



**Citation:** G. Ramundo (2025)  
Dinamiche neurali del linguaggio:  
ERP e ritmi oscillatori nei processi  
di percezione e produzione  
linguistica. *Qulso* 11: pp. 167-191.  
doi: [http://dx.doi.org/10.13128/  
QUL-SO-2421-7220-18667](http://dx.doi.org/10.13128/QUL-SO-2421-7220-18667)

**Copyright:** © 2025 G. Ramundo. This is an open access, peer-reviewed article published by FirenzeUniversity Press (<https://oaj.fupress.net/index.php/bsfm-qulso/index>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited

**Data Availability Statement:** All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

**Competing Interests:** The Author(s) declare(s) no conflict of interest.

## Dinamiche neurali del linguaggio: ERP e ritmi oscillatori nei processi di percezione e produzione linguistica

*Gloria Ramundo*

Università di Firenze (<[gloria.ramundo@unifi.it](mailto:gloria.ramundo@unifi.it)>)

### *Abstract:*

This contribution offers an integrated perspective of the complex mechanisms and neural circuits involved in language perception and processing. Specifically, it analyzes the main event-related potentials (ERPs) associated with language, including the N1 and MMN components involved in phonetic-phonological encoding, the ELAN, LAN, and P600 components active in morpho-syntactic processing, and the N400 component associated with semantic analysis. While the ERP approach provides a valuable means of investigating the timing of linguistic processes, recent studies emphasize the crucial role of neural oscillations – from delta to gamma rhythms – in supporting language comprehension and production. The overall evidence discussed converges towards the hypothesis of a hierarchical and predictive neural architecture, in which different frequencies cooperate in the construction and unification of linguistic processes at the phonological, syntactic, and semantic levels.

*Keywords:* Neuroscience of language, Event-Related Potentials, Neural oscillations, Electroencephalography, Magnetoencephalography, Phonetic-phonological decoding, Morpho-syntactic processing, Semantic analysis

### *Introduzione*

Far progredire la comprensione del linguaggio implica spiegare come i processi linguistici – quali la decodifica fonetico-fonologica, l’elaborazione morfosintattica e l’analisi semantica – siano implementati nel cervello umano. Le tecniche di neurofisiologia, come l’elettroencefalografia (EEG) e la magnetoencefalografia (MEG), sviluppate nel corso del tempo, consentono di misurare l’attività elettrica e magnetica cerebrale, fornendo informazioni dettagliate sui processi temporali e sui circuiti neurali coinvolti nella percezione e nell’elaborazione linguistica. L’EEG rileva l’attività elettrica cerebrale attraverso elettrodi collocati sullo scalpo, mentre la MEG misura i campi

magnetici generati dall'attività neurale mediante sensori posizionati in un casco a pochi centimetri dal cuoio capelluto. Questo tipo di metodica si basa su potenziali evento correlati (ERPs per l'EEG) e sui campi magnetici evento-correlati (ERMFs per la MEG): onde ottenute dalla media di tutti i segnali temporalmente correlati (*time-locked*) a stimoli visivi, uditivi o di altra natura somministrati ai soggetti durante l'esecuzione di compiti cognitivi specifici. L'idea di fondo è che una media di risposte neurali a stimoli specifici migliora il rapporto segnale-rumore del responso correlato allo stimolo sotto osservazione. Il resto dell'attività neurale compiuta dal soggetto in parallelo all'elaborazione dello stimolo viene messa sullo sfondo così da amplificare il segnale correlato all'evento (stimolo) sotto osservazione (Grimaldi, 2019).

I segnali ERP-ERMF ottenuti sono caratterizzati da specifiche configurazioni chiamate forme d'onda (o componenti), che, generate a 50-1000 ms a partire dallo stimolo, possono avere ampiezze, cioè deflessioni di voltaggio, positive (P) o negative (N), misurate in microvolt (mV), rispetto al segnale di base prestimolo. Le principali componenti identificate durante l'elaborazione linguistica, come P100, N100, P200, P300, N400 e P600<sup>1</sup>, riflettono vari stadi del processamento linguistico, dalla percezione dei suoni alla costruzione di strutture sintattiche e semantiche complesse. Tuttavia, esiti ancor più interessanti sono stati ottenuti dalla scoperta delle fluttuazioni legate agli eventi nell'attività EEG/MEG ritmica e oscillatoria, che, come dimostrato da numerosi studi, offrono una fondamentale finestra sulle dinamiche delle reti neuronali coinvolte nell'elaborazione cognitiva. La variabilità temporale dell'informazione linguistica e le sue proprietà gerarchico-ricorsive rendono il linguaggio, e in modo particolare il parlato, i candidati ideali per questo tipo di indagine.

Nel presente articolo, verrà fornita una panoramica dei complessi meccanismi cerebrali alla base della percezione e della produzione linguistica e in particolare dei processi neurali coinvolti nella decodifica fonetico-fonologica, nell'elaborazione morfo-sintattica e nell'analisi semantica. Particolare attenzione sarà dedicata ai potenziali evento correlati (ERP) che riflettono l'attivazione delle aree cerebrali coinvolte nelle diverse fasi del processamento linguistico. Infine, verrà discusso il ruolo delle oscillazioni cerebrali, evidenziando come la sincronizzazione delle attività neuronali tra diverse aree cerebrali contribuisca alla formazione di una rete funzionale integrata per la percezione e l'elaborazione del linguaggio.

## 2. Decodifica fonetico-fonologica: N1 e Mismatch Negativity (MMN)

La decodifica fonetico-fonologica rappresenta uno dei processi fondamentali della percezione e dell'elaborazione linguistica, in quanto permette al cervello di riconoscere e distinguere i suoni del linguaggio, facilitando la comprensione e la produzione di parole e frasi. Il suono prodotto dall'apparato articolatorio è un'onda sonora che viene percepita e analizzata dall'apparato uditivo. Il processo di percezione acustica inizia con la trasmissione delle vibrazioni sonore attraverso l'orecchio, che si suddivide in tre sezioni: l'orecchio esterno, che riceve le onde sonore; l'orecchio medio, che amplifica e trasmette le vibrazioni agli ossicini; e l'orecchio interno, dove la coclea converte le vibrazioni meccaniche in segnali elettrici grazie alle cellule ciliate. Questi segnali vengono poi trasmessi al nervo uditivo, che li invia alla corteccia uditiva primaria.

<sup>1</sup> La lettera della loro sigla indica la relativa deflessione di voltaggio e il numero rappresenta il tempo in millisecondi (o latenza) in cui queste ultime vengono generate a partire dallo stimolo.

Il cervello deve quindi essere in grado di convertire le proprietà acustiche in rappresentazioni fonetiche e queste ultime in rappresentazioni fonologiche, così da accedere al lessico sulla base della struttura fonologica<sup>2</sup>.

Specifiche risposte neurali misurabili, come la componente uditiva N1 e la Mismatch Negativity (MMN), riflettono i processi cognitivi coinvolti nella decodifica delle caratteristiche fonetiche e fonologiche e forniscono informazioni cruciali sul processo percettivo. La componente N1 è una deflessione negativa che si verifica tra i 70 e i 150 ms dopo la presentazione di uno stimolo uditivo, e riflette l'attività neurale associata alla decodifica delle sue proprietà fonetiche (Näätänen e Picton, 1987). La MMN è una componente che temporalmente segue la N1, ha anch'essa una polarità negativa e viene generata principalmente nelle corteccie uditive circa 150-250 ms dopo l'inizio dello stimolo. Tuttavia, al contrario della precedente, la MMN si ottiene utilizzando un paradigma denominato *oddball* che riflette il grado di discriminazione di uno stimolo raro (deviante) rispetto a una sequenza di stimoli frequenti (standard)<sup>3</sup>. Un esperimento pionieristico ha mostrato che la MMN è in grado di "misurare" le tracce fonologiche permanenti nel cervello. Näätänen *et al.* (1997) hanno infatti rivelato che, quando venivano presentate vocali native e non native a parlanti finlandesi, la MMN generata dalla vocale estone non nativa /õ/ era significativamente più piccola rispetto a quella generata dalle vocali native, indipendentemente dalle differenze acustiche delle vocali devianti. Nella discriminazione di contrasti vocalici nativi, la comparazione fra le informazioni contenute in memoria dello stimolo standard con quelle dello stimolo deviante evidenziano una risposta neurofisiologica diversa se diverse sono le informazioni che vengono comparate.

Quest'osservazione supporta, almeno in parte, il quadro proposto dal modello *Analysis by Synthesis*, secondo il quale la percezione è basata su un processo top-down (fare predizioni e giungere a generalizzazioni) sulla base di un processo bottom-up (comparazione con le evidenze sensoriali in entrata). Secondo questo modello, l'analisi iniziale del segnale acustico sarebbe integrata con le informazioni fonetico-fonologiche già presenti nella memoria a lungo termine; al posto dei comandi il cervello genererebbe delle configurazioni audio-motorie, poi comparate con le informazioni acustico articolatorie contenute nel segnale in entrata (Halle e Stevens, 1962; Stevens, 2002). Quando le configurazioni uditive ipotizzate concordano con il segnale, il processo percettivo genera una rappresentazione categoriale dei suoni in tratti distintivi; nel caso contrario il processo di comparazione procede sino a quando le configurazioni uditive ipotizzate non concorderanno con il segnale spettro-acustico comparato. Questo processo consentirebbe quindi al segnale acustico di essere progressivamente convertito in strutture fonologiche, permettendo l'accesso al lessico e completando il ciclo percettivo.

Fra gli anni Ottanta e Novanta è stato dimostrato che la componente uditiva N1 è caratterizzata da due sottocomponenti temporalmente e tonotopicamente differenziate: la prima generata in modo tangenziale (parallelo) allo scalpo nella corteccia uditiva primaria in entrambi gli emisferi a 85-110 ms dallo stimolo, mentre la seconda in modo (radiale) perpendicolare nella

<sup>2</sup> Occorre dunque evidenziare l'esistenza di tre livelli di rappresentazione dei suoni linguistici: acustico, fonetico e fonologico (Grimaldi, 2019). A un estremo del processo di percezione, nella coclea, vi è una rappresentazione fedele (analogica) del segnale acustico che rimane probabilmente invariata nel corso della vita e non è influenzata dall'apprendimento della lingua nativa; all'estremo opposto, invece, le corteccie uditive sono le sedi delle rappresentazioni fonologiche discrete (digitali) che si connettono con il lessico e sono, invece, correlate con l'acquisizione della lingua madre. In posizione intermedia vi sono infine le rappresentazioni fonetiche che, hanno un ruolo fondamentale non solo a livello percettivo, ma anche della produzione, poiché forniscono le istruzioni da inviare all'apparato vocale per pronunciare i fonemi correttamente.

<sup>3</sup> Per una recente revisione si veda Näätänen *et al.* 2012.

corteccia uditiva secondaria (giro temporale superiore) di sinistra, a circa 150 ms dallo stimolo (Näätänen e Picton, 1987). Queste scoperte neurofisiologiche, in linea con le predizioni del modello *Analysis by Synthesis*, suggeriscono un processo dinamico in cui l'analisi preliminare sarebbe condotta nel sistema uditivo periferico sino ad arrivare alla corteccia uditiva primaria in entrambi gli emisferi, mentre la rappresentazione fonologica avverrebbe nel giro temporale superiore prevalentemente nell'emisfero sinistro.

Ulteriori importanti osservazioni in quest'ambito sono state evidenziate dallo studio di Manca *et al.* (2019), che ha utilizzato un sistema EEG a 64 canali per indagare il processo di elaborazione percettiva del sistema vocalico dell'italiano salentino caratterizzato dalle cinque vocali /i/, /ɛ/, /a/, /o/, /u/<sup>4</sup>. L'utilizzo dell'EEG ha permesso di catturare i diversi livelli di elaborazione percettiva delle vocali evidenziando due distinte fasi che caratterizzano la N1: una fase precoce, che raggiunge la massima ampiezza intorno ai 125-135 ms ed è generata nella corteccia uditiva primaria (BA41<sup>5</sup>) (si veda Fig.1) con una distribuzione tangenziale e una fase tardiva, che raggiunge l'ampiezza massima intorno a 145-155 ms ed è generata più in basso nel giro temporale superiore (corteccia uditiva secondaria, BA42) con una distribuzione radiale. Inoltre, un'osservazione interessante riguardava una certa asimmetria nell'attivazione degli emisferi cerebrali: la fase precoce della N1 mostrerebbe una attività bilaterale, mentre la fase tardiva un'attività prevalentemente nell'emisfero di sinistra.

