

La neurofisiologia dell'udito e del linguaggio

D. Farneti, E. Genovese, E. Arslan

È possibile iniziare la trattazione del capitolo facendo due semplici considerazioni. La prima è che un bambino normodotato nasce con una funzione cocleare pressoché matura. Tale funzione è così raffinata che, in termini psicoacustici, la soglia uditiva è espressa da 0 dB. Cioè potenzialmente il neonato è in grado di reagire a stimoli acustici appena percepibili. La seconda considerazione deriva dalla valutazione del significato biologico che il linguaggio ha nella nostra specie. In senso evuzionistico la selezione dell'*Homo Sapiens* sulle altre specie può essere attribuita alla sua capacità di utilizzare un codice comunicativo veicolato da suoni modulati da organi del proprio corpo (Hauser et al 2002). Tale capacità è stata supportata da un equivalente sviluppo degli organi che a vario titolo intervengono in tale scambio informativo ma soprattutto dalle strutture nervose che ad essa sottendono.

Il bambino, quindi, ha geneticamente determinata la capacità di sviluppare un linguaggio verbale, capacità che pur richiede, per svilupparsi armonicamente, un'esposizione ambientale adeguata: l'acquisizione del linguaggio, da parte del bambino, richiede che esso venga esposto alla lingua e l'apprendimento è esperenziale. Questa capacità, si diceva pocanzi, è innata: fra tutti i suoni cui il bambino è esposto dalle prime ore dopo la nascita, egli è in grado di riconoscere e concentrarsi, su quelli che hanno una valenza linguistica. Tale riconoscimento, entro i primi 6-8 mesi, avviene senza interferenze linguistiche e solo successivamente con modalità linguo-specifica.

Questa capacità è alla base dei meccanismi della percezione verbale, intesa come meccanismo complesso e delicato che coinvolge molteplici strutture e pool neurali del sistema nervoso centrale. Questa complessità è alla base della efficienza del processo comunicativo, fondato sulla ridondanza di circuiti neurali impiegati nei meccanismi percettivi ma è anche il motivo della frequente e iniziale compromissione della percezione verbale nelle patologie del sistema uditivo. Qualsiasi compromissione uditiva costituisce un grave problema per un bambino quando influisce sulle sue capacità comunicative. Gli effetti provocati da una perdita uditiva neurosensoriale sulla percezione verbale sono riconducibili alle minori abilità dell'ascoltatore nell'analizzare i tratti acustici caratteristici del linguaggio.

La mancata esposizione a suoni linguistici, come può aversi in condizione di malfunzionamento del recettore cocleare o inadeguatezze socio-culturali, provoca una condizione di deprivazione sensoriale nel sistema nervoso centrale. Per deprivazione si intende la mancata organizzazione neurale dell'analizzatore centrale, ai vari livelli, fino alla corteccia. La mancata organizzazione implica modificazioni nella struttura neurale e nelle sinapsi che diventano sempre meno reversibili dopo il periodo di plasticità e di organizzazione del SNC del bambino. In altre parole l'ingresso sensoriale funge da modulatore e da regolatore dello sviluppo dell'analizzatore centrale, che si organizza attorno alle informazioni acustiche e agli impulsi neurali che provengono dalla periferia. Per il sistema uditivo, in particolare, se viene a mancare il reattivo sensoriale linguistico, non si svilupperà o si svilupperà in modo inadeguato, anche l'analizzatore linguistico. Vi sono dimostrazioni sperimentali molto evidenti della deprivazione uditiva, che comporta la mancata organizzazione tonotopica delle stazioni intermedie della via uditiva, nuclei, collicolo inferiore e corpo genicolato mediale, e soprattutto della corteccia uditiva primaria e secondaria (Harrison, 1993; Salvi, 2000) e il mancato sviluppo delle strutture sottocorticali deputate alla fusione del messaggio proveniente dalle due orecchie (King 2001). In questi termini si realizzerà un'attività neurale casuale (spontanea) ed una disorganizzazione neurale di immaturità persistente delle strutture corticali. In ultima analisi, in caso di deafferentazione della corteccia uditiva, nonostante sia stato dimostrata la presenza comunque di una rudimentale

organizzazione tono topica, l'assenza di una esperienza uditiva provoca il mancato sviluppo sia in termini volumetrici che soprattutto in termini di organizzazione gerarchica e funzionale delle cortecce uditive.

