curve per un neurone nel collicolo inferiore di un barbagianni. L'indicatore del range sotto le curve indica che la curva del criceto è molto più ampia di quella del barbagianni. La curva del criceto, infatti, è più ampia del range di ITD che si verifica di solito in tale contesto. Questo range è rappresentato dalla barra luminosa (tra le linee tratteggiate).

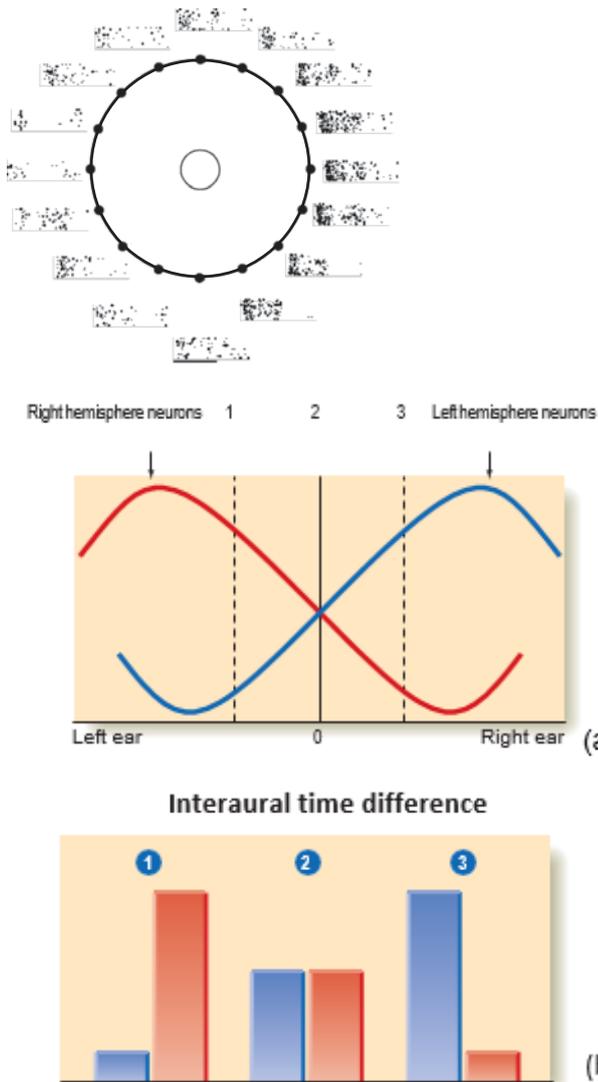


Figura 12.15 Risposte registrate da un neurone nella corteccia uditiva sinistra di una scimmia per dei suoni originati da posizioni differenti attorno alla testa. La posizione della scimmia è indicata dal cerchio presente nel mezzo. Il lancio di un singolo neurone corticale verso un suono presentato da posizioni diverse attorno alla scimmia è mostrato dalle registrazioni per ogni posizione. Un miglior lancio è indicato da una migliore maggiore densità di puntini. Questo neurone risponde a suoni provenienti da un numero di zone a destra.

Figura 12.16 (a) L'ITD Tuning Curve per neuroni ampiamente sintonizzati come quello mostrato in figura 12.14a. La curva di sinistra rappresenta la sintonizzazione dei neuroni nell'emisfero destro; la curva di destra è la sintonizzazione dei neuroni nell'emisfero sinistro. (b) Gli schemi delle risposte delle curve ampiamente sintonizzate per gli stimoli arrivano da sinistra, da davanti e da destra.

Localizzazione nell'Area A1 e l'area uditiva Belt.

Ora osserviamo la ricerca su dove l'informazione riguardo la localizzazione viene processata nella corteccia. I ricercatori hanno usato numerose tecniche differenti per determinare se l'area di ricezione uditiva primaria, A1, è coinvolta nella localizzazione. Una tecnica è quella di determinare come la localizzazione sia influenzata dalla distruzione o la disattivazione di A1. Fernando Nodal e collaboratori (2010), usando il metodo dell'ablazione cerebrale (o lesione) nei furetti (si veda Metodo: Ablazione cerebrale nel Capitolo 4, pagina 83), scoprono che distruggendo A1 l'abilità dei furetti di localizzare i suoni diminuisce, ma non viene totalmente

eliminata. Il ruolo di A1 nella localizzazione è stato anche dimostrato da Shveta Malhotra e Stephen Lomber (2007), che dimostrarono che disattivando A1 nei gatti per raffreddamento si abbassa la localizzazione. Tuttavia sia gli studi sui furetti che quelli sui gatti dimostrarono che distruggendo o disattivando A1 la localizzazione viene influenzata, questi studi dimostrarono anche che distruggendo o disattivando le aree al di fuori di A1 si influenza la localizzazione. La ricerca su come le aree uditive di ordine superiore, come la "belt" o la "parabelt", influenzano la localizzazione è appena iniziata. Gregg Recanzone (2000) paragonò la sintonizzazione spaziale dei neuroni nell'area

A1 e i neuroni nella "posterior belt area" (indicata dalla P nella figura 12.11). Fece ciò registrando dai neuroni delle scimmie e determinando come un neurone rispondeva quando la sorgente di un suono si spostava in una posizione differente rispetto alla scimmia. Scoprì che i neuroni in A1 rispondono quando un suono si sposta dentro un'area specifica dello spazio e non risponde fuori da quella zona. Quando poi registrò dai neuroni nella "posterior belt area", scoprì che questi neuroni rispondono al suono dentro un'area ancora più piccola, indicando che la sintonizzazione spaziale è maggiore nella "posterior belt area". Pertanto, i neuroni nell'area "belt" forniscono informazioni più precise di quelle dei neuroni nell'area A1 riguardo alla posizione delle sorgenti del suono.

Andare oltre il Lobo Temporale: Percorso uditivo “where” (e “what”).

L'elaborazione uditiva per la posizione si estende oltre le aree uditive del lobo temporale. Due percorsi uditivi si estendono dal lobo temporale al lobo frontale. Questi percorsi, come i percorsi “what” e “where” sono descritti per la vista (si veda pagina 84), vengono chiamati percorsi uditivi “what” e “where” (Kaas & Hackett, 1999). La freccia blu nella Figura 12.17 indica il percorso “what”, che inizia dalla parte davanti (anteriore) del nucleo e della zona “belt” (indicata da A nella Figura 12.11) e si estende nella corteccia prefrontale. Il percorso “what” è responsabile dell'identificazione dei suoni. La freccia rossa nella Figura 12.17 indica il percorso “where”, il quale inizia nella parte posteriore del nucleo e della zona “belt” e si estende verso la corteccia prefrontale. Questo è il percorso associato alla localizzazione del suono. La ramificazione del sistema uditivo in queste due vie è indicata dalla differenza tra come l'informazione viene processata nell'area posteriore e nell'area anteriore “belt”. Abbiamo visto che i neuroni nell'area posteriore “belt” portano a migliori sintonizzazioni spaziali rispetto ai neuroni in A1. La ricerca ha anche dimostrato che mentre i neuroni A1 delle scimmie vengono attivati con semplici suoni (ad esempio i suoni puri), i neuroni nella area anteriore rispondono a suoni più complessi, ad esempio i versi delle scimmie, vocalizzi registrati dalle scimmie nella giungla (Rauschecker & Tian, 2000). Pertanto, l'area posteriore “belt” è associata alla sintonizzazione spaziale, mentre quella anteriore all'identificazione dei differenti tipi di suoni. Questa differenza tra area posteriore e anteriore rappresenta la differenza tra i percorsi uditivi “where” e “what”. Ulteriori prove sui percorsi uditivi “what” e “where” sono state fornite da Stephen Lomber e Shveta Malhotra (2008), i quali dimostrarono che disattivando temporaneamente le aree uditive anteriori di un gatto, per raffreddamento, la corteccia ostacola

l'abilità del gatto di riconoscere la differenza tra due patterns di suoni, ma non ha effetto sulle abilità del gatto nel localizzare i suoni (Figura 12.18a). Al contrario, disattivando le aree posteriori uditive del gatto, si interrompe la sua abilità di localizzare i suoni, senza intaccare l'abilità di riconoscere la differenza tra due patterns di suoni (Figura 12.18b). Se il disegno di questo esperimento sembra familiare è perché è lo stesso dell'esperimento di Ungerleider e Mishkin's (1982) che dimostrò i percorsi visivi nelle scimmie (Figure 12.18 e 4.13). In entrambi gli esperimenti, lesionando un'area (per l'esperimento sull'area visiva) o disattivando un'area (per l'esperimento sull'area uditiva) viene eliminata la funzione “what”, mentre lesionando o disattivando un'altra area viene eliminata la funzione “where”. Anche casi di cervelli umani danneggiati supportano l'idea di “what” e “where”. Per esempio, la Figura 12.19a mostra le aree della corteccia che sono state danneggiate in J.G., un uomo di 45 anni con un danno al lobo temporale causato da una ferita alla testa, e di E.S., una donna di 64 anni con danni al lobo parietale e al lobo frontale causati da un infarto. La Figura 12.19b mostra che J.G. riesce a localizzare i suoni, ma con un basso riconoscimento, mentre E.S. riesce a riconoscere i suoni, ma la sua abilità nel localizzarli è bassa. Pertanto, il percorso di “what” di J.G. è danneggiato, mentre il percorso di “where” di E.S. è danneggiato. Altre ricerche hanno anche fornito delle evidenze riguardo ai percorsi uditivi di “what” e “where”, usando la scansione cerebrale per far notare che le attività di “what” e “where” attivano aree differenti nel cervello umano. (Alain et al., 2001, 2009; De Santis et al., 2007; Wissinger et al., 2001). Possiamo riassumere che le informazioni riguardo la localizzazione uditiva vengano processate dalla corteccia nella seguente maniera: I studi sulla lesione e il raffreddamento indicano che A1 è importante per la localizzazione. Tuttavia, ricerche aggiuntive hanno indicato che l'elaborazione di informazioni sulla localizzazione si verifica anche nell'area “belt” e poi continua nel

percorso "where", il quale si estende dal lobo temporale fino all'area prefrontale nel lobo frontale.