Lo studio condotto evidenzia l'accensione arealmente differenziata dei neuroni sull'asse laterale-mediale che decodifica e separa il gruppo delle vocali anteriori /i/, /ɛ/, dal gruppo delle vocali posteriori /a/, /o/, /u/; parallelamente, sull'asse anteroposteriore, la vocale bassa /a/ viene separata da tutte le altre vocali e le vocali medie /ɛ/, /o/ sono separate dalle vocali alte /i/, /u/. Infine, sempre sull'asse anteriore-posteriore, le vocali medie e le vocali alte vengono ulteriormente differenziate per il punto di articolazione: /ɛ/ risulta più arretrata di /o/, mentre /i/ più arretrata di /u/. L'interazione con la corteccia uditiva secondaria offrirebbe, invece, una riorganizzazione neuronale sull'asse anteriore-posteriore e permetterebbe anche di mappare meglio la differenziazione in tratti delle vocali alte rispetto alle vocali medie, così che /i/ risulta più in alto di /ɛ/ e /u/ più in basso di /o/. I risultati suggeriscono che la corteccia uditiva umana implementa precocemente una rappresentazione fonemotopica basata su tratti articolatori distintivi. La topografia evidenziata segue due principali assi organizzativi: uno latero-mediale per il tratto [±back] e uno antero-posteriore per il tratto [±high]. Questo pattern supporta l'ipotesi di una gerarchia di elaborazione in cui il cervello discrimina inizialmente le vocali in base al grado di posteriorità, e solo successivamente secondo l'altezza articolatoria.

<sup>4</sup> Il sistema fonologico salentino risulta caratterizzato da tre contrasti fonologici per il tratto di altezza, ovvero da quei tratti che catturano la posizione verticale della lingua nella bocca e che in questo caso oppongono le vocali alte /i/, /u/ alle vocali medie (né alte, né basse) /ɛ/, /o/ e da un contrasto per il tratto di posteriorità che cattura la posizione orizzontale della lingua nella bocca e che oppone le vocali posteriori /a/, /o/, /u/ alle vocali anteriori /i/, /ɛ/. Una particolarità di questo sistema è data dal carattere ridondante del tratto [±arrotondato]: le vocali /o/ /u/ sono entrambe [+posteriori] e [+arrotondate] e la vocale /a/ è caratterizzata solo dal tratto [+basso]: perciò i tratti [+basso] e [-arrotondato] attribuibili alla /a/ sono predicibili (Manca *et al.*, 2019).

<sup>5</sup> Agli inizi del Novecento il neurologo Korbinian Brodmann effettuò una suddivisione della corteccia cerebrale sulla base delle differenze nella forma e nell'organizzazione dei neuroni. Brodmann identificò 52 regioni con funzioni diverse. Sebbene studi successivi condotti mediante tecniche più moderne siano arrivati a ipotizzare circa 200 aree distinte, la maggior parte degli studiosi segue ancora il modello di Brodmann. Per chiarezza e coerenza, nel presente articolo si farà riferimento alle aree della corteccia utilizzando la notazione "BA", seguita dal numero identificativo dell'area, come da tradizione nella neuroanatomia.

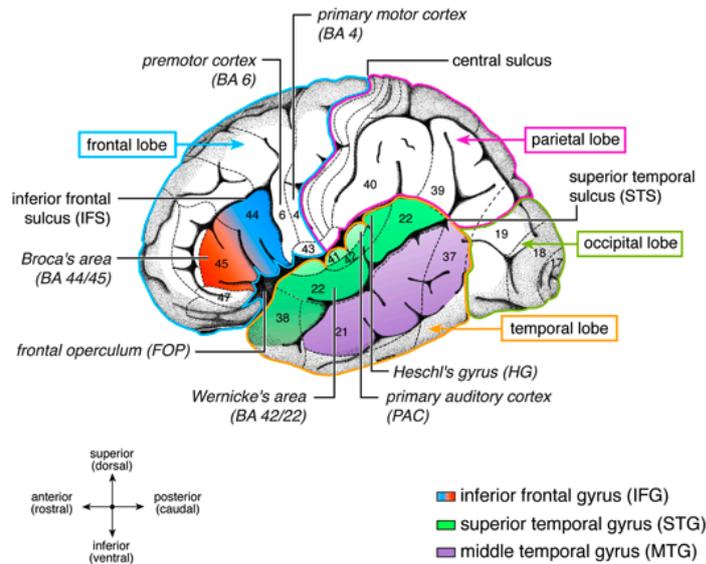


Figura 1. Dettagli anatomici e citoarchitettonici dell'emisfero sinistro. I diversi lobi (frontale, temporale, parietale, occipitale) sono delimitati da bordi colorati. I principali giri cerebrali coinvolti nel linguaggio (IFG – giro frontale inferiore, STG – giro temporale superiore, MTG – giro temporale medio) sono evidenziati da colori distinti. I numeri indicano le aree di Brodmann (BA) rilevanti per il linguaggio. Le etichette di coordinata “superiore/inferiore” indicano la posizione del giro all'interno di un lobo o all'interno di una determinata area di Brodmann. Le coordinate “anteriore/posteriore” indicano la posizione all'interno di un giro. La figura è tratta da Friederici, 2011.

In sintesi, le evidenze discusse contribuiscono ad affinare ulteriormente il modello *Analysis by Synthesis* e dimostrano che l'attività bilaterale della corteccia uditiva primaria e l'attività di sinistra della corteccia uditiva secondaria generano rappresentazioni multiple e parallele delle vocali in termini di tratti distintivi. Questo supporta l'ipotesi di un'organizzazione gerarchica dei tratti fonologici già a partire dalle prime fasi dell'elaborazione acustica. È possibile supporre che il processo predittivo, durante il quale si realizzano delle ipotesi sul tipo di segmenti da categorizzare rispetto al segnale acustico in entrata, si metta in atto nelle vie uditive periferiche, a partire dalla coclea sino ad arrivare in prossimità della corteccia uditiva primaria. A questo livello avverrebbe la comparazione fra le configurazioni uditive motorie estratte dal segnale e le informazioni relative ai tratti distintivi contenuti in memoria. A partire dalla corteccia uditiva primaria si realizzerebbe dunque una prima mappatura grossolana in tratti che verrà portata a termine nel giro temporale superiore di sinistra (Grimaldi, 2019). Un accurato network articolatorio-uditivo risponde sapientemente alla decodifica integrata delle proprietà acustico-articolatorie dei suoni linguistici: durante la percezione dei suoni, i neuroni dell'area motoria si accendono in funzione delle proprietà acustiche degli stimoli allo stesso modo in cui si accendono i neuroni delle aree uditive; durante la produzione risulta, invece, più chiara una mappatura somatotopica in funzione degli articolatori coinvolti nella realizzazione degli stimoli.

### 3. Elaborazione morfosintattica: ELAN, LAN e P600

L'elaborazione morfosintattica, che segue la fase percettiva della decodifica fonetico-fonologica, riguarda il processo con cui il cervello riconosce e analizza la forma delle parole e organizza le intricate connessioni che, tramite un'accurata selezione, legano una parola all'altra. Una svolta decisiva nella definizione delle strutture anatomiche coinvolte nei processi morfosintattici è stata apportata, a partire dagli anni duemila, dall'introduzione delle tecniche di neuroimmagine capaci di rilevare un'attivazione dell'area di Broca e regioni contigue in compiti sintattici sia in produzione che in comprensione con lievi variazioni a seconda delle tecniche e del materiale del disegno sperimentale utilizzato (Tettamanti *et al.*, 2001).

Contrastando le aree attivate per la produzione di singole parole e quelle per le frasi, Indefrey *et al.* (2001) hanno evidenziato l'attivazione dell'opercolo rolandico sinistro adiacente all'area di Broca (BA44), con un grado di attivazione direttamente proporzionale alla complessità delle frasi prodotte. Moro *et al.* (2001) hanno invece evidenziato l'attivazione di un network comune per sintassi e morfologia nella parte profonda del solco circolare, nel giro frontale inferiore sinistro e destro (BA44 e BA45) (si veda Fig. 1), con un'attivazione specifica per la sintassi nel nucleo caudato sinistro e nell'insula. Anziché parlare di una singola specifica area cerebrale, sembrerebbe quindi più ragionevole postulare l'esistenza di un "network di attivazione per la morfo-sintassi" localizzato nelle aree corticali e sottocorticali perisilviane dell'emisfero sinistro, all'interno del quale le operazioni sintattiche più complesse riservano un'attivazione particolare all'area di Broca.

Diversi studi condotti principalmente su soggetti affetti da afasia hanno permesso di indagare i meccanismi neurali che sottendono in particolar modo i processi della flessione, della derivazione e della composizione. L'elettrofisiologia intracranica ha suggerito che gli aspetti flessivi, studiati sia in relazione alla sintassi e i fenomeni di accordo tra le parole (morfosintassi), sia in relazione alle regolarità o irregolarità delle forme di un paradigma (morfofonologia), sarebbero sottesi da porzioni del giro frontale inferiore dell'emisfero di sinistra (compresa quindi l'area di Broca) parzialmente indipendenti ed elaborati in sequenza (Sahin, Pinker e Halgren, 2006). In particolare, la porzione inferiore dell'area di Broca si occuperebbe di uno stadio relativamente tardo dell'elaborazione morfosintattica, mentre a processi più precoci spetterebbe l'elaborazione in modo almeno parzialmente indipendente delle caratteristiche grammaticali che differenziano le varie categorie lessicali, ad esempio i verbi dai nomi (Shapiro *et al.*, 2000).

Ulteriori ricerche sugli errori di pazienti con agrammatismo, in cui affissi morfologici vengono danneggiati mentre le radici lessicali vengono preservate, suggeriscono che basi lessicali e affissi siano elaborati e memorizzati separatamente, supportando l'idea di una decomposizione della parola durante la comprensione e la produzione (Ellis, Miller e Sin, 1983; Semenza *et al.*, 1990). Infine, fenomeni di dissociazione per cui l'elaborazione di alcune classi di parole è conservata mentre quella di altre è colpita dal danno cerebrale correlati all'uso delle tecniche di neuroimmagine rivelano una particolare organizzazione neurale per categorie lessicali<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Il danno alle regioni temporali medie e inferiori dell'emisfero sinistro sarebbe associato a difficoltà nel recupero dei nomi, mentre il danno alle aree frontali inferiori sinistre colpirebbe maggiormente la produzione dei verbi (Damasio e Tranel, 1993; Glosser e Donofrio, 2001). I nomi sarebbero principalmente associati all'attivazione della corteccia temporale media, mentre i verbi mostrerebbero attivazioni in diverse aree, inclusi i lobi temporale, premotoria-prefrontale e parietale superiori. La tecnica dei potenziali evocati è stata inoltre sfruttata per studiare la differenza a livello neurale tra nomi di massa e nomi contabili, osservando l'attivazione di zone più anteriori per i primi rispetto ai secondi (Steinhauer *et al.*, 2001; El Yagoubi *et al.*, 2006; Mondini *et al.*, 2008). Infine, i nomi contabili concreti tenderebbero ad attivare bilateralmente le regioni parietali e temporali mentre i nomi di massa astratti attiverrebbero maggiormente le regioni frontali sinistre (Semenza *et al.*, 2008).

Lo studio delle specifiche componenti elettrofisiologiche e di attivazione cerebrale implicate nell'elaborazione sintattica, scomposte come entità distinte e in gran parte indipendenti, ha permesso di porre in luce le regioni anatomiche e le fasi temporali coinvolte e il loro ruolo di specializzazione funzionale. Le variazioni di potenziale elettrico indotte da frasi con violazioni sintattiche, con ordine errato delle parole, dove è violata la struttura del sintagma, sono state associate al dispiegarsi di due componenti ERP distinte per la latenza temporale e polarità del picco di massima ampiezza. L'onda negativa precoce detta ELAN (*Early Left Anterior Negativity*), con distribuzione anteriore sinistra sullo scalpo e un picco di massima ampiezza tra i 100 e i 300 ms dopo la comparsa della parola target, costituirebbe un correlato elettrofisiologico specifico delle primissime fasi di processazione sintattica dello stimolo linguistico, in cui viene computata la griglia iniziale di dipendenze nell'albero sintattico sulla base della categoria grammaticale di ciascuna parola.

Violazioni dell'accordo tra soggetto e verbo (*Lo studente leggono*) suggerirebbe invece che aspetti di dipendenza sintattica tra le parole della frase, come i morfemi di accordo tra il verbo e i suoi argomenti, sarebbero invece elaborati in una fase più tarda determinando la comparsa della LAN (*Left Anterior Negativity*), un'onda negativa con distribuzione anteriore sinistra sviluppata tra i 300 e i 500 ms dopo la comparsa della parola (Friederici, 2017)<sup>7</sup>. Infine, un'onda positiva chiamata P600, con un picco di latenza più tardivo, tra i 500 e i 1000 ms, è stata specificatamente osservata nelle violazioni di valenza argomentale (*Giulio dormiva la chitarra*), quelle di aspetto verbale (*avrà guardando*) e quelle di caso pronominale (*Anna aspettava io*) (Kemmerer, 2015; Friederici, 2017). In un arco temporale relativamente breve di qualche centinaio di millisecondi, al dipanarsi di parole, frasi e relazioni di dipendenza tra di esse e di integrazione delle informazioni sintattiche, semantiche e prosodiche, avverrebbero dunque i principali processi di computazione della griglia sintattica.

