

E. Brattico<sup>1,2,3</sup>, V. Monitillo<sup>3</sup>, S. Calabrese<sup>3</sup>, N. Montrone<sup>3</sup>, R. Nardulli<sup>3</sup>, V. Multari<sup>3</sup>, L. Ambrosi<sup>3</sup>

## Effetti del rumore sui meccanismi corticali di elaborazione dei suoni linguistici

<sup>1</sup> Cognitive Brain Research Unit, University of Helsinki, Finland

<sup>2</sup> Helsinki Brain Research Centre, Helsinki, Finland

<sup>3</sup> Fondazione S. Maugeri, IRCCS, Centro di Cassano Murge (Bari)

**RIASSUNTO.** Sinora gli studi sugli effetti del rumore sulla percezione linguistica sono stati focalizzati sullo sviluppo della perdita di udito e patologie ad essa legate. D'altro canto, studi comportamentali riportano che la percezione e comprensione linguistica vengono alterate in particolari gruppi clinici dal rumore di fondo in modo molto più accentuato rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare sulla base dei risultati dell'audiogramma. Questa osservazione suggerisce che il rumore, anche lieve, può modificare i meccanismi cerebrali sottesi alla elaborazione del messaggio linguistico. In linea con le osservazioni comportamentali, le misurazioni cerebrali elettriche e magnetiche mostrano che il rumore presentato a individui sani decresce l'ampiezza e aumenta la latenza delle risposte cerebrali ai suoni linguistici. Recentemente, ulteriori dati sperimentali hanno permesso una maggiore conoscenza dei meccanismi neurali che intervengono in condizioni difficili di ascolto. In particolare, i suoni linguistici presentati su sottofondo rumoroso evocano risposte bioelettriche in popolazioni neurali localizzate nell'emisfero cerebrale destro, che altrimenti nel silenzio non risultano attivate. Tali risultati potranno in futuro contribuire a svelare nuovi aspetti della patologia da rumore permettendone la precoce identificazione in fase preclinica.

**Parole chiave:** linguaggio, rumore, potenziali evento-correlati, MMN, lateralizzazione.

**ABSTRACT.** [www.gimle.fsm.it](http://www.gimle.fsm.it)

*So far studies about noise effects on speech perception have been focused on the development of hearing loss and other related pathologies. However, behavioral findings indicate that speech perception and intelligibility are disrupted in presence of noise in certain clinical groups in a way that is unpredictable on the basis of the audiogram performed in silence. This observation suggests that even soft noise can modify the cerebral mechanisms underlying speech information processing. Confirming the behavioral results, electric and magnetic brain measurements showed that noise presented to healthy subjects decreases the amplitude and increases the latency of brain responses to speech sounds. Recently, further experimental data allowed us to have a deeper knowledge of the neural mechanisms intervening in difficult listening conditions. In particular, speech sounds presented in noisy background evoke bioelectric responses in neural populations located in the right cerebral hemisphere, that otherwise would not be activated. These findings can in future contribute to unveil new aspects of the noise pathology and its assessment in an early pre-clinical stage.*

**Key words:** language, noise, event-related potentials, MMN, lateralization.

### Introduzione

A partire dalla rivoluzione industriale, l'esposizione a lungo termine al rumore è stata riconosciuta come la causa primaria della perdita di udito e della presbiacusia (Alberti, 1992; Lang, 1994; Prasher, 1998; Rabinowitz, 2000; Jones, 1996). Più recentemente è stato rilevato che l'esposizione a lungo termine al rumore può determinare disfunzioni del sistema nervoso e cardiovascolare come è dimostrato dalla maggiore incidenza di malattie nervose e cardiache nei soggetti esposti (Miller, 1974; Hessel & Sluis-Cremer, 1994; Kristal-Boneh, Melamed, Harari, & Green, 1995; Melamed, Froom, Kristal-Boneh, Gofer, & Ribak, 1997; Fernandes & File, 1993; Marciniak *et al.*, 1999; Evans, Bullinger, & Hygge, 1998; Evans, Hyhhe, & Bullinger, 1995). A tutt'oggi la perdita di udito causata dal rumore (noise-induced hearing loss, NIHL) è la più diffusa e irreversibile patologia occupazionale nei paesi industrializzati (Alberti, 1992).

Studi mirati a determinare le modifiche strutturali a livello cellulare dell'organo uditivo in presenza di rumori di forte intensità hanno chiarito l'eziologia della perdita traumatica di bande di frequenza acustiche (Alberti, 1992; Miller, 1974; Rabinowitz, 2000). Effetti dell'esposizione a breve termine a rumore di bassa intensità sono, invece, legati alla discriminabilità e udibilità dei suoni, con la conseguente compromissione della comprensione linguistica. Tale compromissione è stata ampiamente studiata con l'utilizzo dell'audiogramma e con altri test psicofisici e comportamentali, portando ad una buona prevedibilità dei risultati sulla base delle variabili presenti. Nel caso di popolazioni cliniche, però, gli effetti del rumore sulla comprensione del linguaggio verbale sono molto più accentuati rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare sulla base dei risultati dell'audiogramma rilevato in condizioni di silenzio. Ad esempio, le soglie di udibilità di suoni sinusoidali o linguistici nei pazienti con ipoacusia risultano affette dal rumore di fondo in modo molto più marcato rispetto ai pazienti con udito normale, anche quando non vi sono differenze tra i due gruppi nelle misurazioni eseguite senza rumore di fondo (Elliott, 1979; Sperry, Wiley, & Chial, 1997; Tillman, Cahart, & Olsen, 1970; Findlay, 1976; Wilson, Zizz, Shanks, & Causey, 1990; Plomp, 1986; Dirks, Morgan, & Dubno, 1982).