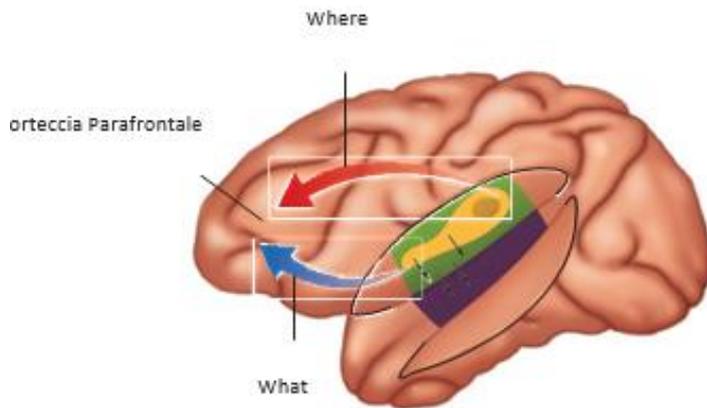


Figura 12.17 Percorsi uditivi "what" e "where". La freccia blu dal nucleo anteriore è il percorso "what". La freccia rossa dal nucleo posteriore è il percorso "where".

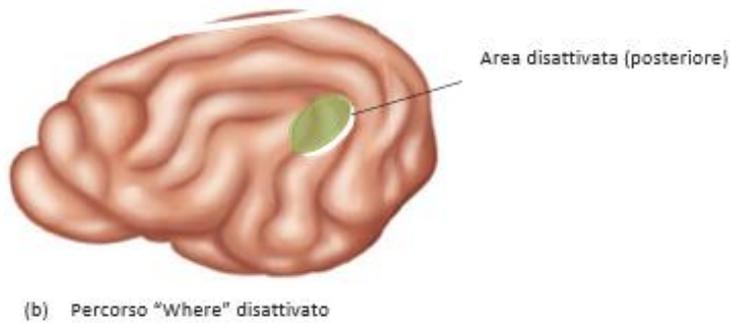
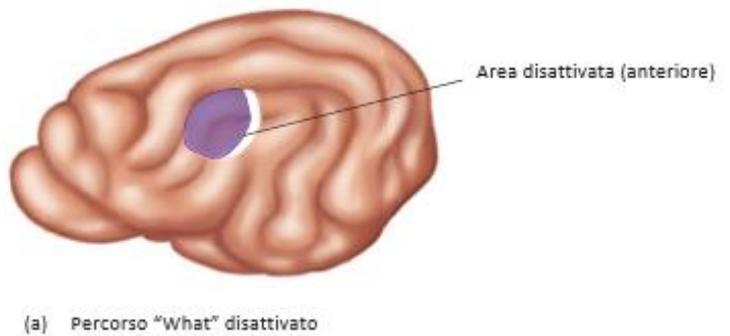
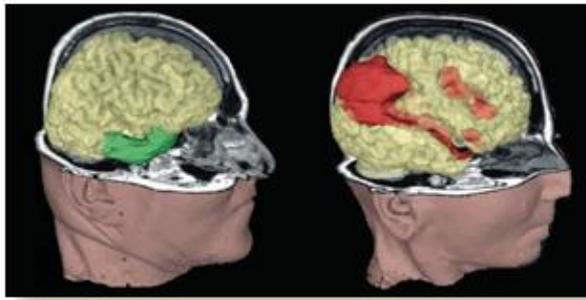
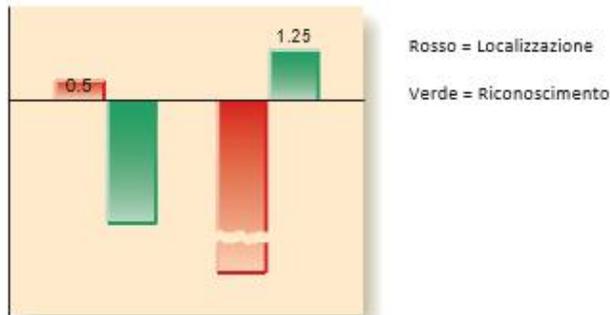


Figura 12.18 Risultati dell'esperimento di Lomber e Malhotra's (2008). (a) Quando l'area uditiva anteriore ("what") dei gatti viene disattivata inserendo una piccola sonda di raffreddamento all'interno dell'area viola, il gatto non riesce a identificare i suoni ma riesce a localizzarli. (b) Quando l'area uditiva posteriore ("where") viene disattivata inserendo una piccola sonda di raffreddamento all'interno dell'area verde, il gatto non riesce a localizzare i suoni, ma riesce a identificarli.



(a)



(b) J.G. E.S.

Figura 12.19 (a) Le aree colorate indicano il danno cerebrale per J.G. (sinistra) e per E.S. (destra). (b) Performance sul test di riconoscimento (barra verde) e test di localizzazione (barra rossa).

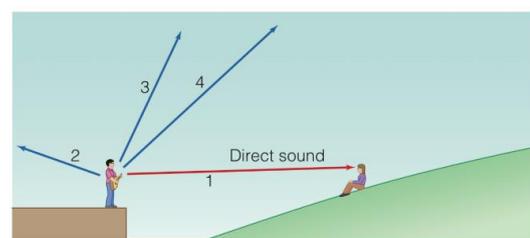
L'udito all'interno delle stanze

Finora in questo capitolo, ma anche nel capitolo 11, abbiamo visto che la nostra percezione dei suoni dipende da diverse proprietà del suono, incluse la sua frequenza, il livello del suono, la posizione nello spazio e la relazione con altri suoni. Ma abbiamo escluso il fatto che nella nostra consueta esperienza quotidiana, sentiamo suoni in un ambiente specifico, come per esempio in una piccola stanza, in un largo auditorium o all'aperto. Considerato questo aspetto dell'ascolto, vedremo perché percepiamo i suoni diversamente in base a quando siamo in ambienti chiusi o aperti, e come la nostra percezione della qualità del suono è forzata da specifiche proprietà di ambienti interni.

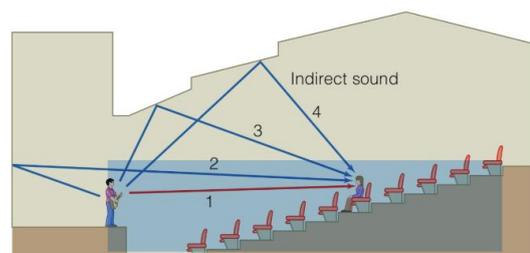
La **Figura 12.20** mostra come la natura del suono che raggiunge l'ascolto dipende dall'ambiente nel quale senti quel determinato suono.

Se stai ascoltando qualcuno suonare una chitarra in un palco all'aperto, alcuni dei suoni che senti raggiungono le orecchie dopo essersi riflessi sul terreno o su oggetti come alberi, ma la maggior parte

dei suoni viaggia direttamente dalla fonte del suono alle orecchie (**Figura 12.20a**). Comunque, se stai ascoltando la stessa chitarra in un auditorium, una larga porzione del suono rimbalza sul muro dell'auditorium, sul soffitto e sul pavimento prima di raggiungere le orecchie (**Figura 12.20b**).



(a)



(b)

Figura 12.20 (a) Quando senti un suono esterno, senti principalmente un suono diretto. **Figura 12.20**

(b) Quando senti un suono dentro a una stanza, senti sia il suono diretto che suoni indiretti che sono i riflessi provenienti dai muri, dal pavimento, e dal soffitto della stanza .

Il suono che raggiunge direttamente le orecchie è chiamato suono diretto; il suono che che raggiunge le orecchie dopo un po' di tempo è chiamato suono indiretto. Il fatto che il suono può raggiungere le nostre orecchie direttamente da dove esso è stato originato e indirettamente da altre posizioni crea un potenziale problema, in quanto anche se il suono ha origine in un luogo, esso raggiunge l'ascoltatore da più direzioni e varie volte.

Ciononostante, generalmente percepiamo il suono come se arrivasse da un solo luogo. Capiamo perché questo si verifichi considerando i risultati di una ricerca in cui agli ascoltatori venivano presentati suoni separati da tempi non vicini fra loro, come accadrebbe quando la loro origine proviene da due differenti posizioni.

SENTIRE DUE SUONI CHE RAGGIUNGONO LE ORECCHIE IN TEMPI DIVERSI

Una ricerca sui riflessi del suono e la percezione di posizioni ha semplificato il problema di come le persone sentono i suoni se arrivano da due altoparlanti separati in uno spazio, come è mostrato nella **Figura 12.21**.

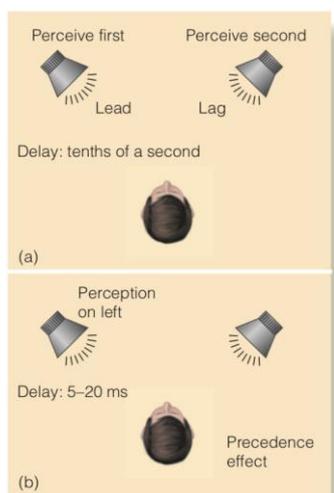


Figura 12.21. (a) quando il suono viene prodotto prima da un altoparlante e poi da un altro, con un tempo più o meno lungo fra un suono e l'altro, i due suoni sono percepiti come due suoni distinti fra loro, prima uno e poi l'altro. (b) Se, invece, intercorre un tempo molto breve fra i due suoni, si percepisce il suono come se provenisse solamente dall'altoparlante principale. Questo viene chiamato effetto di precedenza.