Dal complesso dei dati discussi emerge dunque un quadro piuttosto coerente: le cortecce frontali inferiori svolgerebbero una funzione computazionale predominante nella selezione e codifica della struttura sintattica della frase, operando con le cortecce temporali e parietali alle quali è attribuito un importante ruolo computazionale di rappresentazione e immagazzinamento delle forme lessicali e delle informazioni semantiche e grammaticali a esse associate. Nella codifica della struttura sintattica locale, soprattutto a livello dei sintagmi, una volta attivate nel giro temporale medio posteriore le informazioni lessico-grammaticali verrebbero convogliate nel lobo temporale anteriore, in una regione che si estende dalle porzioni più dorsali del giro e del solco temporale superiori, al giro temporale medio, fino ad includere il polo temporale (BA38). Spetterebbe poi al sistema temporale anteriore emisferico sinistro e la sua interazione con la regione dell'opercolo frontale, integrare le informazioni semantiche e sintattiche di parole adiacenti, computando le rappresentazioni composite dei sintagmi (Kemmerer, 2015). La codifica neurale delle unità sintagmatiche locali e la computazione funzionale delle relazioni sintattiche di dipendenza a lunga distanza risponderebbero ancora una volta alla funzionalità dell'emisfero sinistro, a carico del giro frontale inferiore sinistro (BA44), del lobo temporale posteriore e del giro angolare (BA39).

<sup>7</sup> La componente LAN varia tra lingue e configurazioni sintattiche. Lingue con una morfologia più ricca e un ordine delle parole più libero (come nel caso dello spagnolo o dell'italiano) mostrano una risposta LAN più frequentemente rispetto a lingue con una morfologia più povera e un ordine più rigido (come, ad esempio, l'inglese) (Martorell *et al.* 2023).

#### 4. *Analisi semantica: N400*

Strettamente connessa all'elaborazione morfosintattica, l'analisi semantica riflette i processi cognitivi attraverso i quali il cervello attribuisce significato alle parole, frasi e concetti, integrandoli con il contesto e le conoscenze pregresse. Un filone fondamentale negli studi neurolinguistici sfrutta la metodica ERP per comprendere l'origine dell'anomalia semantica in una frase e il tempo impiegato dal sistema nervoso centrale per rilevarla. Nell'esperimento di Kutas e Hillyard (1980) fu utilizzata la coppia di frasi a. *Lui spalmo sopra il pane caldo un po' di burro* e b. *Lui spalmo sopra il pane caldo un po' di calzini*, dove in b. l'anomalia è generata dall'interpretazione della parola *calzini* nel contesto della frase. Gli autori scoprirono che a circa 300 millisecondi dalla presentazione della parola *calzini*, l'onda ERP della condizione sperimentale (frase b) presentava una consistente deflessione negativa con un picco a 400 millisecondi, di massima intensità sugli elettrodi centro-parietali, che era invece completamente assente nella condizione senza anomalia (frase a). Fu inoltre dimostrato che l'aumento di ampiezza era specifico per parole semanticamente inattese e non si verificava, ad esempio, per presentazioni visivamente inattese (come *La pizza era troppo calda per MANGIARE.*) o per violazioni sintattiche (ad esempio, *Il leopardo usa la sua lunga code...* invece di "coda"). L'onda "differenziale", detta N400, risultava dunque dallo sforzo del sistema cognitivo di riprocessare una parola semanticamente inappropriata responsabile dell'anomalia semantica e innescare una ricerca nella memoria semantica di informazioni che potessero risolverla.

Negli ultimi anni, il concetto della N400 come errore di predizione implicito a livello semantico ha ricevuto crescente attenzione: secondo alcuni modelli il cervello sarebbe, in sostanza, una macchina predittiva che genera previsioni a tutti i livelli di rappresentazione (Kutas e Federmeier, 2011) e le ampiezze N400 rifletterebbero quindi il cambiamento indotto dallo stimolo (singola parola o parola nel contesto di una frase) nello stato di attivazione corrente della memoria semantica, dove tale stato rappresenta stime probabilistiche del significato atteso.

All'interno di questa cornice, recenti ricerche dimostrano che la N400 non sarebbe semplicemente una violazione semantica ma piuttosto un segnale graduale che riflette la quantità di informazione semantica inattesa. Le ampiezze della N400 risultano maggiori non solo per parole semanticamente incongruenti, ma anche per continuazioni plausibili e congruenti di frasi ma con una bassa probabilità di completamento (*cloze probability*) (Kutas e Hillyard, 1984; Federmeier e Kutas, 1999). Questa natura graduale è stata ulteriormente evidenziata da frasi ad alto *constraint* semantico, in cui le aspettative sono fortemente orientate verso una specifica parola (es. "Prendo il caffè con panna e..." → "zucchero") e la presentazione di una parola inattesa (es. "cane") elicitava una N400 di ampiezza elevata. Tuttavia, lo stesso incremento della N400 si osserva anche in frasi a basso *constraint*, in cui non esiste un'aspettativa univoca. Questo suggerisce che non è la violazione di un'aspettativa specifica a generare questa componente, ma piuttosto la quantità di informazione semantica non prevista che una parola introduce nel contesto (DeLong *et al.*, 2005).

Studi ulteriori confermano che le ampiezze della N400 riflettono la quantità di caratteristiche semantiche inattese piuttosto che l'inattesa presenza di parole in quanto tali. In esperimenti come quelli di Federmeier e Kutas (1999), parole semanticamente più simili alla parola attesa elicitarono N400 di ampiezza inferiore rispetto a parole semanticamente distanti, pur essendo entrambe inattese. Questo è supportato anche da evidenze più recenti riguardanti la cosiddetta *semantic cloze probability*, una misura che considera equivalenti parole con significato analogo (come nel caso di "divano" e "sofà") e che predice meglio le variazioni della N400 rispetto alla *lexical cloze probability* (Lau *et al.*, 2008). Queste ampiezze sono inoltre riscontrabili anche in

assenza di frasi complete, ad esempio in coppie di parole oppure con parole isolate. In questi casi, la N400 è modulata da variabili quali frequenza d'uso, concretezza, ricchezza semantica e dimensione del vicinato ortografico. Parole concrete o semanticamente ricche – che attivano un numero maggiore di tratti semantici – evocano N400 più ampi, presumibilmente perché introducono una maggiore quantità di informazione semantica inattesa nel sistema cognitivo (Laszlo e Federmeier, 2011).

Per ciò che invece riguarda l'origine della N400 nel network semantico, secondo la visione integrazionista (Kutas, 1980) questa componente rifletterebbe lo sforzo del sistema cognitivo e in particolar modo della corteccia temporale anteriore, nell'integrare il significato di una frase con il contesto del discorso che precede l'enunciato e la conoscenza del mondo del parlante, codificata nella propria memoria semantica. Lau *et al.* (2008) contrappongono alla visione integrazionista descritta una visione lessicale: l'innescò della N400 non sarebbe un problema di integrazione postlessicale ma un problema di accesso, lessicalmente determinato, alle informazioni semantiche. Riprendendo l'esempio presentato da Kutas e Hillyard (1980) nella condizione sperimentale *Lui spalmò sopra il pane caldo un po' di calzini*, la N400 sorgerebbe nel momento dell'accesso all'elemento *calzini*, la cui attivazione lessicale, non predicibile dal contesto, è resa più difficoltosa per la sua implausibilità. Sebbene non vi sia un accordo definito sulla localizzazione topografica dei processi coinvolti e l'esatta ubicazione del generatore corticale primario della N400 sia controversa (corteccia inferiore frontale o corteccia temporale posteriore), sembra che l'intero sistema si attivi all'unisono e metta a disposizione tutte le risorse per cercare una soluzione ottimale a un problema interpretativo che risiede in un'anomalia semantica.

Secondo il modello più recente elaborato da Pylkkänen (2019) (si veda Fig. 2), il giro angolare (AG) e la corteccia temporale posteriore (PTL) si attiverrebbero precocemente, intorno ai 200 millisecondi, insieme al lobo temporale anteriore sinistro (LATL): la prima area (AG) sarebbe addetta a compiti di elaborazione della struttura argomentale del verbo, la seconda (PTL) a compiti di natura combinatoria, e la terza (LATL) alla composizione concettuale. Solo successivamente, da 300 a 400 millisecondi, sopraggiungerebbe il contributo del giro frontale inferiore sinistro (LIFG) che computa le dipendenze sintattiche e semantiche e il movimento di costituenti e infine quello della corteccia prefrontale ventromediale (vmPFC) alla quale spetterebbero compiti di processamento combinatorio.

Il giro frontale inferiore sinistro (LIFG) parteciperebbe dunque alla costruzione di una struttura frasale, ma anche al processo di selezione di rappresentazioni lessicali, immagazzinate nella corteccia temporale posteriore (PTL) e nel giro temporale medio (MTG), e procedendo anteriormente (da BA44 a BA45 e BA47) anche all'interpretazione compositiva di tali rappresentazioni. La corteccia temporale anteriore si occuperebbe invece della composizione di due concetti, e la creazione di una nuova entità semantica che integri le loro caratteristiche principali. Altre aree, come il giro angolare (AG), la corteccia prefrontale, e la parte posteriore della corteccia temporale, contribuiscono a svolgere compiti differenti, quali la risoluzione di dipendenze sintattico-semantiche introdotte da pronomi, l'interpretazione di morfologia derivazionale di nomi e verbi, la comprensione della struttura argomentale di un verbo e la composizione del predicato con i suoi complementi di varia natura, come nel caso di preposizioni o frasi relative.

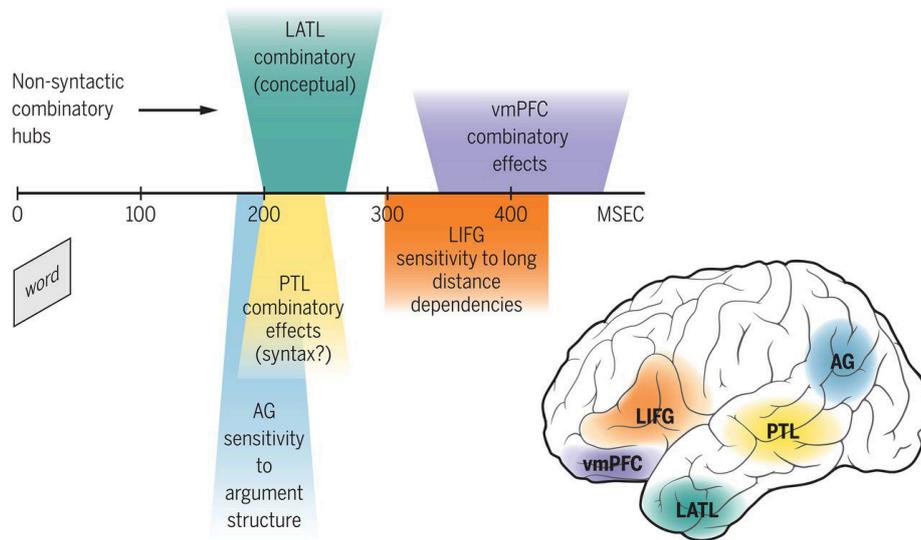


Figura 2. Caratteristiche spaziotemporali della rete combinatoria (Pykkänen, 2019).

L'intero quadro analizzato fornisce l'indubbia evidenza di reti computazionali, implementate in zone diverse del cervello che vengono reclutate da funzioni cognitive complesse interagendo fra di loro. Secondo la teoria di Anne Treisman (1980) il cervello umano disporrebbe di una "mappa generale delle posizioni" (*master map of location*), dove ogni coordinata spaziale presenta un collegamento neuronale a mappe più semplici, ciascuna delle quali, a sua volta, definisce le posizioni di una singola caratteristica. A partire da questa prospettiva, tutte le funzioni cognitive e, in particolar modo linguistiche, sfruttano un network distribuito e composto da diversi centri di elaborazione per uno scopo ben definito. Le regole che stabiliscono relazioni tra diverse reti computazionali e ne determinano il comportamento costituiscono le reti dissociabili funzionalmente, o reti funzionali. Queste ultime dotano popolazioni di neuroni di uno scopo (funzione cognitiva) e rendono espliciti i legami tra l'aspetto neuro-computazionale e quello cognitivo-funzionale del sistema nervoso centrale.