Simili interessanti osservazioni sono state fatte con soggetti aventi audiogramma normale e appartenenti a diverse fasce d'età (Dubno, Dirks, & Morgan, 1984; Nabelek & Robinson, 1982; Bergman, *et al.*, 1976). In particolare, bambini e anziani mostrano difficoltà maggiori rispetto a soggetti adulti nei compiti di riconoscimento delle parole in presenza di rumore o riverbero, fino a richiedere 20 dB (livello di pressione sonora, LPS) in più rispetto ai soggetti adulti per ottenere gli stessi risultati (Nabelek & Robinson, 1982). Tali risultati sperimentali non sono, dunque, spiegabili semplicemente sulla base del mascheramento da parte del rumore (che ha energia distribuita in modo casuale su ampie bande di frequenza sonora) delle frequenze dei segnali linguistici, ma, molto probabilmente, sottendono problemi nei meccanismi neurali *top-down*<sup>1</sup> di interpretazione del segnale sonoro da parte del sistema nervoso centrale. Inoltre, tali specifici meccanismi neurali messi in gioco dalla presenza di rumore di fondo potrebbero, se prolungati nel tempo, essere essi stessi determinanti nello sviluppo delle ipoacusie.

Le ricerche che qui verranno esposte in rassegna si occupano, appunto, dei processi di elaborazione cerebrale dei suoni in presenza di rumore, anche lieve, in soggetti sani senza alcun danno uditivo periferico. Tali ricerche si pongono come obiettivo finale una comprensione più accurata dei cambiamenti neurali nell'elaborazione corticale dei suoni causati dalla continua e prolungata presenza di rumore di fondo, nella convinzione che essa possa servire a chiarire in futuro il ruolo di tali cambiamenti neurali nell'eziologia delle varie patologie legate all'esposizione al rumore.

---

### **I potenziali elettrici e i campi magnetici evento-correlati per lo studio dell'elaborazione corticale dei suoni**

I potenziali evocati sono i cambiamenti di voltaggio dell'elettroencefalogramma (EEG) sincronizzati alla presentazione di stimoli (Näätänen, 1992). Dalla computazione della media (*average*) delle porzioni dell'EEG connesse alla presentazione degli stessi stimoli si ottengono onde, o componenti, a valenza positiva o negativa. Esse si susseguono con morfologie e latenze caratteristiche che variano a seconda della modalità sensoriale stimolata, nonché dello specifico paradigma di stimolazione usato per evocarli. I parametri utilizzati per la misurazione di tali componenti sono l'ampiezza del picco, la latenza e la distribuzione sullo scalpo. Le componenti dei potenziali evento-correlati vengono, di conseguenza, denominate a seconda della valenza positiva o negativa e della latenza caratteristica rispetto al tipo di stimolazione usata (visiva, uditiva, somatosensoriale, etc.); ad esempio, la P100 o P1 è la componente positiva che viene elicitata a circa 100 ms dall'inizio dello stimolo, mentre la N100 o N1 è la componente negativa che viene elicitata pure attorno ai 100 ms subito dopo la P100. Se le registra-

zioni dell'EEG vengono svolte ad alta densità di elettrodi, è possibile modellare il dipolo equivalente di corrente responsabile della generazione della componente dei potenziali evento-correlati studiata, partendo dal presupposto che tale componente è stata evocata da una popolazione omogenea di neuroni (Scherg & Picton, 1991). Similmente, con il magnetoencefalogramma (MEG), è possibile registrare i campi magnetici evocati dalle correnti cortico-corticali che fluiscono negli spazi extra-cellulari dei neuroni piramidali. Il dipolo equivalente di corrente modellato sui valori dei campi magnetici ricavati dalla media delle risposte agli stimoli (come nell'EEG) viene usato per la quantificazione delle risposte magnetiche dei singoli soggetti e per la localizzazione dell'attività corticale (Hämäläinen, Hari, Ilmoniemi, Knuutila, & Lounasmaa, 1993).

Le componenti dei potenziali elettrici o i campi magnetici evento-correlati, soprattutto quando associate a misurazioni behavioristiche, riflettono il decorso temporale, l'intensità e il locus dei processi corticali coinvolti nei vari stadi di codifica ed elaborazione dell'informazione sensoriale. Di conseguenza, questi metodi possono essere utilizzati per misurare obiettivamente i disturbi sensoriali e percettivi nei pazienti. Le componenti, e conseguentemente le loro corrispondenti magnetiche, vengono tradizionalmente classificate come risposte esogene o obbligatorie, con una latenza tra i 50 e i 100 ms, e componenti endogene o tardive, oltre i 100 ms. Al contrario delle componenti esogene, queste ultime vengono modulate soprattutto dal contesto in cui gli stimoli sono somministrati piuttosto che non dalle caratteristiche fisiche, o addirittura dalla presenza, degli stimoli stessi (Donchin, Ritter, & McCallum, 1978). Questa classificazione ovviamente non tiene conto degli effetti che processi cognitivi possono avere sulle componenti esogene oppure della modulazione di quelle endogene a seconda delle caratteristiche acustiche degli stimoli, ma risulta utile per gli scopi di questa rassegna.

---

### **Il rumore altera le risposte neurofisiologiche ai suoni linguistici**

Come si è detto in precedenza, il mascheramento dei suoni linguistici da parte del rumore, ossia l'interferenza con il messaggio che si vuole comunicare e che spesso viene reso inascoltabile o difficile da comprendere, è stato studiato con test psicofisici e audiometrie, nonché con misurazioni fisiologiche ottenute a diversi livelli delle vie acustiche (Miller, 1974). Ad esempio, il cosiddetto rumore bianco aumenta la soglia di risposta delle fibre nervose cocleari, riducendone le ampiezze, e aumenta le latenze dei potenziali elettrici tronco-encefalici (Burkard & Hecox, 1983).