In condizioni di normale esposizione ambientale al linguaggio verbale, le strutture corticali maturano oltre il sesto-ottavo anno di vita, permettendo, nei periodi maturativi precedenti, lo sviluppo delle seguenti abilità:

- detezione: nascita
- percezione fonologica: 8-10 mesi
- abilità semantiche: 2-3 anni
- abilità sintattiche: 6-15 anni.

L'esposizione a suoni ambientali in condizioni di normale trasduzione cocleare, consente lo sviluppo di competenze percettive acustiche, agevolate da meccanismi di interazione binaurale localizzate nel tronco. Il SNC è in grado di riconoscere pattern identificativi dello stimolo sonoro, che procedono su vie parallele e in serie. L'esposizione a suoni linguistici, nelle stesse condizioni, è più complessa, prevedendo sempre la possibilità di un'interazione binaurale ma coinvolgendo circuiti mnesici a breve termine e attentivi tali da permettere un'analisi fonemica e linguistica del suono stesso. In tali termini gli stessi presupposti dei fenomeni percettivi di segnali linguistici sono anche alla base dei meccanismi della propria comprensione.

Comuni al processing linguistico, pertanto, possono essere considerati:

- il numero di circuiti neurali attivi (quantità di memoria)
- la possibilità di controllo passivo (automatico) e attivo (volontario)
- possibilità di elaborazione seriale e in parallelo
- elaborazione bottom-up e top-down

In altri termini la percezione uditiva ed alcune capacità di discriminazione sonora sono innate, ma un vantaggio di abilità sensitivo-motorie, percettive e cognitive vengono acquisite durante il periodo della prima infanzia entro i 2 anni di vita. Una delle abilità più importanti è lo sviluppo del linguaggio nativo che si basa esclusivamente sull'interazione con l'ambiente sonoro ed in particolare sull'input linguistico. Grazie alla capacità di discriminare le caratteristiche acustiche dei suoni, il bambino impara ad astrarre e categorizzare gli stimoli uditivi linguistici e a separarli dal rumore di fondo. Di conseguenza, cominciano ad assumere sempre maggiore importanza i suoni del linguaggio nativo e vengono costruite le basi neurali per la percezione del linguaggio che, come noto, ha le caratteristiche di una percezione categorica.

Sembra ormai appurato che ciò implichi due meccanismi percettivi (Eggermont 2008, Kral e Eggermont 2007) in primo luogo il riconoscimento del tipo di categoria uditiva cioè dell'oggetto sonoro "linguaggio" e successivamente il riconoscimento dei tratti acustici che ne caratterizzano i simboli fonemici della lingua. L'esperienza di questi "oggetti" si forma nella corteccia cerebrale, che è anche la sede dell'esperienza sensitiva cosciente e dell'apprendimento sensoriale. Non è noto il significato gerarchico e funzionale delle aree secondarie e primarie ma è molto probabile che abbiano un ruolo nelle interazioni "bottom-up" e "top-down" del processing uditivo del linguaggio.

In particolare la trasformazione passiva del segnale sonoro prevede la trasformazione di onde di pressione acustica ($N/m^2/sec$) in onde idrodinamiche ($N/m^2/sec$) nel canale cocleare, in onde elastiche lungo la membrana basilare ($N/m/sec$). Questo si accompagna alla scomposizione meccanica in bande di frequenza da variazioni di energia mono-dimensionale ($N/m^2/sec$) a variazioni multi-dimensionali distribuite lungo la partizione cocleare ($N/m^2/sec/Hertz$).

Avviene quindi la trasduzione mecano-elettrica ovvero la conversione in pattern di eccitazione elettrica parallela su 30.000 fibre nervose.

Solo successivamente si realizza la estrazione di parametri percettivi dalla scarica neurale:

- frequenza, a ricavare l'altezza tonale
- intensità, a ricavare la loudness
- tempo, a ricavare il ritmo dell'enunciato

Questo crea il presupposto per il riconoscimento di pattern tipici di tratti elementari del linguaggio (fonemi).