##### 5. N400 e P600: interazioni e dinamiche cognitive tra semantica e sintassi

Per lungo tempo, la letteratura neuroscientifica ha distinto nettamente il ruolo delle componenti ERP N400 e P600 nel processamento linguistico: la N400 è stata tradizionalmente associata alle anomalie semantiche, mentre la P600 è stata considerata un indicatore di violazioni sintattiche. Tuttavia, questa dicotomia è stata progressivamente messa in discussione da evidenze che mostrano una più complessa interazione tra semantica e sintassi nella generazione di queste risposte neurali. Un esempio emblematico è fornito dallo studio di Kim e Osterhout (2005), in cui frasi grammaticalmente corrette ma semanticamente implausibili, come *Il cibo abbondante stava divorando i bambini*, hanno elicitato una robusta P600, piuttosto che la prevista N400. In questi casi, il sistema cognitivo sembrerebbe adottare una strategia di reinterpretazione strutturale – ad esempio, trasformando implicitamente la frase in una forma passiva (*...era divorato dai bambini*) piuttosto che annodarsi in un'interpretazione semanticamente deviante. Questo tipo di risposta è stato definito P600 semantica,

indicando un possibile coinvolgimento di informazioni semantiche nella generazione di una componente tradizionalmente associata alla sintassi.

Per spiegare questa interazione, Kuperberg (2007) ha proposto un modello cognitivo basato su due flussi di elaborazione linguistica (*processing streams*), entrambi sensibili a informazioni di natura sintattica e semantica. Il flusso associato a effetti che modulano la P600 include processi combinatori governati da regole grammaticali, assegna il ruolo tematico (semantica), si occupa della composizione morfo-sintattica e di fronte ad anomalie sintattiche o semantiche innesca una re-interpretazione. Il secondo flusso di elaborazione associato alla N400 è invece basato sulla memoria semantica, si occupa di computare le relazioni associative e categoriali tra parole contenute, controlla e recupera informazioni dalla memoria e interagisce con informazioni lessicali.

In una revisione sistematica, Van Petten e Luka (2012) hanno evidenziato che circa un terzo degli studi sulle anomalie semantiche riportano anche un effetto P600, una variabilità attribuibile sia alle caratteristiche dei materiali sperimentali che a differenze individuali tra i partecipanti. A tal proposito, studi su campioni ampi hanno mostrato una distribuzione bimodale delle risposte P600: circa la metà dei soggetti mostrava un incremento della P600 di fronte ad anomalie semantiche, mentre l'altra metà evidenziava un pattern opposto (Kos *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2018). Una delle interpretazioni più accreditate propone che la P600 rifletta processi controllati di rianalisi sintattica e riparazione strutturale, coinvolti nell'integrazione di rappresentazioni multiple e potenzialmente incongruenti in memoria di lavoro (Friederici e Kotz, 2003; Tanner *et al.*, 2017; Tanner, 2019). Studi che combinano eye-tracking ed EEG hanno rilevato una correlazione tra regressioni oculari prolungate — indicative di difficoltà interpretative — e un aumento dell'ampiezza della P600, anche in assenza di violazioni esplicite (Dimigen *et al.*, 2007; Metzner *et al.*, 2017).

Parallelamete, risultati recenti hanno mostrato che la componente P600 è modulata da fattori di natura semantica e pragmatica. È stato osservato che aspettative semantiche disattese, anomalie semantiche invertite, o incongruenze a livello discorsivo possono elicitare risposte P600, anche in frasi grammaticalmente corrette. Ciò accade, ad esempio, nel trattamento di contenuti retorici (metafore, iperboli, giochi di parole), suggerendo una più ampia funzione della componente P600 nella revisione di rappresentazioni complesse e non solo nella riparazione sintattica (Friederici, 2002, 2017; Tanner *et al.*, 2017; Regel *et al.*, 2014). In tal senso, la P600 si configura come una risposta generale a incongruenze di alto livello, che richiedono un'integrazione di informazione sintattica, semantica e pragmatica.

Inoltre, la P600 che segue la N400 può essere interpretata come un processo controllato e attentivo, attivato quando l'interpretazione iniziale della frase non conduce a una rappresentazione coerente e univoca. L'ampiezza e la latenza della P600 risultano influenzate da fattori cognitivi come la rilevanza del compito, l'attenzione sostenuta e la capacità della memoria di lavoro. A supporto di questa interpretazione, è stato osservato che la P600 (ma non la N400) è attenuata o assente in condizioni di *attentional blink*, ed è modulata dalla dilatazione pupillare, indice fisiologico della risposta noradrenergica e dell'attenzione focalizzata. Queste evidenze suggerirebbero che la N400 rifletta un processo più automatico e sensibile al contesto semantico, mentre la P600 implichi un processo più controllato e attentivo, attivato quando il sistema linguistico deve "riparare" o reinterpretare una frase (Rolke *et al.*, 2001; Joshi *et al.*, 2016).

Ulteriori conferme del ruolo multifattoriale della P600 provengono da studi sulla sintassi dell'italiano. Grimaldi (2019), ad esempio, ha analizzato le Wh-questions ambigue del tipo Which-N, in cui il sito di estrazione può essere il soggetto o l'oggetto. I dati ERP indicano che le domande oggetto, che richiedono catene sintattiche più complesse, elicitano una P600 maggiore rispetto a quelle soggetto, soprattutto nella regione del giro temporale superiore sini-

stro, tra 760 e 1040 ms. Questo effetto è coerente con l'ipotesi che la P600 rifletta un costo di ristrutturazione sintattica e supporta il *Minimal Chain Principle* (De Vincenzi, 1991), secondo cui il *parser* tende a preferire interpretazioni che minimizzino la complessità delle catene di dipendenza sintattica. Tali effetti sono analoghi a quelli osservabili nelle frasi *garden-path*, in cui l'interpretazione iniziale necessita una revisione sintattica. Tuttavia, l'assenza di una lunga negatività nei dati ERP suggerisce che la rianalisi non comporti un carico cognitivo elevato in termini di comprensione globale della frase, ma rifletta una ristrutturazione efficiente e mirata.

Attualmente, due principali modelli computazionali tentano di spiegare la P600. Il primo modello interpreta questa componente come riflesso dell'integrazione semantica: ipotesi problematica poiché la sua ampiezza non varia sistematicamente con la *cloze probability*, che dovrebbe influenzare direttamente la difficoltà di integrazione semantica e che dovrebbe modulare gradualmente una componente che la riflette. Il secondo modello simula la P600 come segnale di errore predittivo di sequenza, ipotesi compatibile con le violazioni sintattiche, ma meno adatta a spiegare effetti legati al significato. Entrambi i modelli trascurano il legame tra la P600, i processi di rianalisi e il controllo attentivo, lasciando aperti numerosi interrogativi sui meccanismi cognitivi sottostanti. Nel complesso, le evidenze comportamentali e neurofisiologiche indicano che la P600 non può essere interpretato semplicemente come un indice di violazione sintattica, ma piuttosto come un marcatore di ristrutturazione cognitiva, attivato da operazioni complesse di interpretazione e revisione strutturale e semantica. Tale prospettiva contribuisce a una visione più integrata dell'elaborazione linguistica, in cui la sintassi non è un modulo isolato ma interagisce dinamicamente con altre dimensioni del linguaggio.

Le evidenze emerse negli ultimi anni indicano che la N400 e la P600 non vadano più considerate come marcatori esclusivi della semantica e della sintassi, rispettivamente. Piuttosto, esse rappresentano manifestazioni complementari di un processo di costruzione del significato che è intrinsecamente complesso, dinamico e interattivo. La N400 appare principalmente associata a meccanismi semantici di tipo automatico e fortemente influenzati dal contesto, mentre la P600 riflette processi più controllati, dipendenti dall'attenzione, coinvolti nella rianalisi e nell'integrazione delle informazioni linguistiche. Superare la rigida dicotomia tra semantica e sintassi permette di comprendere più a fondo come il cervello costruisca rappresentazioni linguistiche coerenti, adattandosi in modo flessibile al contesto e alle aspettative.

## 6. Oltre gli ERP: i ritmi del linguaggio

La metodica ERP ha, senza dubbio, aggiunto tasselli fondamentali allo studio del funzionamento delle basi neurali del linguaggio. Tuttavia, negli ultimi anni, molti studiosi hanno indagato sulla tipica forma oscillatoria dell'attività elettromagnetica dei neuroni, scoprendo che alcuni tratti delle onde ERP derivano dal cambiamento dinamico del ciclo oscillatorio di base che riflette l'attività cognitiva (Başar *et al.*, 1999). L'attività neuronale di base non può essere considerata semplice "rumore di fondo", da eliminare attraverso la media di tutti i segnali evento-correlati allo stimolo, ma piuttosto attività intrinseca ai processi cognitivi temporalmente correlata (*time-locked*) agli stimoli. Nonostante le analisi nel dominio del tempo offrano il grande vantaggio di un'elevata risoluzione temporale, gli approcci nel dominio della frequenza sono meno rigidi poiché incorporano la dimensione dell'attività oscillatoria, catturano l'attività neurale bloccata nel tempo (allo stesso modo degli ERP) ma non necessariamente bloccata in fase a un evento specifico e decompongono il segnale in componenti multipli e indipendenti specifici della frequenza o oscillazioni neurali (si veda Fig. 3). La natura variata delle analisi oscillatorie permette di considerare i processi paralleli che risultano, ad esempio, mappati su

componenti oscillatorie distinte ma temporalmente sovrapposte e consente, inoltre, lo studio di componenti a frequenza veloce ( $> 10$  Hz) che in genere non sono visibili (o sono state filtrate) nelle analisi ERP.

Fin dai primi tentativi di registrazioni neurofisiologiche negli esseri umani, la ritmicità è stata riconosciuta come una caratteristica fondamentale dell'attività neurale<sup>8</sup>. La grande scoperta che il cervello umano genera spontaneamente un'attività ritmica ha lentamente seminato il campo delle neuroscienze, favorendo l'ipotesi che gli insiemi neurali possano operare come oscillatori. Un oscillatore è un sistema dinamico capace di generare uno spostamento periodico tra stati attorno a una misura centrale che funge come punto di equilibrio. Una proprietà fondamentale di un oscillatore è il periodo  $T$ , ovvero l'intervallo di tempo tra due cicli successivi. Questo può essere espresso anche in termini di frequenza ordinaria ( $f = 1/T$ ) o frequenza angolare ( $\omega = 2\pi/T$ ). Ogni sistema ha una propria frequenza naturale (o *eigenfrequency*), determinata dalle sue caratteristiche fisiche intrinseche. La fase ( $\varphi$ ) descrive la posizione di un sistema all'interno di un ciclo oscillatorio e aumenta di  $2\pi$  per ogni ciclo completato (Tavano *et al.*, 2023).

Il comportamento di un oscillatore è definito dall'evoluzione nel tempo dei suoi parametri dinamici, che tracciano una traiettoria chiusa nello spazio delle fasi, detta ciclo limite (*limit cycle*). Questa configurazione garantisce stabilità: anche in presenza di piccole perturbazioni, il sistema tende a ritornare spontaneamente alla propria frequenza e forma originarie. Due oscillatori possono interagire tramite accoppiamento (debole o forte), cioè una connessione tra le loro frequenze  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ . Se l'interazione è moderata, i due sistemi possono regolare reciprocamente i propri ritmi fino a stabilire una frequenza comune: questo fenomeno prende il nome di *entrainment* o blocco di fase (*phase locking*), e i due oscillatori risultano sincronizzati. Quando la differenza di fase è minima, si parla di sincronia in fase (*in-phase*); se la fase è opposta, si ha sincronia in controfase (*anti-phase*). Tuttavia, se l'accoppiamento è eccessivamente forte, i due sistemi si fondono in un'entità unica e non più decomponibile, perdendo la propria individualità dinamica (Tavano *et al.*, 2023). Le oscillazioni riflettono infatti i cicli di eccitabilità neurale e definiscono un codice neurale temporale per la funzione cerebrale, oltre a un codice di frequenza di picco che indica l'attivazione di un neurone in risposta a uno stimolo (Tavano *et al.*, 2023)<sup>9</sup>. Le oscillazioni neurali o onde cerebrali sono modelli ritmici o ripetitivi di attività neurale che si realizzano nel sistema nervoso centrale ed emergono dall'attività discreta e collettiva di neuroni che, sincronizzati e comunemente impegnati in un compito, operano come una rete funzionale coesa (Chalk *et al.*, 2017).