A livello centrale l'informazione acustica arriva, dunque, alterata in presenza di rumore di fondo. Il modo in cui i meccanismi centrali di elaborazione dei suoni linguistici nella corteccia temporale uditiva vengono modificati per far fronte a tali difficili condizioni di stimolazione è stato

---

<sup>1</sup> I termini *top-down* e *bottom-up* derivano dalle influenze che la teoria dell'informazione ha avuto, a partire dagli anni '80, sulle scienze del comportamento (incluse le neuroscienze cognitive). Il computer viene scelto come modello teorico in base al quale studiare le attività intelligenti dell'uomo. La distinzione in sistemi di analisi degli input sensoriali e in sistema centrale di controllo (il cervello) comporta l'indipendenza dei processi dal basso verso l'alto (*bottom-up*) rispetto a quelli dall'alto verso il basso (*top-down*).

studiato con l'uso dei potenziali elettrici e dei campi magnetici evento-correlati. Le componenti esogene ed endogene dei potenziali evento-correlati evocate dai suoni linguistici vengono, appunto, modificate dalla contemporanea presenza di rumore. Sillabe consonante-vocale (CV) (/ba/ and /da/) generano risposte bioelettriche ridotte in ampiezza, nonché una diminuita performance di discriminazione quando esse sono mascherate da rumore a banda larga rispetto a situazioni di stimolazione in cui non vi è contemporanea presenza di rumore (Whiting, Martin, & Stapells, 1998). Ciò è valido per diversi livelli di intensità dei suoni linguistici (da 50 dB a 80 dB LPS). Inoltre, è stato dimostrato che le latenze dei potenziali eventocorrelati sono dei sensibili indicatori del peggioramento dell'udibilità in caso di condizioni di ascolto precarie. Ritardi di latenza significativi per i potenziali eventocorrelati si verificano quando la differenza di intensità tra rumore e suoni linguistici consiste di appena 20 dB (Whiting *et al.*, 1998).

Le componenti N1, N2b e P3 dei potenziali evento-correlati uditivi<sup>2</sup> reagiscono in modo caratteristico e a seconda del loro significato funzionale in condizioni di ascolto alterate. Ad esempio, Martin e collaboratori (1997) hanno misurato i potenziali evento-correlati in risposta a due sillabe (/ba/ and /da/) variate nel loro livello di udibilità e mascherate dal rumore a banda larga oppure filtrato nelle alte frequenze (da 250 a 4000 Hz). La componente N1, visibile nei tracciati elettrici alla latenza di circa 100 ms, viene elicitata da tutti gli stimoli nel momento in cui sono udibili, anche quando essi non sono discriminabili l'uno dall'altro, come si evince dai test behavioristici svolti contemporaneamente alle misurazioni dei potenziali. Al contrario, le componenti N2 e P3 risultano significative solo nelle condizioni in cui le sillabe risultano discriminabili per il soggetto. Inoltre, è stato dimostrato che la N1m (la componente magnetica corrispondente alla N1) non è direttamente collegata alla percezione dello stimolo, in quanto i suoi decrementi di ampiezza nelle diverse condizioni di mascheramento non sono sempre accompagnati da cambiamenti sistematici nelle soglie di discriminazione (Hari & Mäkelä, 1988).

<sup>2</sup> La N1 e la sua corrispondente magnetica, la N1m, vengono elicitate da stimoli acustici presentati sia all'interno di sequenze ripetitive che in paradigmi *oddball* (dove suoni frequenti vengono alternati a suoni infrequenti). Essa riflette l'analisi da parte di circuiti neurali localizzati principalmente nell'area uditiva primaria delle caratteristiche acustiche (intensità, frequenza, durata) in particolar modo dell'attacco e, in caso di stimoli di lunga durata, dell'*offset* degli stimoli uditivi (Näätänen & Winkler, 1999). Inoltre, la curva dell'ampiezza della N1 evocata dagli stessi suoni presentati all'interno di diverse sequenze tonali, mostra che tale componente potrebbe anche riflettere meccanismi più complessi di elaborazione dello stimolo. La N2 e la P3 (distinta in P3a e P3b) vengono elicitate in paradigmi *oddball* quando il soggetto presta, volontariamente o involontariamente, attenzione agli stimoli. In particolare, la N2 e la P3a, dalla latenza da 150 a 400 ms, vengono elicitate quando, durante una stimolazione uditiva inattesa, un cambiamento sonoro estremamente rilevante per il soggetto provoca l'intervento dell'attenzione. La N2 rifletterebbe la discriminazione attentiva del cambiamento e la conseguente classificazione dello stimolo (Näätänen, 1992) mentre la P3a la focalizzazione dell'attenzione sulla stimolazione in entrata, risultando dunque un'ottima misura dei processi di regolazione attentiva (Escera *et al.*, 1999). Per la registrazione della N2 e della P3a vengono spesso usati stimoli che abbiano caratteristiche tali da attirare particolarmente l'attenzione. Essi vengono detti *novel* perché sono presentati solo una volta durante la sessione sperimentale e consistono in rumori o suoni ambientali. La P3b, caratterizzata da una latenza tarda da 300 fino a 600 ms e dalla lunga durata della positività, viene misurata quando il soggetto presta attenzione agli stimoli ed è impegnato nella loro elaborazione per l'esecuzione di un compito di tipo cognitivo (Besson *et al.*, 1994).

<sup>3</sup> La MMN viene misurata in un paradigma di stimolazione *oddball* in cui suoni ripetuti, detti standard, vengono a caso sostituiti da suoni infrequenti, detti devianti. Per la registrazione della MMN non è necessaria l'attenzione dei soggetti. Al contrario, per evitare la sovrapposizione della MMN con altre componenti legate all'intervento dell'attenzione, come la N2 e la P3a, viene solitamente chiesto ai soggetti di concentrarsi in un altro compito diverso dall'ascolto, come la lettura di un libro o la visione di un film con sottotitoli nonché vengono proposti cambiamenti sonori tra stimoli devianti e stimoli standard non di grande entità (Näätänen, 2003; Näätänen, Brattico, Tervaniemi, in stampa). I parametri della MMN si correlano alla *performance* comportamentale del soggetto, permettendo di individuare, in modo oggettivo e non disturbato da processi attentivi e decisionali, lo stato funzionale normale o patologico del sistema uditivo centrale, anche in soggetti non collaboranti, come pazienti in coma, neonati e soggetti schizofrenici (Tiitinen, May, Reinikainen, & Näätänen, 1994; Lang, *et al.*, 1990; Kujala, *et al.*, 2000; Näätänen, Brattico, Tervaniemi, 2003).