In particolare la coclea permette una scomposizione del segnale acustico complesso in ingresso nei suoi elementi costitutivi elementari (legge di Fourier) e di ognuno di essi permette di identificare i parametri fisici caratteristici. Questi parametri vengono inviati in parallelo alla corteccia attraverso un percorso lungo le vie acustiche centrali, organizzato secondo schemi di tonotopicità rigorosamente rispettati. La tonotopicità è alla base dei meccanismi di percezione della frequenza del suono attraverso un processing continuo e contemporaneo su canali paralleli che è alla base della percezione del linguaggio. Altro parametro importante nell'ambito del trasferimento di informazioni ai centri è il parametro temporale (figura

1), che varia congiuntamente al parametro energetico. Nel tempo energia e spettro dei segnali in ingresso variano e queste variazioni forniscono informazioni importanti nella segmentazione del segnale stesso. La transizione fra una sillaba e la successiva (verosimilmente elementi minimi di decodifica), essenziale nei meccanismi di riconoscimento del parlato, è legata a variazioni energetiche che devono essere garantite anche in condizioni di ascolto disturbate (competizione ambientale). Associate a queste modulazioni temporali di spettro ed energia troviamo modulazioni della frequenza fondamentale (F0), responsabili delle variazioni prosodiche (intonazione, ritmo) o di particolari sfumature e connotazioni semantiche dell'enunciato.

La possibilità di riconoscimento degli elementi costitutivi fisici che connotano i tratti linguistici (tratti vocalici e consonantici) è alla base dei meccanismi percettivi bottom-up (dall'orecchio alle strutture superiori). In particolare l'identificazione dei tratti vocalici si basa sulla possibilità di riconoscimento di F0 e del rapporto reciproco fra la prima e la seconda formante. I tratti consonantici sono invece identificati in relazione al riconoscimento delle bande di rumore che li caratterizzano. Per le consonanti il problema è più complesso essendo caratterizzate dalla modalità di articolazione in relazione ai possibili luoghi articolatori nel vocal tract. La connotazione di tali parametri diventa un carattere distintivo del tratto sotto il profilo acustico (indici acustici). Possiamo così sintetizzare:

1. Indici di luogo
 - Locus della transizione di F2
 - Loci della transizione di F3
 - Frequenza di rumore
2. Indici di modo
 - Forma e velocità delle transizioni
 - Locus della transizione di F1
 - Presenza di rumore
 - Durata di rumore
 - Continuità o discontinuità delle giunzioni
 - Intensità e durate relative per differenziare sorde e sonore

Se due consonanti hanno lo stesso modo di articolazione non si distinguono mai l'una dall'altra per meno di due indici di luogo e per più di tre. Se hanno lo stesso luogo di articolazione non si distinguono mai l'una dall'altra per meno di due indici di modo e per più di undici. Ne consegue che un indice acustico non è di per se stesso distintivo.

Queste considerazioni di ordine acustico-articolatorio hanno corrispettivi nella osservazione, resa possibile da moderne indagini di neuroimaging funzionale, che la stimolazione con segnali linguistici e non linguistici determina la attivazione simultanea di più aree corticali (Wong 2002).

Altro punto importante è rappresentato dalla integrazione dei meccanismi bottom-up e top-down nella percezione verbale. Se i meccanismi di segmentazione e co-articolazione (sopra accennati) rappresentano meccanismi tipici della percezione top-down, la categorizzazione rappresenta un meccanismo tipico dei meccanismi percettivi bottom-up. Il cervello è una struttura dinamica composta da mappe locali (sia motorie sia sensoriali) connesse da rientro multiplo. Grazie a ciò nasce la categorizzazione percettiva, ossia la discriminazione selettiva di un oggetto o di un evento da altri oggetti o eventi, operata per scopi adattativi.

La capacità di categorizzare è incorporata nel sistema nervoso. Non esiste, cioè, nessun elemento supervisor che controlla le funzioni psichiche. Per spiegarlo occorre considerare una coppia di classificazioni: un'unità minima composta da due mappe di gruppi neuronici, ciascuna delle quali riceve indipendentemente segnali da altre mappe o dal mondo esterno.

Le mappe sono connesse tra loro mediante rientro in certo ambito temporale. Tale meccanismo rafforza le connessioni tra alcune delle combinazioni attive di gruppi di neuroni nelle due mappe.

In questo modo si ha la correlazione delle funzioni e delle attività di una mappa con quelle dell'altra. Attraverso connessioni topografiche, in cui ad un determinato evento o stimolo esterno esiste una corrispondenza con le posizioni nella mappa, è possibile associare eventi che accadono in un certo punto del mondo esterno senza bisogno di un supervisore e questo generalmente avviene tramite le interazioni di molteplici mappe.