Durante la registrazione delle oscillazioni neurali tramite elettroencefalografia (EEG) o magnetoencefalografia (MEG), l'attenzione è posta sul ruolo dei neuroni sincronizzati che agiscono come un singolo sistema dinamico. L'allineamento della fase neurale alla fase di stimolo avviene tramite la sincronizzazione dei ritmi cerebrali con i ritmi esterni, i quali provocano una

<sup>8</sup> Il 6 luglio 1924 Hans Berger registrò per la prima volta la generazione di attività neurale in un ragazzo diciassettenne e isolò due componenti oscillatorie spontanee: una più lenta – tra 8 e 13 Hz – chiamata “onda alfa” e una più veloce – a circa 20 Hz – denominata “onda beta”. Successivamente, la preziosa ricerca innovativa nel campo della neurofisiologia animale ha fornito diverse prove di comportamenti associati a una certa ritmicità. Pittendrigh (1957) ha infatti studiato le dinamiche dello stadio pupale della *Drosophila* dimostrando la loro forte correlazione con i ritmi circadiani sincronizzati con i cicli luce-buio. Aschoff (1965) ha inoltre confermato che tali oscillazioni circadiane, associati al comportamento degli uccelli, registrano anche cambiamenti gradualmente nella luce. Tali osservazioni sulla ritmicità sono poi state estese agli esseri umani dimostrando come una fitta trama di oscillazioni neurali modelli la percezione e il comportamento umano su scale temporali diverse (dai millisecondi ai giorni) (Aschoff, 1967)

<sup>9</sup> I livelli di organizzazione dell'attività oscillatoria comprendono la microscala (attività di un singolo neurone), la mesoscala (attività di un gruppo locale di neuroni) e la macroscala (attività di diverse regioni cerebrali).

fluttuazione ritmica nell'eccitabilità degli insiemi neurali che li porta a sincronizzarsi (*neural entrainment*), affinché la porzione più informativa dello stimolo esterno possa essere elaborata in modo ottimale all'interno delle fasi ad alta eccitabilità del ritmo interno (Schroeder e Lakatos, 2009).

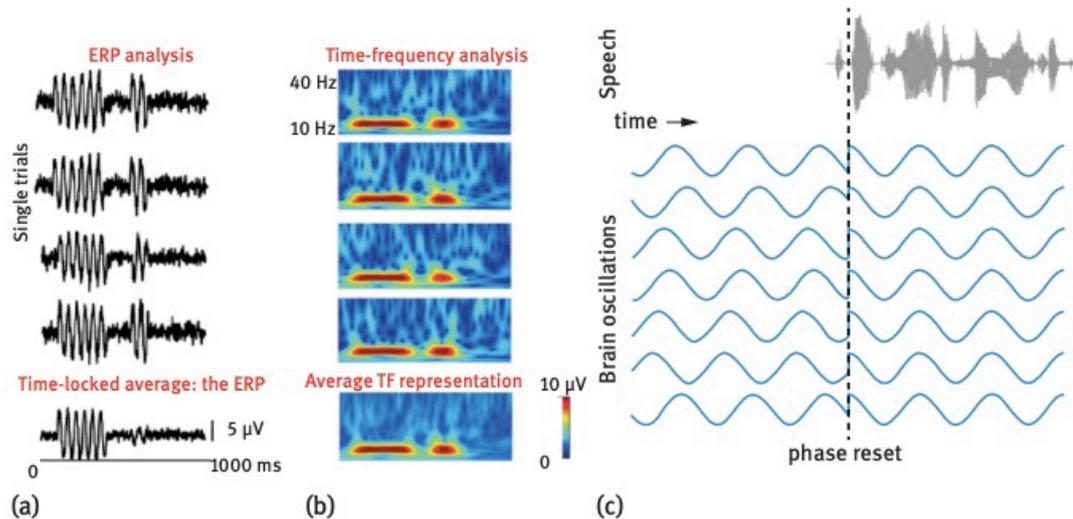


Figura 3. Differenza tra attività bloccata in fase (evocata) e attività non bloccata in fase (indotta).

La figura (a) illustra tracciati EEG di singole prove che mostrano due risposte evento-correlate consecutive caratterizzate da un aumento di ampiezza a 10 Hz. La prima risposta è bloccata in fase rispetto al punto di riferimento temporale ( $t = 0$ ), e per questo motivo è chiaramente rappresentata e visibile nella media del potenziale evento-correlato (ERP). La seconda risposta è sincronizzata temporalmente, ma non bloccata in fase rispetto a  $t = 0$ , e di conseguenza viene in gran parte attenuata o cancellata nella media dell'ERP. La figura (b) illustra le rappresentazioni tempo-frequenza (TF) di ciascuna singola prova, in cui i colori rossi indicano l'aumento di ampiezza a 10 Hz. A differenza dell'ERP, la media delle rappresentazioni TF include sia le risposte bloccate in fase che quelle non bloccate in fase. La figura (c) rappresenta l'azzeramento (reset) della fase delle oscillazioni neurali in corso in seguito a uno stimolo esterno. Prima dell'evento-stimolo, le fasi delle oscillazioni sono casuali, ma in seguito allo stimolo risultano allineate. Le figure (a) (b) (c) sono tratte da Pelle e Davis (2012).

La relazione tra oscillazioni neurali e stimoli esterni risulta, quindi, modellata dal tipo di sistema neurale che riceve la stimolazione e dal tipo di stimolazione esterna. Negli studi psicofisiologici e neurofisiologici, l'attività oscillatoria neurale è stata classificata in cinque bande principali: delta (0,5-3,5 Hz), theta (4-7,5 Hz), alfa (8-13 Hz), beta (14-30 Hz), ulteriormente suddivisa in beta 1 (14-20 Hz) e beta 2 (21-30 Hz), e infine gamma (oltre i 30 Hz), scompo-

nibile, a sua volta, in gamma bassa (30-80 Hz) e gamma alta (90-150 Hz)<sup>10</sup>. Queste oscillazioni non agiscono in modo indipendente, ma interagiscono tra loro attraverso meccanismi di accoppiamento cross-frequenziale (*cross-frequency coupling*). Le oscillazioni a frequenza molto bassa coinvolgono ampie reti cerebrali cortico-sottocorticali, regolando cicli di coinvolgimento neuronale (come nel caso delle onde lente del sonno che prolungano l'iperpolarizzazione dei neuroni talamocorticali (Steriade, 2006). Le oscillazioni delta, theta, alfa e beta sembrano invece più adatte a selezionare segnali (*gating*) e trasmettere informazioni tra aree corticali (come l'ippocampo e la corteccia associativa per la banda theta (Mizuseki *et al.*, 2009); le reti talamocorticali per la banda alfa (Amzica e Lopes de Silva, 2011) e il feedback relay per le bande alfa e beta (Michalareas *et al.*, 2016). Le oscillazioni gamma sarebbero invece principalmente coinvolte nell'elaborazione delle informazioni all'interno di ensemble neuronali locali.

I fenomeni di sincronizzazione e desincronizzazione riflettono rispettivamente i processi di accoppiamento e disaccoppiamento tra reti funzionali distribuite nelle aree corticali e sottocorticali del cervello (Varela *et al.*, 2001). Il reciproco scambio di segnali tra reti corticali e cortico-talamiche, unitamente ai processi di plasticità sinaptica, permette l'emergere di una ricorsività neurale, fondamentale per la categorizzazione degli input sensoriali, la generazione di comandi motori e l'esecuzione di funzioni cognitive complesse. Tali interazioni rappresentano un elemento cruciale per comprendere l'organizzazione temporale e funzionale delle dinamiche neurali che supportano il linguaggio naturale. Sebbene non perfettamente ritmico, quest'ultimo possiede regolarità statistiche corrispondenti a ritmi riconoscibili (o bande di frequenza) che fluttuano sulla base di diverse scale temporali. L'interesse crescente nella ricerca sui ritmi oscillatori ha permesso di fare luce sul loro ruolo nel sistema linguistico, e più specificatamente nella percezione uditiva, nella decodifica fonetico-fonologica, nell'elaborazione morfo-sintattica e nell'analisi semantica.

### 7. Ritmi e implicazioni per la decodifica fonetico-fonologica

Nel dominio della ricerca sul linguaggio, un'evidenza fondamentale riguarda la corrispondenza diretta tra le unità temporali presenti nel linguaggio e le unità oscillatorie corticali attraverso cui il cervello converte l'input linguistico in rappresentazioni mentali. Le unità fonetico-fonologiche, della durata di circa 20-50 ms, risulterebbero associate ai ritmi gamma (> 50 Hz) e beta (~15-30 Hz); sillabe e parole, della durata di circa 250 ms ai ritmi theta, mentre sequenze di sillabe e parole inserite in una frase, della durata media di 500-2000 ms, ai ritmi delta (< 3 Hz) (Ghitza, 2011). Tuttavia, mettere in relazione le informazioni temporali fornite dal parlato, pressoché periodico, e la segmentazione di unità linguistiche organizzate su distinte scale temporali, come i fonemi (gamma bassa, ~25-40 Hz), le sillabe (~4-7 Hz) e i tratti prosodici (~0,5-2 Hz) rappresenta una problematica dei modelli di percezione e comprensione del linguaggio. Secondo il modello *Tempo* proposto da Ghitza (2011), la comprensione del parlato sarebbe ottimale quando il ritmo vocale si allinea con le oscillazioni theta (~6-12 Hz), suggerendo che i ritmi cerebrali influenzano la codifica delle unità linguistiche. L'elaborazione del parlato avverrebbe invece su più livelli: l'elaborazione di caratteristiche fonetiche che variano

<sup>10</sup> Piuttosto che come indici assoluti, i confini tra le bande rappresentano un pratico criterio per interpretare i risultati scientifici. È inoltre possibile che, sebbene a livello corticale corrispondano a bande di frequenza distinte, alcuni processi neurali condividano un comune denominatore sottocorticale, come nel caso dei ritmi corticali theta e alfa, associati a diverse sottobande di oscillazioni theta dell'ippocampo, una più bassa (~3 Hz) e una più alta (~8-10 Hz), coinvolte rispettivamente nella cognizione spaziale e non spaziale (Goyal *et al.*, 2020).

rapidamente sarebbe collegata all'attività della banda gamma ad alta frequenza, l'elaborazione di sillabe e parole alle oscillazioni theta più lente e l'elaborazione del discorso a livello della frase alle oscillazioni ancora più lente appartenenti alla banda delta. A partire da queste osservazioni, i modelli di percezione del parlato che considerano solo le proprietà del segnale derivato dall'acustica sarebbero quindi incompleti poiché il fondamentale ruolo del tempo di decodifica durante l'accesso alla memoria, dettato dalle oscillazioni neuronali, dovrebbe essere incorporato.

Uno studio ECOG ha inoltre evidenziato la relazione tra i ritmi gamma e i tratti distintivi del linguaggio, mostrando che la corteccia uditiva secondaria (giro temporale superiore, BA22) è sensibile a specifiche caratteristiche fonetiche: gli elettrodi collocati nel giro temporale superiore catturano l'attivazione selettiva e gerarchica di gruppi di neuroni in funzione del punto e soprattutto del modo di articolazione delle principali consonanti e vocali<sup>11</sup>. Le proprietà del segnale spettro-temporale appaiono quindi decodificate in una mappatura neurale che genera una rappresentazione fonologica discreta, la quale a sua volta richiama con forza quella in tratti distintivi. Parallelamente, uno studio condotto tramite l'EEG rivela che i ritmi delta e theta sono coinvolti nell'elaborazione di vocali e consonanti (Di Liberto *et al.*, 2015). I ritmi theta sembrerebbero favorire la categorizzazione sillabica, mentre i ritmi delta si attiverrebbero durante la combinazione delle parole in frasi, suggerendo un ruolo nei processi prosodico-intonativi.

In breve, la modulazione funzionale delle basse frequenze theta e delle alte frequenze gamma controllerebbe la decodifica fonetico-fonologica, mentre la riorganizzazione dei ritmi delta e la loro sincronizzazione con i ritmi theta e gamma rifletterebbe l'elaborazione di processi combinatori che sovrintendono all'unificazione dei diversi livelli linguistici (inclusi il livello prosodico-intonativo) attraverso una mappatura neuronale multidimensionale. In un primo momento, questa prospettiva secondo la quale i ritmi oscillatori agiscano direttamente sul segnale spettro-temporale per decodificarne le proprietà e generare rappresentazioni discrete farebbe pensare che, al contrario di quanto proposto dal modello *Analysis by Synthesis*, presentato e discusso nel primo paragrafo, il cervello non realizzi alcuna predizione in merito alle proprietà acustico-articolatorie dei suoni contenute nel segnale in entrata. Tuttavia, è fondamentale precisare che la sincronizzazione dei ritmi oscillatori si consolida solo in seguito a processi di apprendimento e memorizzazione. Inoltre, durante il processo di discriminazione di coppie di sillabe (consonante-vocale), i ritmi theta sono inizialmente attivi solo nella corteccia uditiva primaria di sinistra per poi aumentare leggermente e trovarsi lateralizzate, questa volta, nel giro temporale superiore di sinistra, sincronizzate con i ritmi gamma (Morillon e Schroeder, 2015).