Anche in condizioni di ascolto passivo, ossia quando il soggetto è occupato in un altro compito e riceve l'istruzione di ignorare gli stimoli, la N1 varia a seconda dell'udibilità fisica dei suoni mascherati, ossia dell'intensità di energia presente nello spettro sonoro (Martin, Kurtzberg, & Stapells, 1999). In questo tipo di condizione sperimentale, la mismatch negativity (MMN)<sup>3</sup> appare, invece, solo quando le sillabe risultano discriminabili, come testimoniato da test behavioristici eseguiti dagli stessi soggetti in sessioni sperimentali successive (Martin *et al.*, 1999). Non a caso, la MMN riflette la discriminazione del cambiamento sonoro, presupponendo la presenza di una traccia mnemonica, o modello neurale, per la stimolazione sonora ripetuta (Näätänen & Winkler, 1999).

Ricerche in cui sono state studiate le risposte comportamentali dei soggetti hanno dimostrato che diversi tipi di rumore caratterizzati dal contenuto di frequenza, variazione temporale, o modulazione influenzano in modo specifico la ricezione dei suoni, in particolare di quelli linguistici. Ad esempio, la performance in un compito di riconoscimento delle parole è migliore in presenza di rumori a banda larga piuttosto che con rumore continuo (Stuart & Philips, 1997). Inoltre, l'elaborazione linguistica viene disturbata in misura maggiore quando il rumore (ad esempio, un mormorio di voci) ha un contenuto semantico (Sperry, Wiley, & Chial, 1997). Ciò è stato ulteriormente investigato per mezzo di misurazioni elettroencefalografiche dove rumori di vario tipo (a banda larga, a banda stretta, impulsivi, continui, ecc.) venivano presentati contemporaneamente a semplici suoni linguistici (Saad *et al.*, in preparazione). I risultati di questo studio sono attualmente in fase di analisi.

### L'asimmetria emisferica nell'elaborazione linguistica

Fin dal diciannovesimo secolo, siamo a conoscenza del fatto che le funzioni linguistiche sono localizzate principalmente nell'emisfero sinistro, provocando disturbi di produzione o ricezione, dette afasie, in pazienti che hanno

subito lesioni in quell'emisfero (Wernicke, 1874). Più recentemente, il progresso nelle tecniche elettrofisiologiche e di biomaggine (*brain imaging*) ha permesso di visualizzare in modo non invasivo l'attività cerebrale dell'emisfero sinistro di soggetti sani mentre elaborano o semplicemente pensano determinati suoni linguistici (Frost *et al.*, 1999; Binder *et al.*, 1995; Mazoyer *et al.*, 1993; Mazziotta, Phelps, Carson, & Kuhl, 1982; Petersen, Fox, Posner, Mintun, & Raichle, 1988; Zatorre, Evans, Meyer, & Gjedde, 1992).

I potenziali elettrici e i campi magnetici evento-correlati forniscono un contributo prezioso nello studio delle fasi precoci dell'elaborazione linguistica in quanto, a differenza delle misurazioni di tipo metabolico, hanno una risoluzione temporale dell'ordine di millisecondi. Ad esempio, misurazioni magnetoencefalografiche e intracraniali hanno dimostrato che un cambiamento non atteso in una sequenza di suoni tonali genera una MMN nella corteccia uditiva primaria, in particolare destra (Hari *et al.*, 1984; Sams *et al.*, 1985; Alho, Paavilainen, Reinikainen, Sams, & Näätänen, 1986; Kropotov *et al.*, 1995; Tervaniemi *et al.*, 1999)<sup>4</sup>. I suoni linguistici vengono, invece, elaborati nell'emisfero sinistro anche quando il soggetto non vi presta attenzione (Näätänen *et al.*, 1997; Rinne *et al.*, 1999). Näätänen (2001) ha proposto che ciò sia dovuto alla presenza di tracce neurali di riconoscimento per quei suoni, localizzate nella corteccia sopratemporale sinistra, e in particolare, nell'area di Wernicke (cf. anche Rinne *et al.*, 1999). Una recentissima conferma di questa ipotesi è stata fornita da Shestakova e colleghi (2002) utilizzando cambiamenti nelle categorie fonemiche di suoni linguistici prodotti da centinaia di parlanti.

### Il rumore altera l'asimmetria emisferica per i suoni linguistici

Con la tecnica dell'ascolto dicotico, in cui i soggetti identificano gli stimoli presentati in un determinato orecchio mentre in quello controlaterale vengono somministrati stimoli simili, è stato osservato che la *performance* in presenza di rumore di mascheramento di bassa e media intensità è peggiore se le parole o sillabe da identificare vengono presentate all'orecchio sinistro piuttosto che a quello destro (Weiss & House, 1973; Spreen & Boucher, 1970). Tale alterazione selettiva della *performance* controllata dall'emisfero destro suggerisce un ruolo privilegiato per questo emisfero per l'elaborazione dei suoni linguistici in condizioni di ascolto difficili.