A causa delle modifiche sinaptiche, le risposte agli stimoli del momento sono collegate anche alle configurazioni di risposta che si sono presentate in un tempo precedente. Così si generano nuovi tipi di segnali che possono in seguito rientrare nelle mappe assieme a segnali del mondo esterno, permettendo l'emersione di nuove proprietà selettive. Tale proprietà è detta sintesi ricorsiva ed è caratteristica di una struttura

Tabella 1. Sintesi degli eventi temporali legati alla percezione verbale

	Scarica neurale (spikes/sec)	Localizzazione anatomica (presunta)	Componente funzionale		Intervallo temporale
Interpretazione linguistica	Multi-time	Intero cervello	Semantica -comprensione		> 500 ms
	< 10	Corteccia frontale	Grammatica - sintassi		> 250 ms
Analisi Lessicale Prosodica Fonetica	< 10	Corteccia associativa	Analisi morfologica	Ipotesi lessicale	250-1000 ms
	2-20	Corteccia uditiva	Analisi prosodica	Analisi sillabica	50-1000 ms
	2-20	Corteccia uditiva	Modulazione dello spettro	Segmentazione sillabica	50-1000 ms
	2-20	Corteccia uditiva	Analisi fonetica	Identità fonetica	30-300 ms
	2-20	Corteccia uditiva	Analisi modale	Segmentazione fonetica	30-300 ms
Analisi Pre linguistica	100-800	Tronco	Segregazione		10 us-500 ms
	100-800	Tronco	Analisi spettrale		250 us-50 ms
	100-250	Periferia uditiva	Analisi spettrale		250 us-50 ms
		Segnale verbale in ingresso (forma d'onda)			

di ordine superiore chiamata mappa globale. L'instaurarsi di un numero adeguato di sinapsi all'interno delle mappe globali è alla base dei meccanismi di apprendimento.

In conclusione quindi l'acquisizione del linguaggio in un bambino riconosce come finalità principale la specializzazione del sistema nervoso centrale nel processo riconoscimento e interpretazione dell'informazione trasmessa dal linguaggio nativo, che rappresenta l'esperienza uditiva del bambino nei primi 12-24 mesi di vita. È frutto di un meccanismo di apprendimento sensoriale dove la plasticità cerebrale organizza le strutture neurali per costruire una modalità percettiva di tipo categorico ed univoca per il linguaggio. In termini di processing le funzioni principali sono l'acquisizione delle abilità percettive alla base delle chiavi fonetiche della lingua nativa, il riconoscimento delle sequenze fonetiche come "oggetto categorico", la segmentazione del discorso in parole e frasi con l'acquisizione delle regole della lingua e l'estrazione del contenuto informativo.

Il substrato neurologico dove avvengono queste funzioni è noto grossolanamente e come abbiamo visto in precedenza ben poco si sa in dettaglio sul significato funzionale delle strutture delle vie uditive sotto-corticali e del sistema talamo-corticale, a parte la costante riproduzione nei tessuti neurali in tutte le stazioni della organizzazione tono-topica della coclea. In termini funzionali, anche in base alla grande messe di dati anatomo-funzionali derivati dalla PET-fRMN, vi sono però alcune correlazioni ed evidenze che ci hanno permesso di costruire modelli neuro-anatomici e operazionali più generali sulla percezione del linguaggio e sulla plasticità del processo (Hickok 2003) (Tabella 1).

L'analisi delle caratteristiche spettro-temporali dei fonemi coinvolge ovviamente in primo luogo la corteccia uditiva primaria. Il riconoscimento e quindi la memoria ed il processing delle sequenze fonetiche si situa in una zona adiacente, ma più posteriore in un'area dove possono convergere anche informazioni sensoriali sulla stringa fonetica da altre modalità sensoriali, in particolare dalla vista. Le aree frontali-parietali e le aree posteriori sono rispettivamente le interfacce motorie e lessicali, mentre gli aspetti percettivi concettuali non hanno una sede ben precisa ma probabilmente sono distribuiti su tutta la corteccia. Un aspetto particolarmente importante che coinvolge direttamente gli effetti che la deprivazione uditiva può comportare è dato dal ruolo che sembrano assumere le cortecce associative.

Se da un lato nella corteccia primaria ha sede il riconoscimento delle caratteristiche acustiche dei fonemi, le cortecce associative sembrano avere una azione di controllo "top-down" sulla corteccia primaria. Le connessioni sugli strati superficiali della corteccia uditiva primaria, che come abbiamo visto precedentemente sono alla base della generazione di N1, sono compromesse in caso di deprivazione uditiva (Kral e Eggermont 2007). La funzione svolta da queste connessioni in termini percettivi non è nota ma appare evidente che cortecce superiori possono modificare direttamente l'eccitabilità e la struttura intrinseca dei neuroni primari corticali. È affascinante l'ipotesi che questo controllo sia l'espressione della categorizzazione dello stimolo acustico e che la funzione che esercitano sia la programmazione della corteccia primaria