Questa relazione gerarchica fra i ritmi theta e gamma potrebbe rappresentare un indice del processo che permette la decodifica del segnale acustico in rappresentazioni fonologiche attraverso una mappatura multidimensionale in tratti distintivi nelle cortecce uditive; è proba-

<sup>11</sup> Per ciò che riguarda le consonanti, una mappatura macroscopica offre la divisione in due classi distinte: da un lato gruppi di neuroni elaborano le occlusive, le fricative e le affricate mentre dall'altro gruppi di neuroni si occupano delle laterali, le nasali, le vibranti e le approssimanti. Più specificatamente, all'interno del primo gruppo alcuni neuroni si attivano per la decodifica delle occlusive mentre altri sono più sensibili al punto di articolazione separando le velari /g/ e /k/ dalle dentali /d/ e /t/ e dalle labiali /p/ e /b/. Parallelamente, alcuni neuroni sembrano deputati a elaborare le consonanti sorde e altri quelle sonore. In aggiunta, ulteriori cluster di neuroni diversi si accendono in modo selettivo per decodificare le fricative sonore /z/ e /v/ e separarle dalle fricative sorde /s/, /ʃ/, /θ/, /f/ mentre un ultimo gruppo appare deputato a differenziare le nasali /n/, /m/ e /ŋ/. Nel caso invece delle vocali, la decodifica risultante è sufficiente per differenziare le vocali basse posteriori dalle vocali basse anteriori e da quelle alte anteriori. I risultati discussi suggeriscono dunque uno spazio multidimensionale, che, controllato dai ritmi gamma, sembra sovrintendere alla decodifica dei parametri acustico-articolatori del parlato e alla loro rappresentazione in gerarchie, soprattutto in funzione del modo di articolazione.

bile, infatti, che le oscillazioni neurali di queste due particolari bande nelle corteccie uditive di destra e di sinistra abbiano funzioni differenti. I ritmi theta attivati a destra potrebbero essere deputati all'elaborazione del livello sillabico, mentre la sincronizzazione a sinistra dei ritmi theta e gamma si occuperebbe di garantire la modulazione di rappresentazioni più astratte nel giro temporale superiore (Grimaldi, 2019). Il processo dinamico descritto confermerebbe l'ipotesi secondo cui il cervello formula delle previsioni sul segnale in entrata e le compara con le informazioni contenute in memoria rispetto al sistema linguistico appreso, proprio come previsto dal modello *Analysis by Synthesis* precedentemente discusso. Tali evidenze convergono nell'ipotesi di un network articolatorio-uditivo funzionale alla decodifica integrata delle proprietà acustico-articulatorie dei suoni linguistici.

### 5.2 Oscillazioni cerebrali tra sintassi e semantica: una visione integrata

La varietà dei metodi basati sull'analisi in dominio di frequenza consente di esaminare l'attività neurale durante l'elaborazione di intere frasi, facilitando l'utilizzo di paradigmi sperimentali in grado di fornire importanti evidenze nei domini morfo-sintattico e semantico. In particolare, ricerche recenti hanno evidenziato uno stretto legame tra le operazioni sintattiche e le oscillazioni a bassa frequenza della banda delta. In questi studi viene spesso impiegato il paradigma del *frequency tagging*, basato sull'osservazione secondo la quale l'attività neurale oscilla in risposta alle proprietà ritmiche di stimoli periodici, sincronizzandosi a eventi esterni presentati a frequenza regolare.

Nello studio pionieristico MEG/ECOG di Ding *et al.* (2016), partecipanti di lingua cinese e inglese sono stati esposti a sequenze continue di parole monosillabiche (cinesi o inglesi), organizzabili in due frasi semplici o in un periodo composto. I risultati hanno evidenziato una forte correlazione tra l'attività neurale nella banda delta e le strutture linguistiche: le parole (4 Hz), le frasi (2 Hz) e i periodi (1 Hz). Sorprendentemente, i picchi nello spettro di potenza relativi a frasi e periodi comparivano bilateralmente solo quando le sequenze venivano ascoltate nella lingua madre dei partecipanti. Questi risultati suggeriscono che le oscillazioni in banda delta supportano l'elaborazione linguistica basata sulla struttura, raggruppando selettivamente le parole in unità sintattiche coerenti. Inoltre, partendo dal presupposto che le frasi sono gerarchicamente raggruppate in periodi, l'effetto di sincronizzazione osservato a più livelli annidati sembrerebbe rispecchiare proprio l'organizzazione gerarchica delle strutture sintattiche.

Un aspetto centrale del dibattito contemporaneo riguarda proprio la funzione delle oscillazioni neurali nella costruzione della struttura sintattica. Due orientamenti teorici principali sono emersi: da un lato, le teorie della segmentazione (*chunking*), secondo cui le oscillazioni — soprattutto nella banda delta — suddividerebbero l'input linguistico in unità sintattiche rilevanti secondo una scansione temporale regolare; dall'altro, le teorie dell'integrazione, che attribuiscono alle oscillazioni un ruolo attivo nel collegare elementi linguistici anche distanti nel tempo e nello spazio, sostenendo la costruzione di strutture gerarchiche attraverso l'interazione tra bande di frequenza diverse.

Sebbene la visione segmentativa sia stata inizialmente supportata da studi come quello di Ding *et al.* (2016), essa appare problematica se confrontata con le proprietà effettive del linguaggio naturale. In particolare, la grande variabilità nella lunghezza dei costituenti, la presenza di dipendenze non contigue e la struttura gerarchica della sintassi rendono poco plausibile l'ipotesi di una corrispondenza stabile tra durata fisica delle unità linguistiche e cicli oscillatori. Al contrario, la prospettiva integrativa propone che l'interazione tra frequenze — ad esempio

l'annidamento di attività gamma in cicli theta o delta — consenta di rappresentare le strutture sintattiche in modo flessibile, senza richiedere un allineamento rigido con l'input temporale.

Secondo tale visione, le oscillazioni non delimitano passivamente le unità linguistiche, ma coordinano attivamente l'attivazione di insiemi neuronali distribuiti, facilitando la costruzione di relazioni grammaticali anche a distanza. Ciò apre la strada a modelli neurocognitivi della sintassi che superano l'idea di segmentazione ritmica, abbracciando invece una dinamica temporale non lineare e strutturata. In questo quadro teorico si collocano modelli come DORA (*Discovery of Relations by Analogy*, Doumas *et al.*, 2008) e VS-BIND (*Vector-Symbolic Sequencing of Binding Instantiating Dependencies*, Calmus *et al.*, 2023). Il primo utilizza schemi di asincronia temporale per rappresentare ruoli sintattici e argomenti attraverso interazioni cross-frequenziali; il secondo impiega una codifica simbolico-vettoriale per legare parole e posizioni all'interno di strutture annidate, sfruttando anch'esso il nesting tra bande gamma e theta. Entrambi i modelli attribuiscono alle oscillazioni neurali una funzione fondamentale nella costruzione di rappresentazioni sintattiche complesse, concependo la sintassi come un processo dinamico, distribuito e gerarchico. Tuttavia, restano aperte questioni cruciali, come il ruolo della conoscenza grammaticale astratta o l'integrazione con un *parser* incrementale e psicologicamente plausibile.

Parallelamente, Bonhage *et al.* (2017) hanno osservato un aumento della potenza<sup>12</sup> nella banda delta (4 Hz) — maggiormente localizzato negli elettrodi posteriori centrali e bilaterali — durante la comprensione di frasi grammaticali rispetto a elenchi di parole disorganizzate. Altri studi, come quello di Bastiaansen *et al.* (2010), hanno evidenziato oscillazioni beta (13-18 Hz) in corrispondenza di frasi scritte e non di elenchi di parole non strutturati, suggerendo un legame con l'elaborazione sintattica e semantica. Relazioni di accordo errate tra soggetto e verbo coinvolte in violazioni morfosintattiche sono state, invece, associate a diminuzioni di potenza della banda alfa (8-13 Hz) dopo 600 e 800 ms dalla comparsa dell'errore (Davidson e Indefrey, 2007) e della banda theta (4-8 Hz) nei 350 e 450 ms seguenti con una successiva diminuzione di potenza della banda beta (13-30 Hz) a partire da circa 500 ms (Schneider *et al.*, 2016).

Sebbene i dati finora discussi si riferiscano alle dinamiche oscillatorie di configurazioni sintatticamente grammaticali, un considerevole numero di studi prende in considerazione i processi oscillatori coinvolti nelle violazioni morfosintattiche, esplorando gli effetti tempo-frequenza suscitati da violazioni che coinvolgono la categoria sintattica, il tempo verbale e infine l'accordo soggetto-verbo. In questo campo, Davidson e Indefrey (2007) hanno utilizzato frasi scritte in lingua olandese contenenti violazioni di categoria sintattica come *The director [of the]/\*[the of] bank...*, evidenziando che in una finestra temporale tra 500-900 ms dopo la comparsa della parola, l'errore morfosintattico (*the* al posto di *of*) era accompagnato da una diminuzione di potenza nelle bande alfa-beta (8-30 Hz). Risultati simili sono emersi dallo studio di Bastiaansen *et al.* (2010) nel quale strutture sintatticamente non ben formate provocavano prima diminuzioni di potenza di lunga durata (0-2500 ms) nella banda alfa (8-12 Hz) e successivamente diminuzioni di potenza di breve durata (~ 500-1000 ms) nella banda gamma (60-80Hz). Parallelamente, l'aumento di potenza della banda beta (13-18 Hz) cessava poco

<sup>12</sup>La potenza si riferisce all'ampiezza al quadrato di un segnale oscillatorio. Il risultato di un'analisi di potenza è uno spettro di potenza che rivela le frequenze evidenziando i valori di ampiezza più elevati nell'intervallo temporale di interesse. Pur fornendo una rappresentazione nel dominio della frequenza del segnale, questo tipo di analisi non riflette, tuttavia, l'evoluzione temporale della potenza che si ottiene invece attraverso l'analisi tempo-frequenza, capace di fornire una stima delle variazioni di potenza su più frequenze nel tempo. Un'altra componente nel dominio della frequenza è la fase, ovvero la pendenza (o direzione) del segnale in un dato punto nel tempo, che equivale allo spostamento sinistra-destra dell'oscillazione.

dopo aver incontrato tali violazioni di categoria sintattica. Secondo una possibile interpretazione, i risultati coerenti nell'intervallo di frequenza alfa-beta potrebbero riflettere processi relativi all'interruzione dell'elaborazione sintattica (Lewis e Bastiaansen, 2015). Tuttavia, considerando il ruolo dell'elaborazione del contenuto semantico e la possibilità di interferenza con le violazioni (morfo)sintattiche, il fenomeno potrebbe alternativamente essere indice degli effetti coinvolti nella elaborazione semantica piuttosto che sintattica (Meyer, 2017).

A questo proposito, lo studio di Bastiaansen e Hagoort (2015) suggerisce l'ipotesi secondo cui, durante la comprensione del linguaggio a livello di frase, l'unificazione sintattica e quella semantica siano operazioni parallele ma funzionalmente distinte mediante la sincronizzazione neuronale delle reti funzionalmente rilevanti in diversi intervalli di frequenza. Il loro studio comprendeva la somministrazione di frasi corrette, frasi sintatticamente corrette ma prive di significato, elenchi di parole casuali che non contenevano alcuna struttura sintattica e infine frasi contenenti un'anomalia semantica o una violazione sintattica in una parola critica della frase. Una maggiore potenza del ritmo gamma è stata osservata per frasi semanticamente coerenti rispetto a frasi semanticamente anomale. Allo stesso modo, il potere della banda beta era maggiore per le frasi sintatticamente corrette che per quelle errate.

Tuttavia, diversi studi sottolineano la difficoltà di dissociare nettamente il coinvolgimento dei ritmi cerebrali nell'uno o nell'altro campo. In primo luogo, ogni manipolazione sintattica corrisponde, infatti, quasi inevitabilmente ad una modifica in termini di significato (in particolar modo nel caso di configurazioni corrette o paradigmi di violazione, come negli studi precedentemente discussi). In secondo luogo, sebbene il coinvolgimento di fattori lessico-semantici possa essere ridotto, alcune componenti semantiche non possono essere completamente rimosse (è il caso di ruoli semantici come l'agente, il paziente, ecc.). Infine, è probabile che i processi sintattici e semantici operino temporalmente in parallelo sovrapponendosi all'interno delle stesse finestre temporali (Bornkessel-Schlesewsky *et al.*, 2016). In particolare, l'elaborazione predittiva del contenuto semantico risulta fondamentale durante il processo di elaborazione della frase al punto che tali previsioni si verificherebbero anche contemporaneamente all'integrazione delle strutture sintattiche. L'evidente interdipendenza tra sintassi e semantica sarebbe riconducibile all'organizzazione gerarchica delle oscillazioni neurali, in cui le frequenze più veloci (più alte) sono annidate all'interno di frequenze più lente (più basse) (Martorell *et al.*, 2023). Una divisione del lavoro assocerebbe frequenze alte e basse, rispettivamente, a processi semantici basati sul contenuto e a processi sintattici basati sulla struttura.