Recentemente, alcuni studiosi hanno cercato di comprendere più a fondo questo fenomeno con l'uso dei campi magnetici evento-correlati. Shtyrov *et al.* (1998) hanno scoperto che quando due sillabe plosive (la sillaba frequente /pa/ e quella infrequente (p = 15%) /ka/) vengono presentate in condizioni di silenzio, la MMNm (la corrispondente magnetica della MMN elettrica) evocata dal

cambiamento sillabico viene prevalentemente generata nella corteccia uditiva dell'emisfero sinistro, seguendo i dati normativi. Al contrario, il rumore bianco costante presentato a due livelli, basso e medio-basso, di intensità (15 e 10 dB), contemporaneamente ai suoni linguistici, influenza la lateralizzazione della MMNm da essi evocata: i valori di intensità dei dipoli della MMNm sono fortemente attenuati nell'emisfero sinistro laddove risultano accresciuti in quello destro rispetto alla condizione di silenzio (vedi Tabella).

**Tabella. MMNm in risposta a sillabe devianti presentate tra sillabe standard in condizioni di silenzio o rumore di fondo a due intensità: valori medi delle ampiezze di picco [fT/cm], momenti del dipolo [nAm] e latenze [ms]**

Condizione	Ampiezza di picco	Momento del dipolo	Latenza
Sinistro			
Silenzio	8.7 ± 0.8	5.5 ± 0.8	201 ± 10
Rumore basso	6.9 ± 1.0	1.3 ± 1.1	214 ± 13
Rumore medio	7.4 ± 0.9	2.5 ± 1.0	189 ± 7
Destro			
Silenzio	7.6 ± 0.9	1.4 ± 1.1	194 ± 10
Rumore basso	8.2 ± 0.9	2.6 ± 1.4	216 ± 20
Rumore medio	9.8 ± 1.4	3.9 ± 1.5	203 ± 12

Sinistro e Destro indicano i dati (media ± SEM) delle MMNm registrate sopra gli emisferi sinistro e destro, rispettivamente. La tabella mostra l'aumento del momento del dipolo MMNm sull'emisfero destro in presenza di rumore. Adattata da Shtyrov *et al.*, 1998.

I luoghi di generazione delle risposte magnetiche esogene ai suoni linguistici sono pure differenti in condizioni di rumore di bassa intensità rispetto a condizioni di silenzio. In particolare, le fonti di generazione delle componenti magnetiche P1m, N1m e P2m in risposta alla sillaba /pa/ sono attenuate selettivamente nell'emisfero destro in presenza di un leggero rumore di fondo, pure se le risposte non risultavano lateralizzate in condizione di silenzio (Shtyrov, Kujala, Ilmoniemi, & Näätänen, 1999).

Recentemente sono stati studiati anche gli effetti di un particolare tipo di rumore impulsivo, ossia quello prodotto dallo scanner della risonanza magnetica funzionale (fMRI), su stimoli linguistici e non linguistici<sup>5</sup>. Come in Shtyrov e coautori (1999), le prime risposte obbligatorie esogene (dai 20 to 100 ms) a frasi corrette e scorrette grammaticalmente risultano soppresse selettivamente nell'emisfero destro dal rumore prodotto dallo scanner dell'fMRI in condizioni di ascolto passivo (Hermann, Oertel, Wang, Maess, & Friederici, 2000). Al contrario, le risposte magnetiche tardive (generate dopo 120-200 ms dall'inizio dello stimolo) sono soppresse simmetricamente sui due emisferi (Hermann *et al.*, 2000). Ulteriori dati mostrano che l'attività cerebrale metabolica misurata dall'fMRI durante un compito di discriminazione fonetica viene attenuata in funzione della durata di esposizione al

<sup>4</sup> Un generatore della MMN è stato individuato anche nella corteccia frontale ed è stato associato all'intervento dell'attenzione che segue un cambiamento nella stimolazione sonora rilevante per il soggetto (cfr. Näätänen, Brattico, & Tervaniemi, 2003).

<sup>5</sup> L'interesse per gli effetti di questo tipo di rumore è legata all'esplorazione delle possibilità di utilizzo di questa rumorosa macchina per lo studio delle funzioni uditive.

rumore proveniente dallo scanner (Shah, Jancke, Grosse-Ruyken, & Muller-Gartner, 1999). Quando questo tipo di rumore (50 dB SPL) viene introdotto durante la stimolazione con suoni musicali (Novitski *et al.*, 2001), non vi sono cambiamenti di ampiezza delle componenti MMN e P3a rispetto alla condizione di silenzio, pure se le componenti P1, N1, P2 e N2 risultano attenuate e rallentate replicando i risultati esposti sopra.

Il rumore maschera le caratteristiche acustiche distinte dei suoni linguistici rendendoli irrecognoscibili. La modifica dell'attività cerebrale in presenza di rumore, se pure di bassa intensità, riportata da Shrytov e colleghi (1998, 1999) può, dunque, essere ricondotta ad un'alterazione dei normali processi di categorizzazione linguistica, o, con le parole di Näätänen (2001), dei meccanismi di collegamento delle tracce neurali sensoriali con le tracce di riconoscimento dei fonemi linguistici depositate nell'emisfero sinistro. L'assenza di tali alterazioni nei dati di Novitski e coautori (2001) ottenuta con suoni musicali supporterebbe tale ipotesi. Laddove gli stimoli sono più strutturati, come nel caso di intere parole o frasi, la ridondanza del flusso linguistico potrebbe aiutare i soggetti a riconoscere i suoni come linguistici, anche quando parte dell'informazione sensoriale è mascherata, permettendo comunque la comunicazione, malgrado i cambiamenti nell'attività cerebrale.

Una spiegazione alternativa dei dati neurofisiologici esposti in rassegna va cercata nel ruolo che strutture aggiuntive nell'emisfero destro possono avere nel permettere i normali processi di percezione linguistica in condizioni di ascolto deteriorate dalla presenza di rumore (cfr. Shrytov, 2000). Ad esempio, meccanismi attentivi possono coinvolgere tali strutture neurali o circuiti cortico-corticali a causa del maggiore sforzo elaborativo. Dati a supporto di questa ipotesi provengono da studi svolti con la tecnica della tomografia ad emissione di positroni (PET) su pazienti con impianti cocleari (Wong, Miyamoto, Pisoni, Sehgal, & Hutchins, 1999). Tali pazienti mostrano una maggiore attivazione della corteccia temporale destra rispetto al controllo quando devono comprendere il significato di una frase, suggerendo che tale attivazione sia dovuta al maggiore sforzo computazionale che essi devono operare per svolgere il compito (Wong *et al.*, 1999). Similmente, l'attivazione dell'emisfero destro aumenta in funzione della complessità dei compiti di comprensione linguistica (Just, 1996).