in base al riconoscimento dell'oggetto sensoriale uditivo. Questa interpretazione è confortata anche da alcuni aspetti peculiari della percezione del linguaggio che sembra essere una modalità di stimolo così forte e robusto che anche in condizioni di radicale degrado del suo contenuto spettrale e temporale lo rendono comprensibile, ma solo se somministrato in un continuum di stimolazione linguistica (Davis 2007). Inoltre sia da evidenze di tipo sperimentale sulla scimmia (Rauschecker 1998) sia da modelli di carattere neuro-anatomico (Hickok 2004) sembra sempre più evidente la presenza di due ingressi paralleli al sistema uditivo centrale che permettono attraverso la via tono-topica alla corteccia primaria l'analisi spettrale e attraverso la via non-tonotopica che proietta nelle cortecce associative la categorizzazione della tipologia della sequenza temporale dell'ingresso uditivo.

Bibliografia essenziale

- Arslan E, Genovese E, Santarelli R. Patologie dell'apparato uditivo e del linguaggio: funzionamento delle strutture e disabilità. Elementi di audiologia pediatrica. http://cti.best.it/_res/_doc/conv_20apr/int6.pdf (10 Luglio 2011)
- Delattre PC, Liberman AM, Cooper Franklin S. Acoustic loci and transitional cues for consonants. *Journal of the Acoustical Society of America* 1955;27:769-773
- Davis M H, Johnsrude I S. Hearing speech sounds: Top-down influences on the interface between audition and speech perception. *Hearing Research* 2009; 229: 132-147
- Edelman GM, Mountcastle VB. (1978) *The Mindful Brain: Cortical Organization and the Group-Selective Theory of Higher Brain Function* 1978 MIT Press, Cambridge, MA
- Elementi di Audiologia. S. Prosser, A Martini. Omega ed. Torino 2007
- Eggermont JJ. The role of sound in adult and developmental auditory cortical plasticity. *Ear Hear.* 2008;29:819-829
- Elhilali M, Klein DJ, Fritz JB, Simon JZ, Shamma SA. The enigma of cortical responses: Slow yet precise. In *Auditory Signal Processing Physiology, Psychoacoustics, and Models*. Daniel Pressnitzer Alain de Cheveigne', Stephen McAdams Lionel Collet Editors. Springer edition, 2003
- Fant G *Acoustic theory of speech production*. Mouton, The Hague, 1960
- Gerald M. Edelman *Neural Darwinism: Selection and reentrant signaling in higher brain function*. *Neuron* 1993;10(2):115-125
- Harrison RV, Stanton SG, Ibrahim D, Nagasawa A, Mount RJ.- Neonatal cochlear hearing loss results in developmental abnormalities of the central auditory pathways. *Acta Otolaryngol.* (Stockh), 113, 296-302, 1993
- Hauser DH, Chomsky N, Tecumseh Fitch W. The Faculty of Language: What Is It, Who Has It, and How Did It Evolve? *Science* 22 November 2002: 298:1569-1579
- Hickok G, Buchsbaum B, Humphries C, Muftuler T. Auditory-motor interaction revealed by fMRI: Speech, music, and working memory in area. *J. Cogn. Neurosci.* 2003; 15: 673-682
- Hickok G, Poeppel D. Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition* 2004; 92: 67-99
- Jakobson R, Halle M. *Fundamentals of language*. Mouton, 1956
- King AJ, Kalcenik O, Mrcsic-Flogel TD, Schnupp JWH, Parsons CH, Moore DR. How Plastic Is Spatial Hearing? *Audiology e Neurotology* 2001;6:182-186
- Kral A and Eggermont JJ. What's to lose and what's to learn: Development under auditory deprivation, cochlear implants and limits of cortical plasticity *Brain Research Reviews* 2007; 56: 259-269
- Rauschecker, JP. *Parallel Processing in Auditory Cortex of Primates* *Audiology & Neurotology* 1998; 3: 104-122
- Salvi J, Wang J, Ding D. Auditory plasticity and hyperactivity following cochlear damage. *Hearing Research* 147, 26-274, 2000
- Vihman MM, Edwin K, de Boysson-Bardies B, Durand C, Sundberg U. External sources of individual differences? A cross-linguistic analysis of the phonetics of mothers' speech to 1-yr-old children. *Developmental Psychology*, 1994; 30(5):651-662
- Wong D, Pisoni DH, et al. PET imaging of differential cortical activation by monaural speech and non speech stimuli. *Hear Res*; 2002; 166: 9-23