La persona che parla sulla sinistra è l'altoparlante principale e l'altro sulla destra è il secondo altoparlante. Se il suono proviene dall'altoparlante principale ed è seguito da una lunga pausa (decine di secondi), e poi, un altro suono proviene dal secondo altoparlante, gli ascoltatori sentono due suoni separati, uno che viene dalla sinistra (quello del megafono principale) seguito da un altro suono che invece proviene dalla destra (quello del megafono secondario).

Ma quando la pausa tra il principale e il secondario è più breve, succede qualcosa di diverso. Anche se il suono proviene da entrambi gli altoparlanti l'ascoltatore riesce a sentire solo il suono che proviene dall'altoparlante principale. Questa situazione, in cui il suono sembra abbia origine dall'altoparlante principale, è chiamata **l'effetto di precedenza** perché percepiamo il suono che proviene dalla fonte che raggiunge prima le nostre orecchie (Litovsky et al., 1997, 1999; Wallach et al., 1949).

L'effetto di precedenza governa la maggior parte delle nostre esperienze di ascolto in luoghi al chiuso. Nelle piccole stanze, i suoni indiretti sono riflessi dai muri che hanno un livello più basso rispetto al suono diretto e e arrivano alle nostre orecchie con un ritardo di circa 5 o 10 ms. Nelle grandi stanze, come le sale dei concerti, il ritardo è più lungo. Per effetto di precedenza si intende che generalmente percepiamo il suono come se arrivasse da una propria fonte piuttosto che da più direzioni diverse alla volta. Puoi dimostrare l'effetto di precedenza a te stesso attraverso la seguente dimostrazione.

DIMOSTRAZIONE

“L'effetto di precedenza”

Per dimostrare questo effetto, metti dei comandi sul sistema del tuo stereo cosicché entrambi gli altoparlanti

producano il medesimo suono, e posizionati tra gli altoparlanti in modo tale da sentire che il suono proviene da un punto che sta tra i due altoparlanti. Poi, muoviti leggermente o alla destra o alla sinistra cosicché il suono che proviene da uno dei due altoparlanti ci metterà più tempo per raggiungere le tue orecchie. La posizione più vicina e la posizione più lontano corrispondono all'altoparlante principale e a quello secondario di cui si è discusso prima. Quando lo fai, il suono ti sembra che arrivi solamente dall'altoparlante più vicino?

Percepisci il suono come se provenisse dall'altoparlante più vicino perché il suono dal più vicino altoparlante raggiunge prima le tue orecchie, come nella **figura 12.21b**, in cui c'era un breve ritardo fra i suoni presentati dai due altoparlanti. Ma anche se senti il suono provenire dall'altoparlante più vicino, non significa che non sei consapevole del suono che proviene dall'altoparlante più lontano. Il suono dell'altoparlante più lontano cambia la qualità del suono che senti, fornendoti una qualità maggiore (Blauert, 1997; Yost & Guzman, 1996). Puoi dimostrare questo posizionando te stesso all'altoparlante a te più vicino con l'aiuto di un amico non connesso all'altoparlante. Quando ciò accade, noterai una differenza nella qualità del suono.

Acustica architettonale

Avendo risolto i problemi di orientamento per l'ascolto dei suoni nelle stanze, passiamo a considerare come le caratteristiche della stanza influenzino la qualità dei suoni che sentiamo. Studiando la percezione visiva, abbiamo visto che la nostra percezione della luce non dipende soltanto dalla natura della sua sorgente, ma altresì da quello che accade alla luce dal momento in cui lascia la sua sorgente a quello in cui raggiunge i nostri occhi. Quando la luce attraversa la foschia nel suo percorso da un oggetto ai nostri occhi, l'oggetto ha un aspetto più opaco o sfocato di quello che avrebbe se non ci fosse la foschia. In modo simile la nostra

percezione del suono non dipende soltanto dal suono prodotto al suo punto di origine, ma anche da come i suoni si riflettono sulle pareti e sulle altre superfici all'interno di una stanza.

L'acustica architettonale, lo studio di come i suoni si riflettono nelle stanze, riguarda profondamente come un suono indiretto cambi la qualità dei suoni che sentiamo in una stanza. I fattori più importanti che influenzano i suoni indiretti sono le dimensioni della stanza e la quantità di suono assorbita dalle pareti, dal soffitto e dal pavimento. Se il grosso del suono viene assorbito, ci sono pochi riflessi e tenui suoni indiretti. Un altro fattore che influenza il suono indiretto è la forma della stanza. Esso determina come il suono impatta sulle superfici e le direzioni nelle quali rimbalza.

La quantità e la durata del suono indiretto prodotto da una stanza è espressa in tempo di riverbero - il tempo che il suono impiega per diminuire di 1/1000 della sua pressione iniziale (o una decrescita di volume di 60 dB). Se il tempo di riverbero di una stanza è eccessivo, i suoni divengono caotici perché il loro riflesso persiste troppo a lungo. In casi estremi, come in cattedrali con pareti in pietra, questi ritardi sono percepiti come echi, e può essere difficile una precisa localizzazione della loro sorgente. Se il tempo di riverbero è troppo breve, la musica suona "morta", e diventa più complicato produrre suoni ad alta intensità.

L'acustica nelle sale concerto

A causa del rapporto tra tempo di riverbero e percezione, gli ingegneri acustici hanno provato a disegnare sale concerto il cui tempo di riverbero sia comparabile con quello di sale rinomate per la loro acustica, come la Symphony Hall di Boston o la Concertgebouw di Amsterdam, che hanno un tempo di riverbero di circa 2.0 secondi. Tuttavia un tempo di riverbero ideale non rimanda sempre a una buona acustica. Ciò è evidente nei problemi connessi con il progetto della New York's Philharmonic Hall. Quando fu inaugurata nel 1962, la Philharmonic Hall aveva un tempo di

riverbero vicino agli ideali 2.0 secondi. Anche così la sala fu criticata per la sua acustica, come se avesse un tempo di riverbero breve, e i musicisti dell'orchestra si lamentarono di non potersi sentire l'un l'altro. Queste criticità risultarono in una serie di interventi alla sala, messi in atto nel corso di molti anni, finché, non dimostrandosi soddisfacente alcuna di esse, l'intero interno della sala fu distrutto e la sala fu completamente ricostruita nel 1992. Ora si chiama Avery Fisher Hall. L'esperienza della Philharmonic Hall, in aggiunta a nuovi sviluppi nel campo dell'ingegneria acustica, ha portato gli ingegneri architettonici a considerare altri fattori oltre il tempo di riverbero nella progettualità delle sale concerto. Alcuni di questi fattori furono individuate da Leo Beranek (1996), che dimostrò che le seguenti misure fisiche sono associabili alla percezione della musica nelle sale concerto:

- tempo di familiarità: il tempo che intercorre tra quando il suono arriva direttamente dal palco e quando ne arriva il primo riverbero. Esso è correlato al riverbero, ma coinvolge la mera comparazione del tempo fra il suono diretto e il primo riverbero, piuttosto che il tempo necessario a molti riverberi per cessare.

- il rapporto dei bassi: il rapporto fra frequenze basse e medie che si riverberano sulle pareti e sulle altre superfici.

- fattore di spazialità: la porzione di tutto il suono ricevuto da un ascoltatore, che sia un suono indiretto.

Per determinare i valori ottimali per queste misurazioni fisiche, gli ingegneri acustici li hanno misurati in 20 teatri d'opera e in 25 sale sinfoniche in 14 paesi. Attraverso il confronto fra le loro misurazioni e le valutazioni delle sale espresse da direttori d'orchestra e critici musicali, hanno confermato che le migliori sale concerto hanno un tempo di riverbero di circa 2 secondi, ma hanno trovato che 1.5 secondi è meglio per le sale d'opera, con un tempo di riverbero più breve necessario a permettere al pubblico di sentire chiaramente la voce dei cantanti. Hanno inoltre compreso che un tempo di familiarità di circa 20 ms, un alto rapporto

dei bassi e un alto fattore di spazialità sono connessi a una buona acustica (Glanz 2000). Quando questi fattori furono accolti nella progettazione di nuove sale concerto, come la Walt Disney Concert Hall di Los Angeles, il risultato è stata un'acustica in grado di competere con le migliori sale concerto del mondo.

Nel progetto della Walt Disney Concert Hall, gli architetti si sono concentrati non solo su come forma, configurazione e materiali di pareti e soffitto potessero influenzare l'acustica, ma anche sulle proprietà di assorbimento acustico dei cuscini delle 2.273 poltroncine. Un problema che si presenta spesso nelle sale concerto è che l'acustica dipende dal numero di persone impegnate nella performance, perché il corpo umano assorbe il suono. Così, una sala con una buona acustica, se piena, può riverberare quando ci sono troppi posti vuoti. Per risolvere questo problema, ogni cuscino di ogni poltroncina è stato disegnato per avere la stessa proprietà di assorbimento acustico di una persona di stazza media. Ciò significa che la sala ha la stessa acustica sia quando è piena sia quando è vuota, ed è un grande vantaggio per i musicisti, che spesso provano in una sala vuota.

L'acustica nelle sale di lettura

Sebbene le performance acustiche in spazi affascinanti, come ad esempio le sale da concerto ricevono una grande attenzione, le acustiche spesso ricevono una scarsa attenzione per quanto riguarda il design di sale da lettura o classi.