Sulla base dei risultati finora discussi le oscillazioni dei ritmi delta potrebbero essere coinvolte nella strutturazione sintattica, mentre le oscillazioni dei ritmi beta potrebbero sovrintendere alla previsione dall'alto verso il basso delle informazioni lessico-semantiche (Meyer, 2016), o, più in generale, alla rappresentazione del significato a livello della frase che richiede una predizione sia sintattica che semantica (Lewis e Bastiaansen, 2015).

Secondo Grimaldi (2020), una diversa visione potrebbe concepire il legame tra morfo-sintassi e semantica attraverso un'interazione di frequenza incrociata come l'accoppiamento fase-ampiezza (PAC), secondo il quale la fase delle frequenze più basse, riferite in questo caso alla banda delta correlata ai processi sintattici basati sulla struttura, modulerebbe l'ampiezza delle frequenze più veloci comprendenti gli intervalli alfa, beta e gamma ai quali sono associati i processi semantici basati sul contenuto. Questo modello potrebbe trovare una dimostrazione nei risultati dello studio ECoG di Ding *et al.* (2016) dove la sincronizzazione guidata dalla sintassi emergeva sia nella banda delta (in potenza) e sia in quella gamma (attraverso il suo inviluppo

di potenza<sup>13</sup>). In questo caso sintassi e semantica non solo sarebbero associate a diverse bande di frequenza ma sarebbero distinte anche in termini di proprietà oscillatorie (fase e potenza) risultando in una relazione diretta con un effetto modulatorio tra struttura sintattica e significato.

### Conclusioni

Il quadro dei dati analizzati evidenzia la coesistenza e l'interazione di vincoli neuro-computazionali e meccanismi neurali gerarchici che consentono a un cervello fonologico, morfo-sintattico e semantico di apprendere e discriminare suoni linguistici, riconoscere e memorizzare la forma delle parole, costruire frasi grammaticalmente strutturate e attribuire significato ad oggetti percepiti ed eventi vissuti. L'analisi delle componenti uditive N1 e MMN in ambito fonetico-fonologico, delle componenti ELAN, LAN e P600 in ambito morfo-sintattico, e della componente N400 in ambito semantico, conferma l'esistenza di fitte reti funzionali linguistiche, attive attraverso la cooperazione tra più aree corticali specializzate e distinti codici neurali. Parallelamente, lo studio delle oscillazioni neurali rivela un coinvolgimento selettivo di specifiche bande di frequenza nei processi linguistici: i ritmi gamma sembrano responsabili della decodifica dei parametri acustico-articolatori; le frequenze alte (alfa, beta e gamma) risultano associate a operazioni semantiche; mentre le frequenze più basse — in particolare i ritmi delta — si attivano durante l'elaborazione della struttura sintattica. L'interazione tra ritmo cerebrale e struttura linguistica suggerisce che il cervello umano non si limiti a ricevere e analizzare input linguistici, ma sia anche in grado di anticiparne e integrarne le strutture in tempo reale.

In questa prospettiva si colloca il necessario dialogo tra le neuroscienze e la linguistica. Sebbene, come ampiamente analizzato, sia possibile individuare specifiche corrispondenze tra le unità dell'analisi linguistica e le operazioni neurali, il bagaglio di conoscenze che proviene dalla linguistica non è immediatamente utilizzabile per esplorare e individuare le basi neurobiologiche del linguaggio. Le ontologie linguistiche come i fonemi, le sillabe, i morfemi, il lessico, la sintassi e le loro operazioni non sono direttamente collegabili a realtà neurofisiologiche, come i neuroni, i dendriti, le spine dendritiche, le sinapsi, le colonne corticali, i potenziali d'azione e le loro funzioni. Inoltre, le due discipline appaiono distinte da un diverso grado di "granularità": laddove l'approccio linguistico coinvolge una serie di livelli a "grana" fine ed esplicite operazioni computazionali — i fonemi sono combinati insieme per formare sillabe e parole, e le parole sono combinate insieme per formare frasi —, gli approcci neuroscientifici al linguaggio operano in termini di distinzioni empiriche più ampie (ad esempio, quali aree del cervello sono deputate alle operazioni sintattiche, semantiche ecc.).

In questa cornice, acquista particolare rilievo l'emergere di recenti modelli inter-disciplinari che tentano di integrare i calcoli linguistici formali con i meccanismi neurali oscillatori. Tra questi, il modello di Grimaldi (2020) si propone di collegare direttamente le operazioni sintattiche fondamentali della teoria generativa — *Merge, Label, Inflection* — a specifici pattern oscillatori, attraverso l'accoppiamento *cross-frequency* tra bande theta, alfa, beta e gamma. Il modello descrive una generazione sintattica *bottom-up* all'interno di un albero neuronale, in

<sup>13</sup> L'involuppo di potenza è una misura di frequenza temporale correlata che è in grado di fornire informazioni sull'evoluzione temporale della potenza, ovvero sulla forma specifica della sua struttura temporale. L'analisi del profilo spettrale di potenza nelle registrazioni EEG e MEG umane evidenzia il predominio della potenza nelle frequenze più basse, noto anche come rapporto di potenza 1/f e la preminenza dell'attività in banda alfa (~10 Hz) in stato di veglia con un secondo picco in banda beta (~20 Hz). Il profilo 1/f dello spettro di potenza è definito dalla sua pendenza, che nel caso di registrazioni LFP, EEG e MEG, è di solito negativa (Tavano *et al.*, 2023).

cui le oscillazioni subcorticali si sincronizzano ciclicamente con quelle corticali, configurando un sistema neurale integrato. L'accoppiamento delle oscillazioni theta-gamma valterebbe e organizzerebbe gli oggetti concettuali recuperati dal sistema di conoscenza (KS) (all'interno delle strutture ippocampali e ipotalamiche) per mapparli su elementi lessicali (a livello corticale, all'interno delle strutture fronto-temporali). Successivamente, il ciclico accoppiamento dei ritmi alfa-gamma-beta è coinvolto nella combinazione e nell'etichettatura degli elementi lessicali ed è responsabile dell'operazione di Spell-out verso l'interfaccia concettuale-intenzionale (CI). Infine, un successivo accoppiamento delle oscillazioni gamma-beta-theta permette il trasferimento delle strutture sintattiche verso l'interfaccia senso motoria (SM). Tale architettura è fondata su un principio ciclico che guida i processi computazionali e rappresentazionali, garantendo una comunicazione continua e dinamica tra le aree subcorticali e corticali. Questo principio offre un quadro esplicativo coerente per comprendere il trattamento di dipendenze a lunga distanza, il movimento e la ricorsione all'interno delle architetture neurali.

In tal modo, si delinea una prospettiva integrativa in cui i primitivi linguistici possono essere riformulati alla luce di meccanismi neurali distribuiti e dinamici. Il superamento dei problemi di *Ontological incommensurability* e *Granularity mismatch* (Poeppel ed Embick, 2005) appare così possibile attraverso una teoria inter-disciplinare fondata su vincoli neurocomputazionali, in grado di mappare le unità operative della linguistica formale su dinamiche cerebrali empiricamente osservabili. Un tale approccio non implica la riduzione della linguistica alla neurofisiologia, bensì un tentativo di co-costruzione teorica, in cui i modelli di ciascuna disciplina contribuiscono alla formulazione di ipotesi testabili sul funzionamento del linguaggio umano.

Futuri esperimenti condotti attraverso nuovi paradigmi e il confronto con modelli linguistici computazionali basati su reti neurali artificiali potrebbero validare o affinare le teorie sviluppate nell'ambito dell'approccio nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza. Ulteriori ricerche sono ugualmente necessarie per valutare come le oscillazioni neurali interagiscano su più dimensioni – come nel caso del modello PAC – e quindi fornire una spiegazione più dettagliata del loro ruolo nell'elaborazione delle frasi. Identificare i punti di convergenza nelle dinamiche oscillatorie sottese ai processi linguistici ed esaminarli all'interno di un quadro teorico neuroscientifico più ampio potrà, senza dubbio, migliorare la comprensione dell'implementazione neurale del linguaggio. Infine, sebbene il modello proposto da Grimaldi (2020) sia ancora in fase esplorativa, rappresenta una solida base per future ricerche empiriche che potrebbero fornire risposte definitive su come le strutture linguistiche siano effettivamente costruite dal cervello umano. La riduzione del divario tra linguistica e neuroscienze potrà così contribuire in modo decisivo alla costruzione di un modello del linguaggio che tenga conto sia dei vincoli biologici che delle strutture formali, offrendo una visione integrata della competenza linguistica come funzione emergente da sistemi neurali dinamici, predittivi e interconnessi.

### References

- Amzica, Florin and Lopes da Silva Fernando. 2011. "Cellular substrates of brain rhythms". In Niedermeyer's *Electroencephalography: basic principles, clinical applications and related fields*, ed. by Schomer Donald L. and Fernando Lopes da Silva, 33-63. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Aschoff, Jürgen. 1965. "Response curves in circadian periodicity". In *Circadian Clocks*, ed. by Jürgen Aschoff, 95-111. Amsterdam: North-Holland.
- Aschoff, Jürgen, Gerecke Ursula and Wever Rütger. 1967. "Desynchronization of human circadian rhythms". *Jpn J Physiol.* 17 (4): 450-457.
- Başar, Erol. 1999. *Brain Function and Oscillations: II. Integrative Brain Function. Neurophysiology and Cognitive Processes*. Heidelberg: Springer-Verlag.

- Bastiaansen, Marcel, Magyari Lilla and Hagoort Peter. 2010. "Syntactic unification operations are reflected in oscillatory dynamics during on-line sentence comprehension". *J Cogn Neurosci*. 22: 1333-1347.
- Bastiaansen, Marcel and Hagoort Peter. 2015. "Frequency-based Segregation of Syntactic and Semantic Unification during Online Sentence Level Language Comprehension". *J Cogn Neurosci*. 27: 2095-2107.
- Bonhage, Corinna E., Meyer Lars, Gruber Thomas *et al.* 2017. "Oscillatory EEG dynamics underlying automatic chunking during sentence processing". *Neuroimage* 152: 647-657.
- Bornkessel-Schlesewsky, Ina, Staub Adrian and Schlesewsky Matthias. 2016. "The Timecourse of Sentence Processing in the Brain". In *Neurobiology of Language*, ed. by Gregory Hickok and Steven L. Small, 607-620. Elsevier: Academic Press.
- Bruce, Victor G. and Pittendrigh Colin S. 1975. "Endogenous Rhythms in Insects and Microorganisms". *The American Naturalist* 91: 179-195.
- Calmus, Ryan, Wilson Benjamin, Kikuchi Yukiko and Petkov Christopher I. 2020. "Structured sequence processing and combinatorial binding: neurobiologically and computationally informed hypotheses". *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 375 (1791).
- Chalk, Matthew, Marre Oliver and Tkačik Gašper. 2017. "Toward a unified theory of efficient, predictive, and sparse coding". *Proc Natl Acad Sci U.S.A* 115 (1): 189-191.
- Damasio, Antonio R. and Tranel Daniel. 1993. "Nouns and Verbs Are Retrieved with Differently Distributed Neural Systems". *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 90 (11): 4957-4960.
- Davidson, Donald J. and Indefrey Peter. 2007. "An inverse relation between event-related and time-frequency violation responses in sentence processing". *Brain Res.* 1158: 81-92.
- DeLong, Katherine A, Urbach Thomas P and Kutas Marta. 2005. "Probabilistic word pre-activation during language comprehension inferred from electrical brain activity". *Nat Neurosci* 8 (8): 1117-1121.
- De Vincenzi, Marica. 1991. *Syntactic parsing strategies in Italian*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Di Liberto, Giovanni M., O'Sullivan James A. and Lalor Edmund C. 2015. "Low-Frequency Cortical Entrainment to Speech Reflects Phoneme Level Processing". *Current Biology* 25 (19): 2457- 2465.
- Dimigen, Olaf, Sommer Werner and Kliegl Reinhold. 2007. "Long reading regressions are accompanied by a P600-like brain potential". In: *Proceedings of the 14th European Conference on Eye Movements (ECEM), Journal of Eye Movement Research*, Potsdam, Germany: University of Potsdam.
- Doumas, L. A. A., Hummel, J. E. and Sandhofer, C. M. 2008. "A theory of the discovery and predication of relational concepts". *Psychol. Rev.* 115: 1-43.
- Ellis, Andrew W., Miller Diane and Sin Gillian. 1983. "Wernicke's Aphasia and Normal Language Processing: A Casestudy in Cognitive Neuropsychology". *Cognition* 15: 111-144.
- El Yagoubi, Radouane, Mondini Sara, Bisiacchi Patrizia T. and Chiarelli Valentina. 2006. "The Electrophysiological Basis of Mass and Count Nouns Processing". *Brain and Language* 99: 199-200.
- Federmeier, Kara D. and Kutas Marta. 1999. "A rose by any other name: long-term memory structure and sentence processing". *J Mem Lang* 41: 469-495.
- Friederici, Angela D., Hahne Anja and Saddy Douglas. 2002. "Distinct neurophysiological patterns reflecting aspects of syntactic complexity and syntactic repair". *J Psycholinguist Res* 31: 45-63.
- Friederici, Angela D. and Kotz Sonja. A. 2003. "The brain basis of syntactic processes: Functional imaging and lesion studies". *NeuroImage* 20 (1): 8-17.
- Friederici, Angela D. 2011. "The Brain Basis of Language Processing: From Structure to Function". *Physiological Reviews* 91 (4): 1357-1392.
- Friederici, Angela D. 2017. *Language in Our Brain: The Origins of a Uniquely Human Capacity*, Cambridge (MA)-London: The MIT Press.
- Ghitza, Oded. 2011. "Linking Speech Perception and Neurophysiology: Speech Decoding Guided by Cascaded Oscillators Locked to the Input Rhythm". *Frontiers in Psychology* 2 (130) <fpsyg.2011.00130> (08/2024).
- Ghitza, Oded and Greenberg Steven. 2009. "On the possible role of brain rhythms in speech perception: intelligibility of time-compressed speech with periodic and aperiodic insertions of silence". *Phonetica* 66: 113-126.