Un fattore ipoteticamente rilevante è costituito dalla connotazione emotiva negativa dell'ascolto in presenza di rumore. Teorie sull'elaborazione corticale e sottocorticale delle emozioni suggeriscono ruoli differenziati per l'emisfero sinistro per l'elaborazione delle emozioni positive e di quello destro per le emozioni negative (Davidson, Schwartz, Saron, Bennett, & Goleman, 1979; Davidson, 1993). Nonostante non esistano al momento conferme sperimentali del coinvolgimento di strutture legate all'elaborazione dell'emozione nella codifica del cambiamento sonoro registrata dalla MMN, non è da escludere che lo spostamento dell'attività neurale della MMNm verso l'emisfero destro possa essere dovuta alle connotazioni emotive negative del rumore stesso (cfr. anche Pallesen, Brattico, & Carlson, in stampa).

In conclusione, se rumori di forte intensità riducono drasticamente la discriminabilità dei suoni linguistici e non linguistici e rappresentano un danno immediato per lo stato funzionale degli organi acustici periferici, l'esposizione anche solo occasionale a rumori di media e bassa intensità determina una caratteristica modifica dei meccanismi di elaborazione cerebrale dei suoni linguistici, attivando, in particolare, popolazioni neurali dell'emisfero destro. Studi tuttora in corso sono finalizzati a valutare gli effetti dell'esposizione a lungo termine al rumore sul luogo di lavoro (pure se tale rumore risulta essere al di sotto dei livelli di rischio) sull'elaborazione uditiva centrale e in che misura tali effetti siano connessi allo sviluppo dell'ipoacusia da rumore e di altre patologie occupazionali (Kujala, Shtyrov, Winkler, *et al.*, proposto per la pubblicazione; Brattico, Kujala, Näätänen, Ambrosi, Alku, Monitillo, in preparazione).

---

### Ringraziamenti

Gli autori sono grati alla Prof.ssa M. Tervaniemi e alla Dott.ssa T. Kujala per i costruttivi suggerimenti precedenti alla formulazione della rassegna.

**Nota:** i primi due autori hanno contribuito in ugual misura al lavoro.

---

### Bibliografia

- Alberti PW. Noise induced hearing loss. Could be easily prevented. *British Medical Journal* 1992; 304: 522.
- Alho K, Paavilainen P, Reinikainen K, Sams M, Näätänen R. Separability of different negative components of the event-related potential associated with auditory stimulus processing. *Psychophysiology* 1986; 23: 613-623.
- Bergman M, Blumenfeld VG, Cascardo D, Dash B, Levitt H, Margulies MK. Age related decrement in hearing for speech. Sampling and longitudinal studies. *Journal of Gerontology* 1976; 31: 533-538.
- Besson M, Fata F, Requin J. Brain waves associated with musical incongruities differ for musicians and non-musicians. *Neuroscience Letters* 1994; 168: 101-105.
- Binder JR, Rao SM, Hammeke TA, Frost JA, Bandettini PA, Jesmanowicz A, Hyde JS. Lateralized human brain language systems demonstrated by task subtraction functional magnetic resonance imaging. *Archives of Neurology* 1995; 52: 593-601.
- Brattico E, Kujala T, Näätänen R, Ambrosi L, Alku P, Monitillo V. Cortical neuroplastic changes in sound processing following long-term exposure to occupational noise. (In preparazione).
- Burkard R, Hecox K. The effect of broadband noise on human brainstem auditory evoked response. *Journal of the Acoustical Society of America* 1983; 74: 1204-1213.
- Davidson RJ, Schwartz GE, Saron C, Bennett J, Goleman DJ. Frontal versus parietal EEG asymmetry during positive and negative affect. *Psychophysiology* 1979; 16: 202-203.
- Davidson RJ. The neuropsychology of emotion and affective style. In M. Lewis & J.M. Haviland (a cura di), *Handbook of Emotion* (pp. 143-154). New York: Guilford Press. 1993.
- Dirks DD, Morgan DE, Dubno YR. A procedure for quantifying the effects of noise on speech recognition. *Journal of Speech & Hearing Disorders* 1982; 47: 114-123.
- Donchin E, Ritter W, McCallum WC. Cognitive psychophysiology: The endogenous components of the ERP. In E. Callaway, P. Tueting, & S.H. Koslow (a cura di), *Event-Related Brain Potentials in Man* (pp. 349-441). New York: Academic Press. 1978.
- Dubno JR, Dirks DD, Morgan DE. Effects of age and mild hearing loss on speech recognition. *Journal of the Acoustical Society of America* 1984; 76: 87-96.