Il tempo di riverbero ideale per una piccola classe va da 0.4 a 0.6 secondi, e per un auditorium invece va da 1.0 a 1.5 secondi.

Questi sono meno dei 2.0 secondi ottimali per le sale da concerto perché l'obiettivo non è quello di creare un intenso suono musicale, ma è quello di creare una condizione ambientale in cui gli studenti possono sentire cosa sta dicendo l'insegnante. Anche se il tempo di riverbero ideale per una classe è meno di 0.6 secondi, molte classi hanno un tempo di riverbero pari a 1 secondo o o poco più (Acoustical Society of America, 2000).

Ma le aule affrontano anche altri problemi. Mentre il suono principale presente in un sala da concerto è creato dai performers, spesso ci sono dei suoni in aggiunta a una lezione in classe.

Questi suoni, chiamati rumori di sottofondo, sono ad esempio: i rumori dei sistemi di ventilazione, gli studenti che chiacchierano in classe (quando gli si chiede di non farlo!), e rumori provenienti dalle sale e dalle classi vicine.

La presenza di rumori di sottofondo ha portato all'utilizzo del **rapporto segnale/rumore (S/N)** per la progettazione di classi.

Il S/N è il livello della voce dell'insegnante in dB senza il livello dei rumori di sottofondo nella stanza. Idealmente, il S/N va da +10 a +15 dB o più.

Abbassando il S/N, gli studenti potrebbero avere difficoltà a capire cosa sta dicendo l'insegnante.

Avendo considerato la provenienza dei suoni, e come possiamo creare il senso dei suoni anche quando essi rimbalzano nelle stanze, ora siamo pronti per comprendere il prossimo passaggio che riguarda come percepiamo i suoni nell'ambiente considerando come percettivamente organizziamo i suoni quando ci sono più fonti sonore.

Organizzazione acustica:

Analisi

La nostra discussione finora confonde sul luogo – da dove proviene un suono. Abbiamo visto che, rispetto alla visione, ogni oggetto in differenti luoghi dello spazio proietta immagini in diversi punti della retina, non vi è un'informazione spaziale sui recettori acustici. Invece, i sistemi acustici usano informazioni sonore differenti in livello e in tempo tra le due orecchie per localizzare i suoni. Aggiungiamo adesso una complicazione importante che si verifica costantemente nell'ambiente: molteplici fonti di suono.

Analisi del problema dell'udito

All'inizio del capitolo, abbiamo discusso una conversazione tra un uomo e una

donna, con della musica e altre persone che parlavano in sottofondo. La gamma di fonti sonore situate in diversi luoghi nell'ambiente è chiamata **scena uditiva**, e il processo in cui gli stimoli prodotti da ciascuna delle fonti vengono stimolati viene chiamato **analisi della scena uditiva** (Bregman, 1990, 1993; Darwin, 2010; Yost, 2001).

L'analisi della scena uditiva pose un problema difficile perché i suoni derivanti dalle diverse fonti si ricombinavano in un unico segnale acustico, è difficile perciò constatare quale parte del suono è creata da una parte del segnale solo guardando l'onda sonora dello stimolo. Possiamo meglio comprendere cosa intendiamo quando diciamo che i diversi suoni derivanti dalle diverse fonti vengono combinati in un unico segnale acustico considerando il trio nella **figura 12.22**. La chitarra, il cantante, e la tastiera creano il loro personale segnale sonoro, ma tutti i segnali entrano nell'orecchio dell'ascoltatore insieme a vengono combinati in una singola e complessa onda sonora.

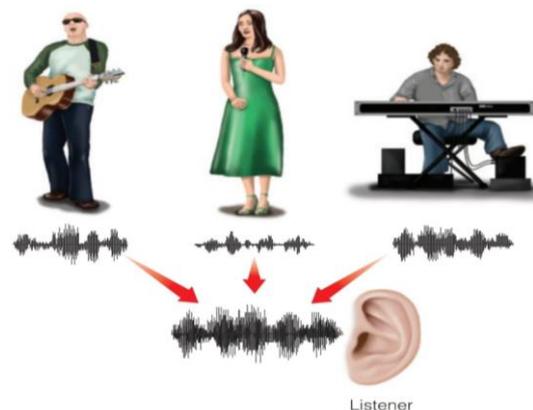


Figura 12.22 Ciascun musicista produce suoni simultanei, ma questi segnali vengono combinati in un unico segnale, che entra nell'orecchio

Ciascuna delle frequenze nel segnale causa una vibrazione della membrana di

base, ma come nel caso dell'uccello e del gatto nella Figura 12.2, nella quale non vi è un'informazione nella cochlea per localizzare i due suoni, non è ovvio che l'informazione debba contenere nel segnale acustico quale vibrazione viene creata da quale fonte sonora. **VL**

Separando le fonti

Come fanno i sistemi acustici a separare ciascuna frequenza dal segnale 'combinato' in informazioni che ci inibiscono dal percepire la chitarra, il cantante e la tastiera come fonti di suono separate? Nel capitolo 5, abbiamo posto un quesito analogo per la vista quando abbiamo chiesto come fanno i sistemi visivi a separare elementi di una scena in singoli oggetti.

Per la vista, abbiamo introdotto un numero di principi organizzativi, proposti dagli psicologi della Gestalt e altri, che si basano sulle proprietà degli stimoli visivi che si verificano nell'ambiente (vedi pagina 100). Ora, tornando al senso di udito, possiamo vedere una situazione simile verificarsi per gli stimoli uditivi. Ci sono dei principi che ci aiutano ad organizzare gli elementi percepiti in una scena acustica, e questi principi sono basati su come i suoni si organizzano nell'ambiente. Per esempio, se due suoni partono in due tempi diversi, dovranno per forza derivare da due fonti differenti.

Consideriamo ora diversi tipi di informazione per analizzare la scena acustica.

Luogo Un modo per analizzare la scena acustica nelle sue diverse componenti è quello di usare le informazioni rispetto a dove si trova la fonte. In questo modo, puoi separare il suono del cantante dal suono della chitarra basandoti sulla localizzazione come per ITD e ILD. Così,

quando i due suoni vengono separati nello spazio, lo spunto del luogo ci aiuta a percepirli separati. In aggiunta, quando una fonte si muove, tende a seguire un percorso continuo invece che saltare da un posto all'altro. Per esempio, il continuo movimento del suono ci aiuta a percepire il passaggio di una auto come generato da un'unica fonte.

Ma il fatto che anche le informazioni diverse per posizione siano coinvolte diventa ovvio se si considera che possiamo separare diversi suoni anche quando li sentiamo attraverso un altoparlante (o anche in un auricolare di un lettore musicale), perciò tutti i suoni provengono dallo stesso luogo (Litovsky,2012;Yost,1997).

Tempo d'inizio Come già menzionato, se due suoni partono in tempi diversi, è come se provenissero da diverse fonti. Questo si verifica spesso nell'ambiente, perché i suoni di diverse fonti raramente partono allo stesso tempo. Quando le componenti di un suono partono insieme, è come se fossero state create dalla stessa fonte (Shamma & Micheyl,2010; Shamma et al.,2011).

Intonazione e Timbro Suoni con lo stesso timbro o gamma d'intonazione sono spesso prodotti dalla stessa fonte. Per esempio, se stiamo ascoltando due strumenti con differenti gamme, come un flauto e un trombone, il timbro del flauto e del trombone rimane lo stesso non importa che note suonano.

(Il flauto continua a suonare come un flauto, e il trombone come un trombone.) Similarmente, il flauto tende a suonare in un'intonazione acuta, e il trombone in una grave.

I compositori usano gruppi di intonazioni simili da molto prima che gli psicologi iniziassero a studiarli. I compositori

durante il periodo Barocco (1600-1750) sapevano che un se un singolo strumento suonava note che alternava rapidamente suoni gravi e acuti, l'ascoltatore le percepiva come due melodie distinte, le note acute venivano percepite come suonate da un singolo strumento e quelle gravi da un altro. A eccezione della composizione di J.S. Bach che usava questo espediente illustrato nella **Figura 12.23**.



Figura 12.23 Le quattro misure di una composizione di J.S. Bach (Choral Prelude on Jesus Christus unser Helland, 1739). Quando vengono suonate rapidamente, la nota più acuta viene percepita raggruppata alla nota più grave e le note gravi vengono percepite come raggruppate, il fenomeno viene chiamato segregazione del flusso uditivo.

Quando questo passaggio veniva suonato rapidamente, le note gravi venivano percepite come suonate da uno strumento, e quelle acute venivano percepite come suonate da un altro strumento. Questa separazione di differenti fonti di suono in differenti flussi di percezione, chiamati *polifonia implicita* o *linea melodica composta* dagli artisti, viene chiamata **segregazione del flusso uditivo** dagli psicologi (Bregman, 1990, Darwin, 2010; Jones & Yee, 1993; Kondo & Kashino, 2009; Shamma & Micheyl, 2010; Yost & Sheft, 1993). Albert Bregman e Jeffrey Campbell (1971) dimostrarono che la segregazione del flusso uditivo si basava su l'intonazione alternata tra suoni acuti e gravi, come mostrato nella **Figura 12.24**.

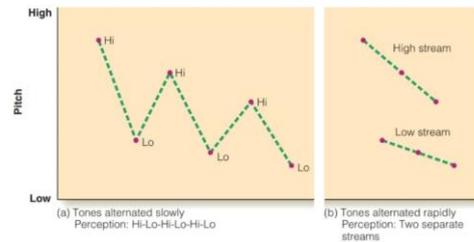


Figura 12.24 (a) Quando toni acuti e gravi vengono alternati lentamente, la segregazione del flusso uditivo non è accurata, perciò l'ascoltatore percepisce alternativamente toni acuti e gravi. (b) Alternamento veloce fa risultare la segregazione in un flusso acuto e grave.