- Glosser, Guila and Donofrio Nancy. 2001. "Differences Between Nouns and Verbs After Anterior Temporal Lobectomy". *Neuropsychology* 15: 39-47.
- Goyal, Abhinav, Miller, Jonathan, Qasim, Salman E. *et al.* 2020. "Functionally distinct high and low theta oscillations in the human hippocampus". *Nat Commun.* 11 (2469) <s41467-020-15670-6> (08/2024).
- Grimaldi, Mirko. 2019. *Il cervello fonologico*. Roma: Carocci.
- Grimaldi, Mirko. 2020. "From brain noise to syntactic structures: A formal proposal within the oscillatory rhythms perspective". In *Linguistic Variation: Structure and Interpretation – A Festschrift in Honour of M. Rita Manzini in occasion of her 60th birthday*, ed. by Ludovico Franco and Paolo Lorusso. New York: Mouton de Gruyter.
- Grimaldi, Mirko, De Vincenzi Marica, Lorusso Paolo, Di Russo Francesco *et al.* 2023. "The processing of Which interrogative sentences: A behavioral and ERP study". *Journal of Neurolinguistics*, 68 (2).
- Halle, Moris. 2002. *From Memory to Speech and Back: Papers on Phonetics and Phonology. 1954- 2002*. Berlino: De Gruyter.
- Halle, Moris and Stevens Kenneth N. 1962. "Speech Recognition: A Model and a Program for Research". *IRE Transactions on Information Theory* 8: 155-159.
- Indefrey, Peter, Brown Colin, Hellfig Frank, Amunts Herzog Herzog and Seitz Rainer J. 2001. "A neural correlate of syntactic encoding during speech production". *PNAS* 98: 5933-5936.
- Joshi, Siddhartha, Li Yin, Kalwani Rishi M. and Gold Joshua I. 2016. "Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex". *Neuron* 89 (1): 221-234.
- Kazanina, Natalia and Tavano Alessandro. 2023. "What neural oscillations can and cannot do for syntactic structure building". *Nat. Rev. Neurosci.* 24: 113-128.
- Kemmerer, David. 2015. *Cognitive Neuroscience of Language*. New York: Psychology Press.
- Kim, Albert and Osterhout Lee. 2005. "The Independence of Combinatory Semantic Processing: Evidence from Event-related Potentials". *Journal of Memory* 52 (2): 205-225.
- Kim, Albert, Leif Oines and Akira Miyake. 2018. "Individual differences in verbal working memory under- lie a tradeoff between semantic and structural processing difficulty during language comprehension: an ERP investigation". *J Exp Psychol Learn Mem Cogn.* 44 (3): 406-420.
- Kos, Miriam, van den Brink Danielle and Hagoort Peter. 2012. "Individual variation in the late positive complex to semantic anomalies". *Frontiers in Psychology* 3 (318): 1-10.
- Kuperberg, Gina R. 2007. "Neural Mechanisms of Language Comprehension: Challenges to Syntax". *Brain Research* 1146: 23-49.
- Kutas, Marta and Hillyards Steven A. 1980. "Reading Senseless Sentences: Brain Potentials Reflect Semantic Incongruity". *Science* 207 (4427): 203-205.
- Kutas, Marta and Hillyard Steven A. 1984. "Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association". *Nature* 307: 101-103.
- Kutas, Marta and Federmeier Kara D. 2011. "Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP)". *Annu Rev Psychol* 62 (1): 621-647.
- Lau, Ellen F, Phillips Colin and Poeppel David. 2008. "A Cortical Network for Semantics: (De)constructing the N400". *Nature Reviews Neuroscience* 9 (12): 920-933.
- Laszlo, Sarah and Federmeier Kara D. 2011. "The N400 as a snapshot of interactive processing: evidence from regression analyses of orthographic neighbor and lexical associate effects". *Psychophysiology* 48: 176-186.
- Lewis, Andrew G. and Bastiaansen Marcel. 2015. "A predictive coding framework for rapid neural dynamics during sentence-level language comprehension". *Cortex* 68: 155-168.
- Manca, Anna Dora, Sigona, Francesco, Francesco, Di Russo and Grimaldi Mirko. 2019. "Electrophysiological evidence of phonemotopic representations of vowels in the primary and secondary auditory cortex". *Cortex* 121: 385-398.
- Martorell, Jordi, Morucci Piermatteo, Mancini Simona and Molinaro Nicola. 2023. "Sentence processing: How words generate syntactic structures in the brain". In *Language Electrified. Techniques, Methods, Applications, and Future Perspectives in the Neurophysiological Investigation of Language*, ed. by Mirko Grimaldi, Yury Shtyrov, and Elvira Brattico, 551-579. New York: Springer Nature.

- Meyer, Lars, Henry Molly J., Gaston Paul, Schmuck Nina and Friederici Angela D. 2016. "Linguistic Bias Modulates Interpretation of Speech via Neural Delta-Band Oscillations". *Cereb Cortex* 27: 4293-4302.
- Meyer, Lars. 2017. "The neural oscillations of speech processing and language comprehension: State of the art and emerging mechanisms". *Eur J Neurosci.* 48: 2609-2621.
- Metzner, Paul, von der Malsburg Titus, Vasishth Shraavan and Rösler Frank. 2017. "The importance of reading naturally: evidence from combined recordings of eye movements and electric brain potentials". *Cogn Sci* 41: 1232-1263.
- Michalareas, Georgios, Vezoli Julien, Van Pelt Stan *et al.* 2016. "Alpha-beta and gamma rhythms subserve feedback and feedforward influences among human visual cortical areas". *Neuron*, 89 (2): 384-397.
- Mizuseki, Kenji, Sirota Anton, Pastalkova Eva *et al.* 2009. "Theta oscillations provide temporal windows for local circuit computation in the entorhinal-hippocampal loop". *Neuron*, 64 (2): 267-280.
- Mondini, Simona *et al.* 2008. "Mass Regions: An ERP Study on Early Components". *Neuroscience Letters* 430: 48-53.
- Moro, Andrea, Tettamanti Marco, Cappa Stefano F. and Fazio Franco. 2001. "Syntax and the brain-disentangling grammar by selective anomalies". *Neuroimage* 13: 110-118.
- Näätänen, Risto and Picton Terence. 1987. "The N1 Wave of the Human Electric and Magnetic Response to Sound: A Review and an Analysis of the Component Structure". *Psychophysiology* 24: 375-425.
- Näätänen, Risto, Teija Kujala and István Winkler. 2011. "Auditory processing that leads to conscious perception: A unique window to central auditory processing opened by the mismatch negativity and related responses". *Psychophysiology* 48 (1): 4-22.
- Panizza, Daniele, Catricalà Eleonora and Cappa Stefano. F. 2020. *Il cervello semantico*. Roma: Carocci.
- Peelle, Jonathan E. and Matthew H. Davis. 2012. "Neural oscillations carry speech rhythm through to comprehension". *Frontiers in psychology* 3: 320.
- Pylkkänen, Liina. 2019. "The Neural Basis of Combinatory Syntax and Semantics". *Science* 366 (6461): 62-66.
- Rabovsky, Milena. 2023. "Neural Underpinnings of Semantic Processing". In *Language Electrified. Techniques, Methods, Applications, and Future Perspectives in the Neurophysiological Investigation of Language*, ed. by Mirko Grimaldi, Yury Shtyrov, and Elvira Brattico, 527-550. New York: Springer Nature.
- Regel, Stefanie, Meyer Lars and Gunter Thomas C. 2014. "Distinguishing neurocognitive processes reflected by P600 effects: evidence from ERPs and neural oscillations". *PLoS One* 9 (5).
- Rolke, Bettina, Heil Martin, Streb Judith and Hennighausen Erwin. 2001. "Missed prime words within the attentional blink evoke an N400 semantic priming effect". *Psychophysiology* 38 (2): 165-174.
- Sahin, Ned T., Pinker Steven and Halgren Eric. 2006. "Abstract Grammatical Processing of Nouns and Verbs in Broca's Area. Evidence from fMRI". *Cortex* 42: 540-562.
- Schirmer, Annett and Kotz Sonja A. 2003. "ERP evidence for a sex-specific Stroop effect in emotional speech". *J Cogn Neurosci* 15: 1135-1148.
- Schneider, Jillian M., Abel Alyssa D., Ogiela Diane A., Middleton Erin and Maguire Martha J. 2016. "Developmental differences in beta and theta power during sentence processing". *Dev Cogn Neurosci.* 19: 19-30.
- Schroeder, Charles Edward and Lakatos Peter. 2009. "The Gamma Oscillation: Master or Slave?". *Brain Topog.* 22 (1): 24-26.
- Semenza, Carlo *et al.* 1990. "Word Formation: New Evidence from Aphasia". *Neuropsychologia* 28: 499-502.
- Semenza, Carlo *et al.* 2008. "Processing of Mass and Count Nouns in the Brain". In *Language and the Brain - Semantics*, ed. by Valentina Bambini, Irene Ricci and Pier Marco Bertinetto, Atti del XLII Congresso Internazionale di Studi della Società di Linguistica Italiana, vol. 2 I.C.3. Pisa: Bulzoni.
- Shapiro, Kevin, Caramazza Alfonso and Shelton Jennifer. 2000. "Grammatical Class in Lexical Production and Morphological Processing: Evidence from a Case of Fluent Aphasia". *Cognitive Neuropsychology* 17: 665-682.

- Steinhauer, Karsten *et al.* 2001. "How the Mass Counts: An Electrophysiological Approach to the Processing of Lexical Features". *Cognitive Neuroscience and Neuropsychology* 12: 999-1005.
- Steriade, Mircea. 2006. "Grouping of brain rhythms in corticothalamic systems". *Neuroscience*, 137 (4): 1087-1106.
- Tanner, Darren, Grey Sara and van Hell Janet G. 2017. "Dissociating retrieval interference and reanalysis in the P600 during sentence comprehension". *Psychophysiology* 54 (2): 248-259.
- Tanner, Darren. 2019. "Robust neurocognitive individual differences in grammatical agreement processing: a latent variable approach". *Cortex* 111: 210-237.
- Tavano, Alessandro, Rimmele Johanna M., Michalareas Georgios and Poeppel David. 2023. "Neural Oscillations in EEG and MEG". In *Language Electrified. Techniques, Methods, Applications, and Future Perspectives in the Neurophysiological Investigation of Language*, ed. by Mirko Grimaldi, Yury Shtyrov and Elvira Brattico, 241-284. New York: Springer Nature.
- Tettamanti, Marco. 2020. *Il cervello sintattico*. Roma: Carocci editore.
- Treisman, Anne and Gelade Garry. 1980. "A feature-integration theory of attention". *Cognitive Psychology* 12 (1): 97-136.
- Van Petten, Cyma and Luka Barbara J. 2012. "Prediction during language comprehension: benefits, costs, and ERP components". *Int J Psychophysiol* 83 (2): 176-190.
- Varela, Francisco, Lachaux Jean-Philippe, Rodriguez Eugenio and Martinerie Jacques. 2001. "The brain web: phase synchronization and large-scale integration". *Nature Review Neuroscience* 2: 229-239.