- Elliott LL. Performance of children aged 9 to 17 years on a test of speech intelligibility in noise using sentence material with controlled word predictability. *Journal of the Acoustical Society of America* 1979; 66: 651-653.
- Escera C, Alho K, Schröger E, Winkler I. Involuntary attention and distractibility as evaluated with event-related potentials. *Audiology and Neuro-Otology* 1999; 5: 151-166.
- Evans GW, Hyhhe S, Bullinger M. Chronic noise and psychological stress. *Psychological Science* 1995; 6: 333-338.
- Evans GW, Bullinger M, Hygge S. Chronic noise exposure and physiological response: A prospective study of children living under environmental stress. *Psychological Science* 1998; 9: 75-77.
- Fernandes C, File SE. Beware the builders: Construction noise changes [-1-4C] GABA release and uptake from amygdaloid and hippocampal slices in the rat. *Neuropharmacology* 1993; 32: 1333-1336.
- Findlay RC. Auditory dysfunction accompanying noise-induced hearing loss. *Journal of Speech & Hearing Disorders* 1976; 41: 374-380.
- Frost JA, Binder JR, Springer JA, Hammek TA, Bellgowan PS, Rao SM, Cox RW. Language processing is strongly left lateralized in both sexes. Evidence from functional MRI. *Brain* 1999; 122: 199-208.
- Hari R, Hämäläinen M, Ilmoniemi RJ, Kaukoranta E, Reinikainen K, Salminen J, Alho K, Näätänen R, Sams M. Responses of the primary auditory cortex to pitch changes in a sequence of tone pips: Neuromagnetic recordings in man. *Neuroscience Letters* 1984; 50: 127-132.
- Hari R, Mäkelä JP. Modification of neuromagnetic responses of the human auditory cortex by masking sounds. *Experimental Brain Research* 1988; 71: 87-92.
- Hermann CS, Oertel U, Wang Y, Maess B, Friederici AD. Noise affects auditory and linguistic processing differently: An MEG study. *NeuroReport* 2000; 11: 227-229.
- Hessel PA, Sluis-Cremer GK. Occupational noise exposure and blood pressure: Longitudinal and cross-sectional observations in a group of underground miners. *Archives of Environmental Health* 1994; 49: 128-134.
- Hämäläinen M, Hari R, Ilmoniemi RJ, Knuutila J, Lounasmaa OV. Magnetoencephalography - Theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of Modern Physics* 1993; 65: 413-497.
- Kristal-Boneh E, Melamed S, Harari G, Green MS. Acute and chronic effects of noise exposure on blood pressure and heart rate among industrial employees: The CORDIS study. *Archives of Environmental Health* 1995; 50: 298-304.
- Kropotov JD, Näätänen R, Sevostianov AV, Alho K, Reinikainen K, Kropotova OV. Mismatch negativity to auditory stimulus change recorded directly from the human temporal cortex. *Psychophysiology* 1995; 32: 418-422.
- Kujala T, Myllyviita K, Tervaniemi M, Alho K, Kallio J, Näätänen R. Basic auditory dysfunction in dyslexia as demonstrated by brain activity measurements. *Psychophysiology* 2000; 37: 262-266.
- Kujala T, Shtyrov Y, Winkler I, Saher M, Tervaniemi M, Sallinen M, Teder-Sälejärvi W, Alho K, Reinikainen K, Näätänen R. Detrimental effects of long-term noise exposure on the central auditory processing in the brain. (Proposto per la pubblicazione).
- Jones CM. Occupational hearing loss and vibration induced disorders. *British Medical Journal* 1996; 313: 223-227.
- Just MA. Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science* 1996; 274: 114-116.
- Lang AH, Nyre T, Ek M, Aaltonen O, Raimo I, Näätänen R. Pitch discrimination performance and auditory event-related potentials. In C.H.M. Brunia, A.W.K. Gaillard, & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological Brain Research* (Vol. 1, pp. 294-298). Tilburg: Tilburg University Press. 1990.
- Lang L. Environmental impact on hearing: Is anyone listening? *Environmental Health Perspectives Supplements* 1994; 102: 924-930.
- Marciniak W, Rodriguez E, Olszowska K, Atkov O, Botvin I, Araujo A, Pais F, Soares Ribeiro C, Bordaleo A, Loureiro J, Prazeres De Sá E, Ferreira D, Castelo Branco MSN, Castelo Branco NAA. Echocardiographic evaluation in 485 aeronautical workers exposed to different noise environments. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 1999; 70: 46-53.
- Martin BA, Sigal A, Kurtzberg D, Stapells DR. The effects of decreased audibility produced by high-pass noise masking on cortical event-related potentials to speech sounds /ba/ and /da/. *Journal of the Acoustical Society of America* 1997; 101: 1585-1599.
- Martin BA, Kurtzberg D, Stapells DR. The effects of decreased audibility produced by high-pass noise masking on N1 and the mismatch negativity to speech sounds /ba/ and /da/. *Journal of Speech, Language, & Hearing Research* 1999; 42: 271-286.
- Mazoyer BM, Tzourio N, Frak V, Syrota A, Murayama N, Levrier O, Salamon G, Dehaene S, Cohen L, Mehler J. The cortical representation of speech. *Journal of Cognitive Neuroscience* 1993; 5: 467-479.
- Mazziotta JC, Phelps ME, Carson RE, Kuhl DE. Tomographic mapping of human cerebral metabolism: auditory stimulation. *Neurology* 1982; 32: 921-937.
- Melamed S, Froom P, Kristal-Boneh E, Gofer D, Ribak J. Industrial noise exposure, noise annoyance, and serum lipid levels in blue-collar workers - The CORDIS study. *Archives of Environmental Health* 1997; 52: 292-298.
- Miller JD. Effects of noise on people. *Journal of the Acoustical Society of America* 1974; 56: 729-764.
- Nabelek AK, Robinson PK. Monaural and binaural speech perception in reverberation for listeners of various ages. *Journal of the Acoustical Society of America* 1982; 71: 1242-1248.
- Novitski N, Alho K, Korzyukov O, Carlson S, Martinkauppi S, Escera C, Rinne T, Aronen HJ, Näätänen R. Effects of acoustic noise of functional magnetic resonance imaging on processing of auditory stimuli and change as revealed by event-related brain potentials. *NeuroImage* 2001; 14: 244-251.
- Näätänen R. *Attention and Brain Function*. Hillsdale (N.J.): Erlbaum. 1992.
- Näätänen R, Lehtokoski A, Lennes M, Cheour M, Huotilainen M, Iivonen A, Vainio M, Alku P, Ilmoniemi RJ, Luuk A, Allik J, Sinkkonen J, Alho K. Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature* 1997; 385: 432-434.
- Näätänen R, Winkler I. The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin* 1999; 125: 826-859.
- Näätänen R. The perception of speech sounds by the human brain as reflected by the mismatch negativity (MMN) and its magnetic equivalent (MMNm). *Psychophysiology* 2001; 38: 1-21.
- Näätänen R, Brattico E, Tervaniemi M. Mismatch negativity (MMN): A probe to auditory perception and cognition in basic and clinical research. In A. Zani & A. Mado Proverbio (a cura di) *The Cognitive Electrophysiology of Mind and Brain* (pp. 343-355). San Diego (CA): Academic Press. 2003.
- Pallesen KJ, Brattico E, Carlson S. Emotional connotations of major and minor musical chords in musically untrained listeners. *Brain and Cognition*. (In stampa).
- Petersen SE, Fox PT, Posner MI, Mintun M, Raichle ME. Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature* 1988; 331: 585-589.
- Plomp R. A signal-to-noise ratio model for the speech-reception threshold of the hearing impaired. *Journal of Speech and Hearing Research* 1986; 29: 146-154.
- Prasher D. New strategies for prevention and treatment of noise-induced hearing loss. *The Lancet* 1998; 352: 1240-1242.
- Rabinowitz PM. Noise-induced hearing loss. *American Family Physician* 2000; 61: 2749-2756.
- Rinne T, Alho K, Alku P, Holi M, Sinkkonen J, Virtanen J, Bertrand O, Näätänen R. Analysis of speech sounds is left-hemisphere predominant at 100-150ms after sound onset. *NeuroReport* 1999; 10: 1113-1117.
- Saad H, Kujala T, Shrytov Y, Toppila E, Starck J, Alku P, Näätänen R. The effects of different types of occupational noises on processing of speech and non-speech sounds: An ERP study. (In preparazione).
- Sams M, Hämäläinen M, Antervo A, Kaukoranta E, Reinikainen K, Hari R. Cerebral neuromagnetic responses evoked by short auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 1985; 61: 254-266.
- Scherg M, Picton T. Separation and identification of event-related potential components by brain electric source analysis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 1991; Suppl. 42: 24-37.
- Shah NJ, Jancke L, Grosse-Ruyken ML, Muller-Gartner HW. Influence of acoustic masking noise in fMRI of the auditory cortex during