Quando il tono acuto-intonato viene lentamente alternato con il tono grave-intonato, come nella **Figura 12.24a**, i toni vengono sentiti in un unico flusso, uno dopo l'altro: Ac-Gr-Ac-Gr-Ac-Gr, come indicato nel pentagramma. Ma quando i toni vengono alternati molto rapidamente, i toni acuti e gravi vengono percepiti in due flussi acustici; l'ascoltatore percepisce due flussi separati di suono, uno acuto-intonato e uno grave-intonato, che si verificano simultaneamente (**Figure 12.24b**) (vedi Heise & Miller, 1951, e Miller & Heise, 1950, per una rapida dimostrazione di segregazione del flusso uditivo). Questa dimostrazione mostra come la segregazione del flusso non dipende solo dall'intonazione ma anche dalla gamma che i toni presentano. Così, tornando alla composizione di Bach, i flussi acuto e grave vengono percepiti separati se vengono alternati rapidamente, ma non se vengono alternati lentamente.

Figura 12.25 illustra una dimostrazione di raggruppamento per similarità di toni in due flussi di suono percepiti come separati prima che i toni diventino simili. Un flusso è una serie di ripetizioni di note (rosso) e le altre, una scala che cresce (blu) (**Figura 12.25a**). **Figura 12.25b** mostra come

vengono percepiti gli stimoli se i toni vengono presentati velocemente.

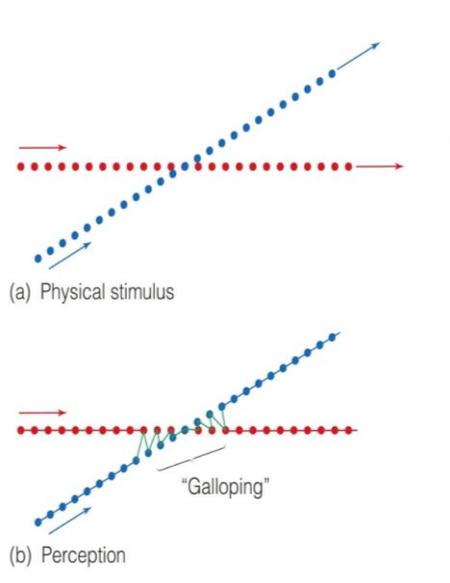


Figura 12.25 (a) Due sequenze di stimoli: una sequenza di note simili (rosse), e una scala (blu).(b) percezione di questi stimoli: flussi separati sono percepiti quando sono distanti in frequenza, ma i toni appaiono come salti da acuto a grave tra stimoli quando la frequenza appartiene alla stessa gamma.

All'inizio i due flussi sono separati, così l'ascoltatore percepisce simultaneamente le stesse note ripetute e una scala che cresce. Però, quando la frequenza dei due stimoli diventa simile, qualcosa di interessante accade. Si verifica un raggruppamento di toni simili, e la percezione cambia in un avanti-e-indietro 'al galoppo' tra toni di due flussi. Questo, come il crescendo della scala continua la separazione delle frequenze, le due sequenze ora sono di nuovo percepite come separate. **VL**

Un altro esempio di come la similarità tra toni causi un raggruppamento è l'effetto chiamato **la scala illusoria**, o **canalizzazione melodica**. Diana Deutsch (1975, 1996) dimostrò questo effetto presentando due sequenze di note simultaneamente attraverso delle cuffie,

una nell'orecchio destro e una nel sinistro (**Figura 12.26 a**). Da notare che le note presentate in ogni orecchio saltavano sopra e sotto e non creavano una scala. Comunque, l'ascoltatore di Deutsch's percepiva chiaramente ciascuna sequenza di note in ciascun orecchio, con quelle più acute nel destro e quelle più gravi nel sinistro (**Figura 12.26b**). Anche se in ogni orecchio ricevevano sia note acute che gravi, venivano raggruppato per similarità di intonazione i toni acuti a destra (che partivano con una nota acuta) e quelli gravi a sinistra (che partivano con una nota grave).

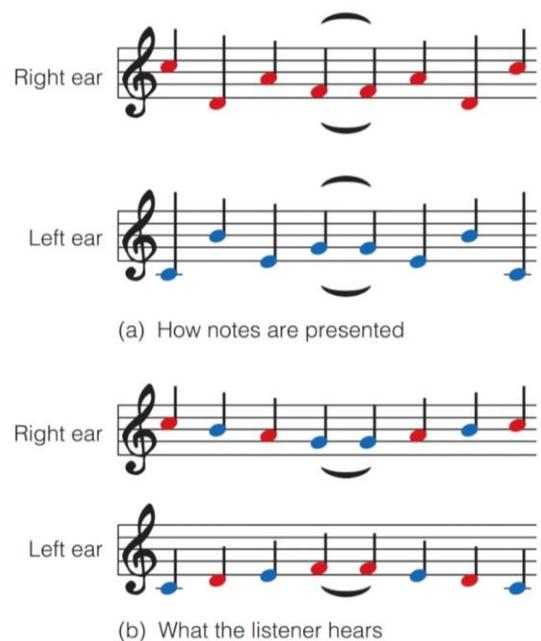


Figura 12.26 (a) Questi stimoli vengono presentati all'ascoltatore nell'orecchio sinistro (blu) e nel destro (rosso) nell'esperimento della scala illusoria di Deutsch (1975). Da notare come vengono presentate in ogni orecchio salti da acuto a grave delle note. (b)Sebbene le note in ogni orecchio saltano da acuto a grave, l'ascoltatore percepisce una sequenza lineare di note. Questo effetto è chiamato scala illusoria o canalizzazione melodica.

La scala illusoria mette in risalto un'importante proprietà di raggruppamento. La maggior parte del tempo, i principi del raggruppamento acustico ci aiuta a un'interpretazione accurata di cosa accade nell'ambiente. È

molto importante percepire come simili suoni che provengono dalla stessa fonte perché questo avviene nell'ambiente. Nell'esperimento di Deutsch, il sistema percettivo applica il principio di raggruppamento per similarità come per gli stimoli artificiali presentati attraverso le cuffie e assegnano in modo errato toni simili allo stesso orecchio. Ma, la maggior parte delle volte, quando gli psicologi non controllano gli stimoli, suoni con simili frequenze tendono a essere prodotte dalla stessa fonte sonora, perciò il sistema uditivo è di solito giusto nell'utilizzare il tono per determinare da dove proviene il suono.

Continuità acustica Suoni che sono costanti o cambiano linearmente sono spesso prodotti dalla stessa fonte. Questa proprietà del suono guida verso un principio che assomiglia al principio della Gestalt di buona continuazione per la vista (vedi capitolo 5, page 102). Stimoli di suono con la stessa frequenza o con cambiamenti lineari di frequenza vengono percepiti con altri stimoli (Deutsch, 1999).

VL

Richard Warren e i suoi collaboratori (1972) dimostrarono una continuità acustica presentando scoppi di tono interrotti da lacune di silenzio (**Figura 12.27 a**). Gli ascoltatori percepivano questi toni come fermi durante il silenzio. Ma quando Warren riempì la lacuna con del rumore (**Figura 12.27b**), gli ascoltatori percepivano i toni come continui sotto il rumore (**Figura 12.27c**).

- (a) I toni sonori sono separati dal silenzio
- (b) Il silenzio viene riempito col rumore
- (c) Percezione di b: i toni appaiono continui sotto il rumore.

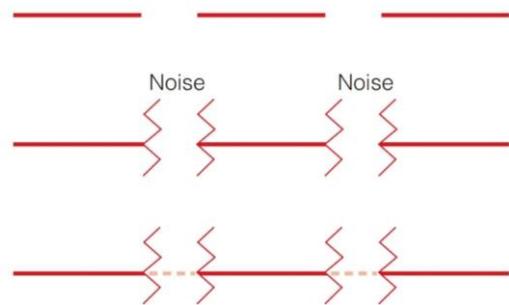


Figura 12.27 Una dimostrazione della continuità uditiva, usando toni.

Questa dimostrazione è alla dimostrazione della buona continuazione della vista illustrata dalla corda arrotolata nella Figura 5.17.

Come l'arrotolamento viene percepito come continuo anche quando questo è coperto da un'altra corda arrotolata, un tono viene percepito come continuo anche quando viene interrotto dal rumore.

Esperienza L'effetto dell'esperienza passata sul raggruppamento percettivo di stimoli acustici può essere dimostrato dalla presentazione di una melodia di una canzone familiare, come in **Figura 12.28 a**.



Figura 12.28 'Three Blind Mice.' (a) Saltando di ottava. (b) Versione normale.

Queste sono le note della canzone "Three Blind Mice", ma con le note che saltano da un'ottava a un'altra. Quando le persone sentono per la prima volta queste note, trovano difficile identificare la canzone. Ma una volta che hanno sentito la canzone come era stato pensato di essere suonato

(Figura 12.28b), possono seguire la melodia nella versione salto-ottava mostrato in Figura 12.28 a. **VL**

Questo è un esempio di un'operazione di **schema melodico** – una rappresentazione di una melodia familiare che si instaura nella memoria della persona. Quando le persone non sanno che tale melodia è presente, non hanno accesso allo schema e non hanno niente con cui comparare la melodia sconosciuta. Ma quando sanno che la melodia è presente, comparano quello che hanno sentito con il loro schema e percepiscono la melodia (Deutsch, 1999; Dowling & Harwood, 1986).

Ciascuno dei principi del raggruppamento uditivo che abbiamo descritto fornisce informazioni sul numero e identifica la fonte nell'ambiente uditivo. Ma ciascun principio da solo non è infallibile, e basa le nostre percezioni in un unico principio che guida ad un errore- come nel caso della scala illusoria, che è volutamente organizzata in modo che toni simili dominano le nostre percezioni. Nella maggior parte delle situazioni reali, basiamo la nostra percezione in un numero di questi spunti che lavorano insieme. Questo è simile alla situazione che abbiamo descritto per la percezione visiva, dove la nostra percezione degli oggetti dipendeva dal numero di principi organizzativi che lavoravano insieme, e la nostra percezione della profondità dipende dal numero di spunti di profondità che lavorano insieme. L'organizzazione acustica che abbiamo descritto coinvolge la separazione di fonti sonore diverse. Ma il suono può anche essere organizzato in un altro modo, come una sequenza di toni che vengono organizzati in termini di ritmo e di metrica.

Organizzazione uditiva: metro di percezione

Immagina la prima riga del The Star-Spangled Banner: "Oh say can you see, by the dawn's early light.". Metti queste

parole nella musica nella tua mente creando un modello temporale di toni, comincia con due brevi note (Oh-oh), seguite da tre note più lunghe (say, can, you), poi una nota sostenuta (see), e così via. La linea blu sopra la notazione musicale nella **Figura 12.29** indica questo modello temporale. Questa serie di cambiamenti nel tempo è chiamato **modello ritmico**. Diversi cantanti potrebbero cambiare il modello ritmico tenendo alcune note più lunghe, facendo altre più corte, o aggiungendo pause. Così, ogni canzone o pezzo strumentale ha il suo modello ritmico, che dipende da come la canzone è scritta e da come viene eseguita.

C'è un altro, più regolare, elemento del tempo musicale che sta alla base modello ritmico, chiamato battuta. Quando batti il tuo piede sulla musica stai battendo il ritmo. Le battute sottostanti alla musica, chiamate **struttura metrica**, sono indicate dalle frecce rosse sotto il The Star-Spangled Banner nella Figura 12.29. Si noti che la struttura metrica non è la stessa cosa delle note o del modello ritmico, perché tu puoi sentire la battuta anche se ci sono pause nel suono durante la canzone.

Due comuni metri sono duplici (rappresentato nella notazione musicale con un tempo di 2/4, che indica che ci sono due battiti per misura, come in una marcia) e triple (rappresentato con un tempo di 3/4, che indica che ci sono tre battiti per misura come si accade in un valzer). Anche se non un valzer, The Star-Spangled Banner è in un metro triplo, come indicato dalle frecce rosse sotto la musica nella Figura 12.29.

Abbiamo già visto come suoni diversi possono essere organizzati in scene uditive, con il raggruppamento basato su fattori come la somiglianza dell'intonazione o la prossimità nel tempo. Adesso noi consideriamo un altro aspetto dell'organizzazione uditiva: come le persone percepiscono la struttura metrica delle sequenze di toni. Noi vedremo che la ricerca usando semplici stringhe di toni ha aggiunto un'altra dimensione alla nostra comprensione della organizzazione uditiva.

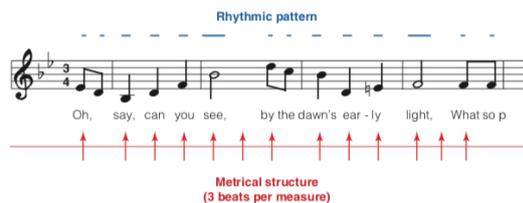


Figure 12.29 Prima riga del The Star-Spangled Banner. Il modello ritmico (le serie di cambiamenti nel tempo) è indicato dalle linee blu orizzontali. La struttura metrica (le battute sottostanti alla musica, determinate dal tempo) è indicata dalle frecce rosse. Quando il pezzo viene eseguito, c'è un'uguale quantità di tempo tra i battiti.

Struttura metrica e la mente

La struttura metrica è indicata dal tempo della composizione e, in termini di prestazioni, è tipicamente ottenuto accentuando alcune note usando un attacco più forte o suonandole più forte o più a lungo. Nel fare questo, i musicisti portano un'espressività alla musica al di là di quello che viene ascoltato semplicemente suonando una serie di note.

Ma la struttura metrica può anche essere ottenuta in altri modi, e questo è quello che ci interessa, perchè ricerche su come percepiamo la struttura metrica ha qualcosa da dirci sui meccanismi dell'organizzazione uditiva. Per esempio, noi spesso spontaneamente formiamo gruppi percettivi quando ascoltiamo il ritmo del metronomo. Così, nonostante il metronomo crei una serie di battiti identici con spaziature regolari, noi possiamo percepire i battiti nel doppio metro (TICK-toc) o, con un piccolo sforzo, in triplo metro (TICK-toc-toc) (Nozaradan et al., 2011).

Questa abilità di cambiare la struttura metrica anche quando lo stimolo fisico rimane lo stesso è simile a quello che succede per il display visivo faccia-vaso nella Figura 5.25. In questo caso, il display rimane lo stesso, ma la percezione può spostarsi indietro e avanti tra vedere due facce o un vaso. Sia il battito uditivo regolare che il modello faccia-vaso sono esempi di *stimoli ambigui*, perchè possono essere percepiti in più di un modo.

Proprio come i ricercatori visivi hanno usato un display visivo ambiguo per

studiare i meccanismi della percezione visiva, ricercatori uditivi hanno usato stimoli di battiti ambigui ripetuti per studiare i meccanismi della percezione uditiva. Una delle scoperte che sono emerse da questa ricerca è che c'è un collegamento tra la percezione della struttura metrica e il movimento.

Struttura metrica e movimento

Musica e movimento vanno insieme. Noi battiamo, oscilliamo, o danziamo a tempo con il ritmo, e questi movimenti possono riflettere la struttura metrica della musica, come quando i ballerini incorporano il raggruppamento uno-due-tre di un valzer nel loro gioco di gambe. Però, la relazione tra movimento e il ritmo si verifica anche in un'altra direzione, con il movimento che influenza il raggruppamento percettivo o la struttura metrica dei battiti. Esperimenti che hanno dimostrato questo sono stati effettuati sia con adulti che con neonati, quindi noi li descriveremo insieme piuttosto che descrivere la ricerca infantile in una sezione separata "Dimensione dello sviluppo" alla fine del capitolo. L'idea che il modo in cui ci muoviamo possa influenzare come sentiamo i modelli ritmici è stato prima dimostrato da Jessica Phillips-Silver e Laurel Trainor (2005) in neonati di 7 mesi. Mentre questi neonati ascoltavano un ambiguo ritmo regolare e ripetitivo che non aveva accenti, loro sono stati rimbalzati su e giù tra le braccia dello sperimentatore. Questi rimbalzi si sono verificati sia in un modello doppio (un rimbalzo su ogni secondo battito) o in un modello triplo (un rimbalzo su ogni terzo battito). Dopo essere stato rimbalzato per 2 minuti, i neonati sono stati testati per determinare se questo movimento ha causato loro di sentire il modello ambiguo nei gruppi di due o nei gruppi di tre. Per fare questo, i neonati venivano testati per determinare se loro preferivano ascoltare il modello con gli accenti che corrispondevano a come loro erano stati rimbalzati. Questa preferenza è stata determinata usando una procedura preferenziale nel girare la testa. Phillips-Silver e Trainor hanno scoperto che i neonati ascoltavano il modello con cui loro erano stati rimbalzati in media 8

secondi ma ascoltavano l'altro modello in media solo per 6 secondi. I neonati perciò preferivano il modello con cui loro erano stati rimbalzati. Per determinare se questo effetto era dovuto alla visione, i neonati venivano rimbalzati mentre erano bendati. (Sebbene ai neonati piace essere rimbalzati, loro non erano così entusiasti di essere bendati!). I risultati, quando sono stati testati in seguito utilizzando la procedura nel girare la testa, erano gli stessi di quando loro potevano vedere, indicando che la visione non era un fattore. Anche, quando gli infanti solamente vedevano lo sperimentatore rimbalzare, l'effetto non si è verificato. Apparentemente *muoversi* è la chiave per influenzare il raggruppamento metrico.

In un altro esperimento, Phillips-Silver e Trainor (2007) testarono adulti. In questo caso, lo sperimentatore non ha tenuto il soggetto, ma lo sperimentatore e il soggetto si tenevano per mano e saltavano insieme. Dopo aver saltato con lo sperimentatore, gli adulti sono stati testati nell'ascoltare i modelli doppio e triplo e indicarono quale modello loro avevano sentito mentre saltavano. Gli adulti hanno scelto il modello che corrispondeva al modo in cui loro avevano saltato nell'86 per cento delle prove. Come con i neonati, questo risultato è stato verificato anche quando gli adulti erano bendati, ma non quando loro solo vedevano lo sperimentatore saltare. Ricorda che durante l'esperienza di saltare gli adulti stavano ascoltando un ambiguo modello di ritmo, ma quando testati, loro riportarono che loro avevano ascoltato, o percepito, i toni raggruppati in base a come erano saltati.