- phonetic discrimination. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 1999; 9: 19-25.
- Shestakova A, Brattico E, Huutilainen M, Sams M, Ilmoniemi RJ, Näätänen R. Abstract phoneme representations in the left temporal cortex: Magnetic mismatch negativity study. *NeuroReport* 2002; 13: 1813-1816.
- Shtyrov Y, Kujala T, Ahveninen J, Tervaniemi M, Alku P, Ilmoniemi RJ, Näätänen R. Background acoustic noise and the hemispheric lateralization of speech processing in the human brain: Magnetic mismatch negativity study. *Neuroscience Letters* 1998; 251: 141-144.
- Shtyrov Y, Kujala T, Ilmoniemi RJ, Näätänen R. Noise affects speech-signal processing differently in the cerebral hemispheres. *NeuroReport* 1999; 10: 2189-2192.
- Shtyrov Y. New aspects of the cerebral functional asymmetry in speech processing as revealed by auditory cortex evoked magnetic fields. Helsinki: University of Helsinki. 2000.
- Sperry JL, Wiley TL, Chial MR. Word recognition performance in various background competitors. *Journal of the American Academy of Audiology* 1997; 71: 71-80.
- Spreen O, Boucher A. Effects of low pass filtering on ear asymmetry in dichotic listening and some uncontrolled error sources. *Journal of Auditory Research* 1970; 10: 45-51.
- Stuart A, Philips DP. Word recognition in continuous noise, interrupted noise, and in quiet by normal-hearing listeners at two sensation levels. *Scandinavian Audiology* 1997; 26: 112-116.
- Tervaniemi M, Kujala A, Alho K, Virtanen J, Ilmoniemi RJ, Näätänen R. Functional specialization of the human auditory cortex in processing phonetic and musical sounds: A magnetoencephalographic (MEG) study. *NeuroImage* 1999; 9: 330-336.
- Tiitinen H, May P, Reinikainen K, Näätänen R. Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature* 1994; 372: 90-92.
- Tillman TW, Cahart R, Olsen WO. Hearing aid efficiency in a competing speech situation. *Journal of Speech & Hearing Research* 1970; 13: 789-811.
- Weiss, M, House, A. Perception of dichotically presented vowels. *Journal of the Acoustical Society of America* 1973; 53: 51-58.
- Wernicke C. *Der aphasische Symptomencomplex: Eine psychologische Studie auf anatomischer Basis* (Traduzione inglese in Wernicke's Works on Aphasia: A Sourcebook and Review, Eggert GH, 1977). The Hague: Mouton Publishers. 1874.
- Whiting KA, Martin BA, Stapells DR. The effects of broadband noise masking on cortical event-related potentials to speech sounds /ba/ and /da/. *Ear & Hearing* 1998; 19: 218-231.
- Wilson RH, Zizz CA, Shanks JE, Causey GD. Normative data in quiet, broadband noise, and competing message for Northwestern University Auditory Test No. 6 by a female speaker. *Journal of Speech and Hearing Research* 1990; 55: 771-778.
- Wong D, Miyamoto RT, Pisoni DB, Sehgal M, Hutchins GD. PET imaging of cochlear implant and normal-hearing subjects listening to speech and non-speech. *Hearing Research* 1999; 132: 34-42.
- Zatorre RJ, Evans AC, Meyer E, Gjedde A. Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science* 1992; 256: 846-849.

**Richiesta estratti:** *Elvira Brattico - Cognitive Brain Research Unit, Department of Psychology, P.O. Box 13, FIN-00014, University of Helsinki, Finland - Tel. +358-9-1912 4004, Fax +358-9-1912 2924, E-mail: elvira@cbru.helsinki.fi*