Basandosi sui risultati di questo e degli altri esperimenti, Phillips-Silver e Trainor conclusero che il fattore cruciale che induce il movimento a influenzare la percezione della struttura metrica è la stimolazione del **sistema vestibolare**: il sistema che è responsabile per l'equilibrio e il senso di posizione del corpo. Per verificare questa idea, Trainor e collaboratori (2009) hanno fatto ascoltare ad adulti un ambigua serie di battute mentre stimolavano elettricamente il loro sistema vestibolare in un modello doppio o triplo con elettrodi posizionati dietro

l'orecchio. Questo ha fatto sentire il soggetto come se la sua testa si muovesse indietro e avanti, anche se è rimasto fermo. Questo esperimento ha duplicato i risultati degli altri esperimenti, con soggetti che hanno riportato di aver sentito il modello che corrisponde al raggruppamento metrico creato dalla stimolazione del sistema vestibolare nel 78 per cento delle prove.

Metodo

Procedura preferenziale nel girare la testa
Nella tecnica della preferenza, un neonato seduto sulle ginocchia della madre ha la sua attenzione diretta a una luce lampeggiante che illumina un display visivo. Quando il neonato guarda la luce, essa rimane accesa e l'infante ascolta un suono ripetuto, il quale è accentato per creare un modello doppio o triplo. Il neonato ascolta uno di questi modelli finché continua a guardare la luce. Quando il neonato guarda altrove, il suono si spegne. Questo è fatto per un numero di prove, e l'infante impara velocemente che guardare la luce mantiene il suono acceso. Così la domanda se il neonato preferisce il modello doppio o triplo può essere risposta determinando quale suono il neonato ascolta più a lungo.

Struttura metrica e linguaggio

La percezione del metro si verifica non solo in risposta al movimento ma anche sotto l'influenza di un'esperienza a lungo termine: i modelli di accenti del linguaggio di una persona. Differenti lingue hanno differenti modelli di accenti, a causa del modo in cui le lingue sono costruite. Per esempio, in inglese, le parole di funzione come "the", "a" e "to" precedono tipicamente le parole di contenuto, come in "the *dog*" o "to *eat*", dove *dog* e *eat* sono accentate quando si parla. In contrasto, i parlanti giapponesi posizionano le parole di funzione dopo le parole di contenuto, così "the *book*" in inglese (con *book* accentato) diventa "*hon ga*" in giapponese (con *hon* accentato). Perciò, il modello di accenti dominante in inglese è *corto-lungo* (*non accentato-accentato*), ma in giapponese è

lungo-corto (accentato-non accentato).

Il confronto di come i nativi parlanti inglese e parlanti giapponese percepiscano il raggruppamento metrico supporta l'idea che i modelli degli accenti nel linguaggio di una persona possono influenzare la percezione di raggruppamento di una persona, John Iversen e Aniruddh Patel (2008) avevano soggetti che ascoltavano una sequenza di toni alternativamente lungo e corto (**Figura 12.30a**) e dopo indicavano se loro avevano percepito il raggruppamento di toni come lungo-corto o corto-lungo. I risultati hanno indicato che i parlanti inglese erano più propensi a percepire il raggruppamento come corto-lungo (**Figura 12.30b**) e i parlanti giapponesi erano più propensi a percepire il raggruppamento come lungo-corto (**Figura 12.30c**).

Questo risultato si verifica anche quando si confrontano bambini dai 7 agli 8 mesi inglesi e giapponesi (vedere la procedura preferenziale nel girare la testa descritta in precedenza), ma non si verifica per i bambini dai 5 ai 8 mesi di età (Yoshida et al., 2010). E' stato ipotizzato che questo passaggio si verifichi circa tra i 6 e gli 8 mesi perchè è quando i bambini iniziano a sviluppare la capacità di linguaggio.

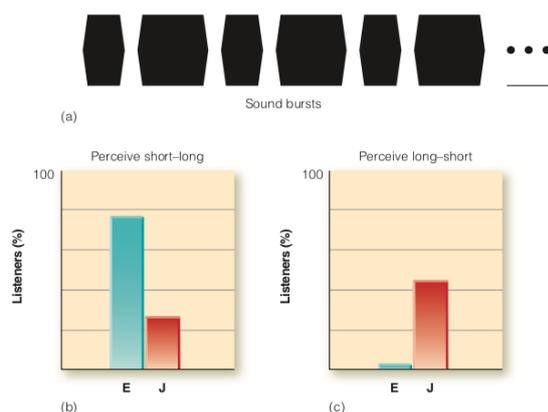


Figura 12.30 (a) I soggetti ascoltano una sequenza di toni corti e lunghi. In metà delle prove, il primo tono era corto; nell'altra metà, lungo. La durata dei toni variava da circa 150 ms a 500 ms (durate varie per le diverse condizioni sperimentali), e l'intera sequenza ripetuta per 5 secondi. (b) Soggetti di lingua inglese (E) erano più propensi rispetto soggetti di lingua giapponese (J) a percepire lo stimolo come corto-lungo. (c) Soggetti di lingua giapponese erano più propensi rispetto soggetti di lingua inglese a percepire lo stimolo come lungo-corto.

Tornare alla caffetteria

La scena nella caffetteria descritta nella Figura 12.1 aveva introdotto un numero di problemi per il sistema uditivo da risolvere. Il primo problema era il *problema della localizzazione uditiva*: Da dove provengono tutti i suoni che si sentono nella caffetteria? Noi abbiamo visto che una soluzione a questo problema comporta confrontare i suoni che raggiungono l'orecchio sinistro e destro, e un'altra soluzione comporta usare segnali spettrali.

Il secondo problema era come avere a che fare con il suono riflesso da superfici come i muri di una stanza. Questo è un problema perchè queste riflessioni creano più copie del suono da una singola fonte che raggiunge l'ascoltatore in momenti diversi. Questo problema è risolto da un meccanismo che crea l'*effetto di precedenza*, che fa sì che il sistema uditivo dia preferenza al primo suono che arriva.

Il terzo problema, il problema dell'*analisi della scena uditiva*, si verifica perchè tutti i suoni nell'ambiente sono combinati, come illustrato per il trio in Figura 12.22. Questo è un problema per l'organizzazione percettiva, perchè l'obiettivo è di separare il suono creato da ciascuna fonte da questo segnale combinato. Il sistema uditivo risolve questo problema usando un numero di segnali diverso, come la posizione, tempistica, tono, continuità ed esperienza per separare le singole fonti. Finalmente, c'è il problema delle sequenze di suoni in corso nel tempo, che creano un battito specifico o "segnatura del tempo" che organizza la musica proveniente dagli altoparlanti della caffetteria. La ricerca che abbiamo descritto sulla struttura metrica mostra che le persone possono spostarsi da un metro ad un altro mentalmente, e anche che il metro può essere influenzato da informazioni fornite esperienze passate con un particolare linguaggio (come dimostrato comparando parlanti inglesi e giapponesi) o informazioni da un'altra modalità, come il movimento (come dimostrato dall'esperimento del rimbalzo).

Il collegamento tra movimento e il metro

di percezione è significativo non solo perchè esso dimostra un meccanismo che influenza come noi organizziamo percettivamente il suono nel tempo, ma anche perchè esso fornisce un esempio di interferenza tra l'udito e il sistema motorio. Questa interferenza è collegata ad un altro problema che il sistema uditivo deve risolvere: come integrare la nostra percezione del suono con la percezione di tutti gli altri tipi di stimoli che esistono nell'ambiente per creare una percezione di un mondo coerente. Dopo tutto, la caffetteria, o qualsiasi ambiente, contiene non solo "suoni" o "stimoli visivi" o "movimenti" o "odori" o "gusti". Tutte queste cose si verificano insieme e sono spesso collegate. Nella prossima sezione, considereremo alcuni esempi di interferenza tra udito e visione.

CONNESSIONE TRA UDITO E VISIONE

I sensi differenti raramente operano in modo indipendente. Per l'udito, non solo c'è una connessione tra percezione del ritmo musicale e movimento, ma ci sono molti esempi di connessione tra questo e gli altri sensi. Noi guardiamo le labbra delle persone muoversi mentre le ascoltiamo parlare; le nostre dita "sentono" i tasti di un pianoforte mentre ascoltiamo la musica che le dita stesse stanno creando; sentiamo un suono stridulo e ci giriamo per vedere un'auto che si ferma all'improvviso. Tutte queste combinazioni di udito e altri sensi sono esempi di **interazioni multisensoriali**. Ci concentreremo sulle interazioni tra udito e visione, prima percettivamente e poi fisiologicamente.

UDITO E VISIONE: PERCEZIONI

Un'area di ricerca multisensoriale riguarda il "dominare" di un senso su un altro. Se ci chiedessimo quale tra visione o udito è dominante, la risposta sarebbe "dipende".

L'effetto del ventriloquo, o cattura visiva, è un esempio di visione che domina l'udito. Questo succede quando i suoni provenienti da un punto (la bocca del ventriloquo) sembrano provenire da un altro punto (la bocca del manichino). Il movimento della bocca del manichino "cattura" il suono (Soto-Faraco et al., 2002, 2004).

Un altro esempio di acquisizione visiva si verifica nei film quando il dialogo di un attore è prodotto da un "speaker located" (altoparlante) su un lato dello schermo mentre l'immagine dell'attore che sta parlando è localizzata al centro dello schermo, ad alcuni metri di distanza. Quando questo accade, sentiamo il suono arrivare dalla sua posizione visibile (l'immagine al centro dello schermo) anziché da dove viene effettivamente prodotto (l'altoparlante sul lato dello schermo). In questi esempi, il suono, anche se in realtà proviene da un'altra posizione, è catturato dalla visione. Si segnala che praticamente tutti i teatri ora hanno un suono stereofonico, segnali binaurali contribuiscono al match tra la posizione del suono e i personaggi sullo schermo. Ma prima dell'avvento del suono stereofonico, l'effetto del ventriloquismo ha indotto gli spettatori a percepire il suono come provenire da differenti punti sullo schermo piuttosto che dai lati. Ma la visione non sempre vince sull'udito. Si consideri, ad esempio, **l'illusione di due flash**, che si verifica quando un singolo flash è accompagnato da due toni e il soggetto ne percepisce due. (**Figure 12.31**) (Shams et al., 2000). In questo caso l'udito modifica la visione.

Un'altra illustrazione della connessione uditivo-visuale è mostrata nella figura 12.32. Robert Sekuler e collaboratori (1997) presentarono un display animato che mostrava due oggetti identici che si muovevano in diagonale, uno in basso partendo dalla sinistra e

l'altro in basso partendo dalla destra, passando per il mezzo.

L'88% degli osservatori di Sekuler percepiva questi oggetti come muoversi l'uno rispetto all'altro continuando il movimento rettilineo, come mostrato in figura **12.32a**. Il restante 12% degli osservatori percepiva gli oggetti come se si scontrassero l'uno con l'altro, rimbalzando in direzioni opposte, come mostrato nella figura **12.32b**.

Tuttavia, quando Sekuler aggiunse un breve "click" come suono, proprio quando gli oggetti apparivano adiacenti l'uno all'altro, il 63% li percepiva come in collisione e rimbalzanti in direzioni opposte.

Come nel caso dell'acquisizione visiva, in cui la visione ha influenzato l'udito, questo esempio, dove l'udito ha influenzato la visione, riflette anche il modo in cui noi normalmente percepiamo gli eventi nell'ambiente.

Quando si verifica un suono, proprio come due oggetti che in movimento diventano adiacenti l'un l'altro, di solito significa che si è verificata una collisione; che appunto ha causato il suono (vedi anche Ecker & Heller, 2005).

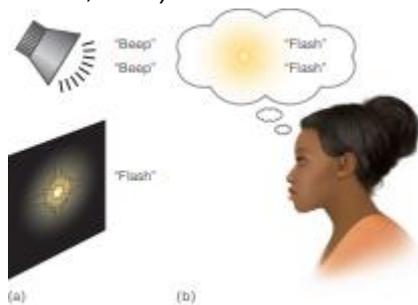


Figura 12.31 (a): stimolo per l'illusione a due flash. Un flash di luce è accompagnato da due toni. **(b)** l'illusione si verifica quando il soggetto percepisce i due flashes di luce, anche se ce n'era solo uno.

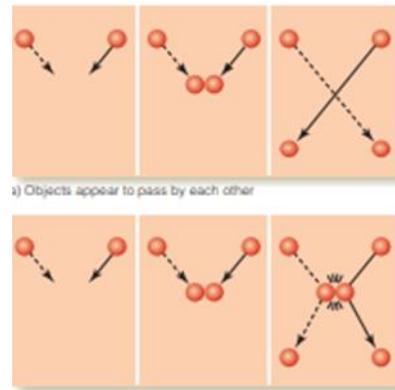


Figura 12.32 : le due condizioni nell'esperimento di Sekuler nel 1997 mostrano le posizioni successive di due palle che sono state presentate in modo da sembrare in movimento. **(a)** condizioni di nessun suono: le due palle erano percepite come se passassero l'una sull'altra e continuassero a muoversi in linea retta. **(b)** condizione di aggiunta di un click: gli osservatori erano più propensi a vedere scontrarsi le palle.

UDITO E VISIONE: FISILOGIA

La natura multisensoriale della nostra esperienza è riflessa nell'interconnessione delle diverse aree sensoriali del cervello, rappresentato in **Figura 12.33** (Murray & Spierer, 2011).

Queste connessioni tra aree sensoriali contribuiscono a coordinare campi recettivi (RFs) come quelli mostrati nella **Figura 12.34** per un neurone nel lobo parietale della scimmia che risponde sia agli stimoli visivi che al suono (Bremmer, 2011; Schlack, 2005).

Questo neurone risponde quando uno stimolo uditivo è presentato in un'area che si trova al di sotto del livello degli occhi e a sinistra (Figura 12.34a) e quando uno stimolo visivo proviene da circa la stessa area (**Figura 12.34b**).

La **Figura 12.34c** mostra che c'è una grande quantità di sovrapposizione tra questi due campi recettivi.

E' facile vedere che neuroni come questo sarebbero utili nel nostro ambiente multisensoriale. Quando sentiamo un suono provenire da una posizione specifica nello spazio e vediamo anche che cosa lo produce - un uccello che canta o una persona che parla - i neuroni

multisensoriali che si attivano sia al suono che alla visione aiutano a formare una singola rappresentazione dello spazio che coinvolge stimoli uditivi e visivi.

Un altro esempio di “cross-talk” tra i sensi avviene quando l’area di ricezione primaria associata ad un senso è attivata da stimoli che sono, di solito, associati con un altro senso. Per esempio, alcuni non vedenti utilizzano una tecnica chiamata ecolocalizzazione per individuare oggetti e percepire forme nell’ambiente.

La loro tecnica è simile all’ ecolocalizzazione usata dai pipistrelli e dai delfini, i quali emettono suoni ad alta frequenza e usano le informazioni dagli echi riflessi indietro dagli oggetti per percepire le forme e le posizioni degli oggetti(vedi **Figura 10.47, pagina 254**).

I non vedenti emettono un suono simile ad un click con la loro lingua e la loro bocca e ascoltano gli echi. Abili ecolocalizzatori possono rilevare la posizione e la forma degli oggetti mentre si muovono attraverso l’ambiente. Per esempio, una persona che utilizza l’ecolocalizzazione può rilevare un muro mentre cammina verso di esso; ancor più impressionante, gli ecolocalizzatori estremamente abili possono identificare oggetti come macchine, grandi bidoni della spazzatura, e idranti mentre camminano lungo il marciapiede(vedi www.worldaccessfortheblind.org).

Recentemente, Lore Thaler e collaboratori(2011) hanno visto due esperti ecolocalizzatori che hanno creato i loro click come suoni mentre stavano vicino agli oggetti, registrando il suono e gli echi risultanti con un piccolo microfono posto nelle orecchie. La domanda a cui Thaler e collaboratori erano interessati era: come questi suoni avrebbero attivato il cervello? Per determinare questo, loro hanno registrato l’attività del cervello usando fMRI mentre gli esperti ecologi e i soggetti a controllo visivo ascoltavano i

suoni registrati, i quali includevano gli echi.

Non sorprendentemente, trovarono che i suoni attivavano la corteccia uditiva sia ai ciechi che ai soggetti vedenti. Comunque, la corteccia visiva era fortemente attivata negli ecologi ma non nei soggetti di controllo (**Figura 12.35**).

Apparentemente, l’area visiva è attivata perché le ecolocalizzazioni stanno avendo esperienze che vengono descritte come esperienze “spaziali”. In effetti, alcuni ecolocalizzatori perdono la loro consapevolezza dei click auditivi mentre sono concentrati su informazioni spaziali fornite dagli echi(Kish,2012). Questo esempio di funzionamento multisensoriale mostra che la risposta del cervello può essere basata non solo sul tipo di energia che entra negli occhi o nelle orecchie ma anche sul risultato percettivo di quell’energia. Quindi, quando il suono è utilizzato per raggiungere la consapevolezza spaziale, la corteccia visiva viene coinvolta.

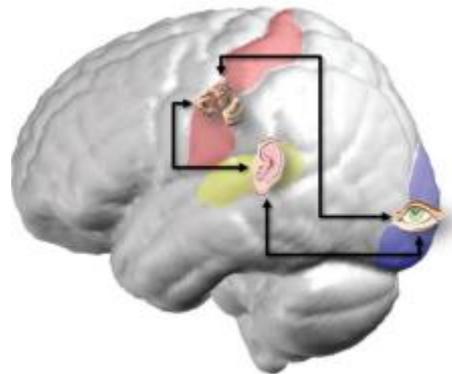


Figura 12.33 ci sono connessioni tra l’area di ricezione primaria per la visione, l’udito e la sensazione somatosensoriale (tocco, dolore). Queste connessioni creano interazioni tra i sensi.

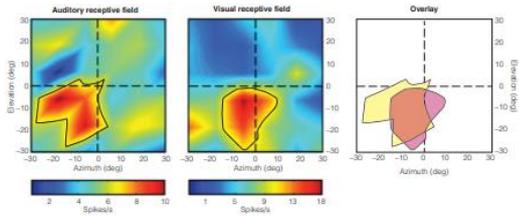
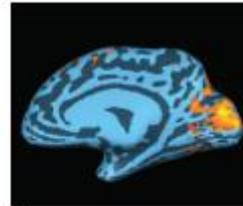


Figura 12.34 campi ricettivi di neuroni nel lobo parietale della scimmia che rispondono a **(a)** stimoli uditivi che si trovano nell'area inferiore-sinistra dello spazio, e **(b)** stimoli visivi presentati nell'area inferiore-sinistra del campo visivo della scimmia. **(c)** La sovrapposizione dei due campi ricettivi indica che c'è un alto livello (di sovrapposizione) tra i campi uditivi e visivi.



(a)



(b)

Figura 12.35 (a) Attività cerebrale di un soggetto non vedente che ascolta stimoli sonori. L'attività mostrata qui è l'attività generata da uno stimolo che conteneva echi, meno l'attività dello stesso stimolo senza echi. Poiché la corteccia uditiva è stata attivata in entrambe queste condizioni, nessuna attivazione della corteccia è mostrata. Comunque, ascoltando lo stimolo dell'eco è risultata un'attività nella corteccia visiva, mostrata qui. **(b)** Attività per un soggetto vedente che ascolta lo stesso stimolo. L'attivazione con e senza echi era la stessa, quindi nessuna attività è mostrata.